JSA *e* マガジン No.26

風船と放射性微粒子

著者

三好 永作

2018 年 1 月 31 日

JSA *e* マガジン編集委員会 発行

はしがき

放射性微粒子は目に見えない．原発サイトから風船を飛ばして，その風船を発見した人からの発見時間・場所の報告を受けることで，放射性微粒子の動きを可視化しようという「風船プロジェクト」の試みがある．本論文では，風船と放射性微粒子の飛び方を科学の目で観て，それらの違いと類似性を検討する．そのうえで「風船プロジェクト」の意義を論じる．

この論文は,『日本の科学者』誌の2014年2月号に掲載された論文の増補版である．『日本の科学者』誌上の論文では，「風船プロジェクト」で風船飛ばしが行われた冬（2012年12月8日）と春（2013年4月14日）の風の３次元データを使い，風船と放射性微粒子の飛ぶ軌跡を数値シミュレーションし比較した．風船は地上から飛ばされるが，放射性微粒子の初期高度は500 メートルとした．この初期高度は，2011年3 月 14 日の福島第一原発３号機の爆発によって放射性微粒子を含む粉じんが巻き上げられた高度を参考にしている．前論文は，これらのデータによる解析を基にしたものである．

その後，夏（2013年7月28日）と秋（2013年10月27日）にも「風船プロジェクト」の風船飛ばしが行われた．そして，チェルノブイリ原発事故では爆発威力のより大きな水蒸気爆発により，放射性微粒子を含む粉じんは数千メートルまで上昇したことも分かってきた．

この論文では，冬・春・夏・秋の４回の「風船プロジェクト」の風船飛ばしの行われた日の風の３次元データを使い，風船と放射性微粒子の飛ぶ軌跡を数値シミュレーションし，その結果を解析する．その際，爆発威力の違いによる放射性微粒子の初期高度の違い調べるために, 500 メートルおよび3000メートルの初期高度を考慮した．

目次

	ページ
１　はじめに	1
２　放射性微粒子の飛び方	1
３　風船の飛び方	4
４　放射性微粒子と風船の飛行シミュレーション	8
４−１　第１回風船プロジェクトの飛行シミュレーション	9
４−２　第２回風船プロジェクトの飛行シミュレーション	13
４−３　第３回風船プロジェクトの飛行シミュレーション	16
４−４　第４回風船プロジェクトの飛行シミュレーション	19
４−５　飛行シミュレーションのまとめ	22
５　拡散について 23	23
６　おわりに	24

１　はじめに

原発事故などにより原子炉の外に放出された放射性物質は，すぐに薄まってしまわずに，大気とともに雲のような状態で移動することがある．このような，放射性物質で汚染された空気の塊を放射性プルームという．放射性プルームの中の放射性物質は，放射性希ガスなどの気体状のものや微細な粒子状のものがある．気体状の放射性物質や粒径（粒の直径）の小さい粒子状の放射性物質は，まわりの大気にほぼ追随した形で移動する．しかし，粒径の大きい粒子状の放射性物質は，落下速度が大きいので，時間の経過とともに他の放射性プルームから離れていく．ここでは，放射性プルームの中の粒子状の放射性物質を放射性微粒子と呼んで議論を進めることにする．

放射性プルームや放射性微粒子は目に見えない．目に見えない放射性微粒子の動きを目に見えるようにする試みがある.「原発なくそう！九州玄海訴訟」の原告団が「風船プロジェクト」[1] を立ち上げ，風船発見者からの発見時間および場所の報告を受けることで，放射性微粒子の動きを可視化しようという試みである．ほかにも同様のプロジェクトがある．しかし，風船と放射性微粒子の飛び方は必ずしも同じではない．その違いを検討するとともに風船プロジェクトの意義について考えてみる．この e マガジンは,『日本の科学者』誌の 2014 年 2 月号に掲載された論文[2]の増補版であり，冬・春・夏・秋の４回の「風船プロジェクト」の風船飛ばしの行われた日の風の３次元データを使い，風船と放射性微粒子の飛ぶ軌跡を数値シミュレーションし，その結果を解析する．その際，爆発威力の違いによる放射性微粒子の初期高度の違い調べるために，500 メートルおよび 3000 メートルの初期高度を考慮した．風船プロジェクトの意義を総合的に論じたものである．

２　放射性微粒子の飛び方

原発事故によって放出される放射性微粒子は，爆発的事象をともなわず単に漏れ出る場合もあるが，福島原発事故でもあったように爆発により高所に運ばれることが一般的であろう．爆風の上昇速度に加えて，まわりの空気より放射性微粒子を包む空気が暖かいので上昇する．最終的には周りの空気の温度とほぼ同じになるので，そこで浮力を失って上昇をやめることになるが，大規模な爆発の場合には，放射性微粒子を包む高温の空気量が多いため，冷やされ方も遅くなる．

放射性微粒子の高度分布は,爆発の形態や規模によりさまざまである.例えば，2011 年 3 月 12 日の福島第一原発 1 号機の爆発では，放射性物質はあまり高くまで噴き上げられなかった．しかし，2011 年 3 月 14 日の福島第一原発 3 号機の爆発によって放射性微粒子を含む粉じんは約 500 m の上空まで達した[3]．1 号機の爆発は水素爆発であるが，3 号機の爆発には水素のみでなくコリウム・コンクリ

ート反応により発生した一酸化炭素が関与した可能性が高い[3, 4]．また，1986年4月26日のチェルノブイリ事故での最初の爆発では, 放射性微粒子は数千メートルまで噴き上げられたと想定されている．プディキエビッツ[5]は爆発直後に4000mまで噴き上げられたとし, ハス等[6]は5000m以上にまで噴き上げられた可能性もあるが，2000m以上に噴き上げられたとして放射性プルームの拡散のシミュレーションを行っている．チェルノブイリのこの最初の爆発は，水蒸気爆発であったと考えられている[7]．水蒸気爆発は，水素爆発などに比較して爆発の威力ははるかに大きい．体積が一気に1000倍以上にもなるからである．ともかく，放射性微粒子は，まわりの空気とともに比較的短時間のうちにさまざまな高度まで運ばれる．その後，放射性微粒子は一般にゆっくりと落下するが，大気が上昇流であればさらに上空まで運ばれ，下降流にあえば通常の落下よりも速く落下することになる．

ここで，放射性微粒子について鉛直方向の落下運動について考えてみる．放射性微粒子が受ける鉛直方向の力は，重力と空気の抵抗である．このうち後者は空気中を落下する小さな球体の場合はその速度υに比例し，$6\pi nr\upsilon$であることが知られている(ストークスの法則)．ここで r は粒子の半径，n は空気の抵抗係数(1.8×10^{-5} Pa s)である．したがって微粒子の質量を m とすると，下向きを正にとった運動方程式は

$$ma = mg - 6\pi nr\upsilon \tag{1}$$

となる．ここで a は微粒子の加速度，g は重力加速度(9.8 m s^{-2})である．微粒子はすばやく一定の速度に達する．その速度を終端速度と呼ぶ．その時には加速度 a はゼロなので，終端速度υ_tは，(1)式から

$$\upsilon_t = \frac{2}{9}\frac{\rho g r^2}{n} \tag{2}$$

と与えられる．ここで$m = \frac{4}{3}\pi r^3\rho$ (ρは微粒子の密度)を用いている．

微粒子の半径を1ミクロン(μm), 密度を1 g cm^{-3}として終端速度を計算すれば,

$$\upsilon_t = 1.2\times10^{-4}\ \mathrm{m\ s^{-1}} \tag{3}$$

となる．つまり，半径1 μm（直径で2 μm）の放射性微粒子は10000 秒（3時間弱）に1.2 mしか落下しないことになる．1 km 上空に吹き上げられた放射性微粒子が地上に落ちてくるには，8.3×10^6 秒かかることになる．これは約100日である．密度を2 g cm^{-3}としても，一ヵ月半以上は地上に降りてこない．数km（数千メートル）まで上空に吹き上げられた放射性微粒子は, 地球をぐるぐる回ることになる. つまり, 粒径2 μm程度以下の微粒子はほとんど落下せず, まわりの大気とともに風下に流されていくことになる．

最近話題となっているPM2.5とは，粒径が2.5 μm以下の微粒子のことである．このPM2.5が大気中に浮遊している理由は以上述べたことから容易に理解できるであろう．

しかし，(2)式からわかるように，粒径が異なれば落下速度は粒径の２乗に比例して大きくなる．例えば，砂丘の砂粒の粒径（直径）はほぼ0.35 mmであるが，その砂粒は密度を2 g cm^{-3}として(2)式から計算すると7.4 m s^{-1} 程度の終端速度になる．1秒の間に約7 mも落下することになるので，これでは砂丘の砂粒はあまり遠くまで飛べないことになる．

それに対して黄砂に含まれる砂粒の粒径はほぼ0.004 mm（4 μm）であり，(3)式の導出で与えた放射性微粒子の２倍の粒径になっている．したがって，その終端速度は砂の密度も加味して考えれば，(3)式の８倍程度，約0.001 m s^{-1}となり，1秒間に1 mmしか落下しない．高度1 kmまで巻き上げられた黄砂が地上に落ちるまでには10数日はかかることになる．中国で巻き上げられた黄砂が日本にまで届くのは道理である．

表１に粒径（直径）2，20，200 μm の微粒子（密度2 g cm^{-3}）の終端速度と1時間あたりの落下距離を参考のため示しておく．

表１　微粒子の粒径と終端速度および落下距離

粒径(μm)	終端速度 (m s^{-1})	1 時間あたりの落下距離(m)
2	2.4×10^{-4}	0.86
20	2.4×10^{-2}	86
200	2.4	8600

放射性微粒子が地面に落ちることを沈着という．２通りの沈着がある．１つは，大気の下降流などで地表近くに運ばれた微粒子がそのまま重力や乱流によって地面に落ちる場合で，これを乾性沈着という．もう一つは，微粒子が雨や雪によって地面に落ちる場合で，これを湿性沈着という．湿性沈着は，放射性微粒子の場合には特に重要である．福島の飯館村や中通りへの放射能汚染は，この湿性沈着の影響が大きかったと言われている[8]．大気中の微粒子が雨などによって沈着すること自身は目に見えない．しかし，沈着したことは，雨後の澄んだ空気によって実感することができる．この澄んだ空気は，大気中に存在していた微粒子が雨によって多くが湿性沈着してほとんど存在しなくなった結果である．

３　風船の飛び方

次に，風船の飛び方を考える．風船の中にはヘリウムガスが充填されている．中のヘリウムが空気より軽いことによって，風船は浮力を得て高く昇ることになる．アルキメデスの原理である．ただ空気抵抗のため，上昇速度はすぐにほぼ一定になる．ゴムでできている普通の風船は，上空で気圧が下がると，それにともなってどんどん膨らんで，風船のなかの圧力が周りの気圧と同じになるので，常に同じ浮力を得て，基本的にはどこまでも上昇し続けることになる．

しかし最近では,「固い」風船もある．この「固い」風船は上空での気圧が低くなっても，風船はそれほど膨らまず空気の密度が小さくなると浮力を失うことになるので，普通のゴム風船のように上昇し続けることはない．

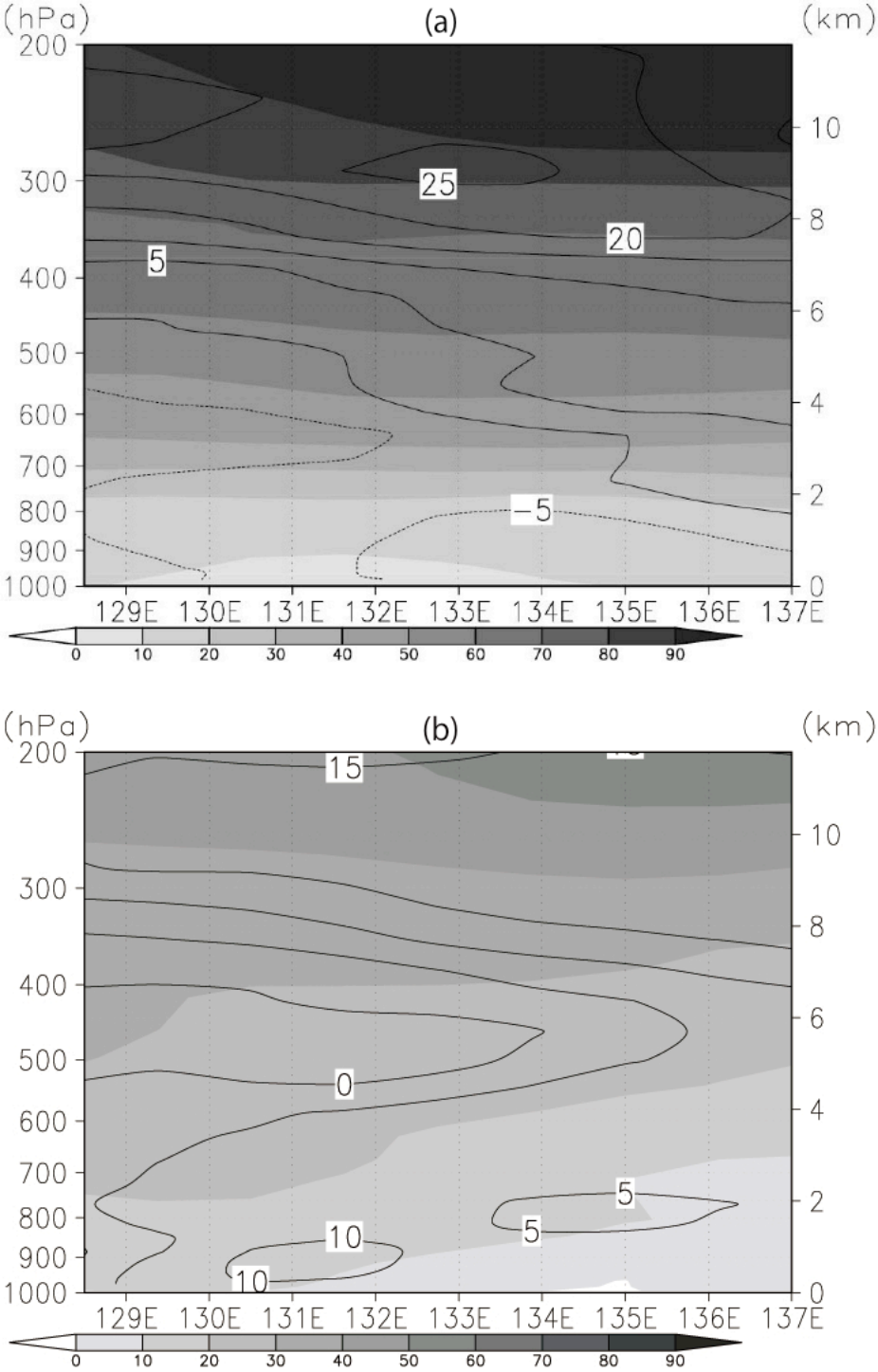
風船からヘリウムが徐々に脱け出ると浮力も徐々になくなり，ついには自重のほうが大きくなって落ちることになる．これは比較的ゆっくりと落ちることになる．普通のゴムの風船では，たいていの場合，上空で風船が破裂して落下すると考えられる．気圧 250 hPa の高さ（10 km より少し高い程度）まで行けば，風船の体積は 4 倍程度になる．ここまで大きくなることに耐えられる普通のゴム風船は多くはない．また上空へ行けば氷が風船表面で成長したりすることもあり，これも風船を壊しやすくする．破裂した場合は素早く落下してくることになる．

風船の上昇速度が 0.8 m s^{-1} とすると，高さ 10 km に到達するのには 3 時間半かかることになる．3 時間半では普通の結び方をしていればヘリウムが顕著に減ることはなく，またここまでの高さにはどんな風船も到達できないと考えられるので，これより長く，また遠くまで普通のゴム風船が飛ぶことはできないと考えられる．

実際に飛んだ風船の記録を見てみよう．これまでに 4 回のプロジェクトが行われている．風船の発見の記録は風船プロジェクトのホームページ[1]にあるので，必要な場合は参考にしてほしい．風船の発見時刻と実際の到達時刻が比較的近いと考えられるものが考察の対象となる．

第1回目の風船プロジェクトは2012年12月8日に原発サイト近くで行われた．放球時刻は 14 時である. 風船の材質はゴムではなく環境に配慮したものではあるが，膨らみ方はゴム風船と同様のものである．北緯 33 度付近の東経 128.5 度から 137 度までのこの日の上空の風の様子が図 1 (a)に示されており，冬の典型的な風が吹いていることがわかる．陰影は西風の風速（m s^{-1}）を表している．上空にはジェット気流が存在し，8 km より上では 80 m s^{-1} 以上の西風が見られる．5 km でも 50 m s^{-1} を超えている．

一方，下層の風はそれほど強くなく，上下の風速差（これを鉛直シアーという）は大変大きい．等値線は南風を正とした南北風の風速を表している（実線による等値線は南風，点線による負の等値線は北風を示す）．8 km より上では 20 m s^{-1} 以上の南風が見られる．2~5 km の低空では風速が負，つまり，北風の領域が見られている．また一般に，下層では北風が，上層では南風が卓越している．


(a)
(hPa)
(km)
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
10
8
6
4
2
0
25
20
5
−5
129E 130E 131E 132E 133E 134E 135E 136E 137E
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90
(b)
(hPa)
(km)
15
0
5
5
10
10
129E 130E 131E 132E 133E 134E 135E 136E 137E
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90

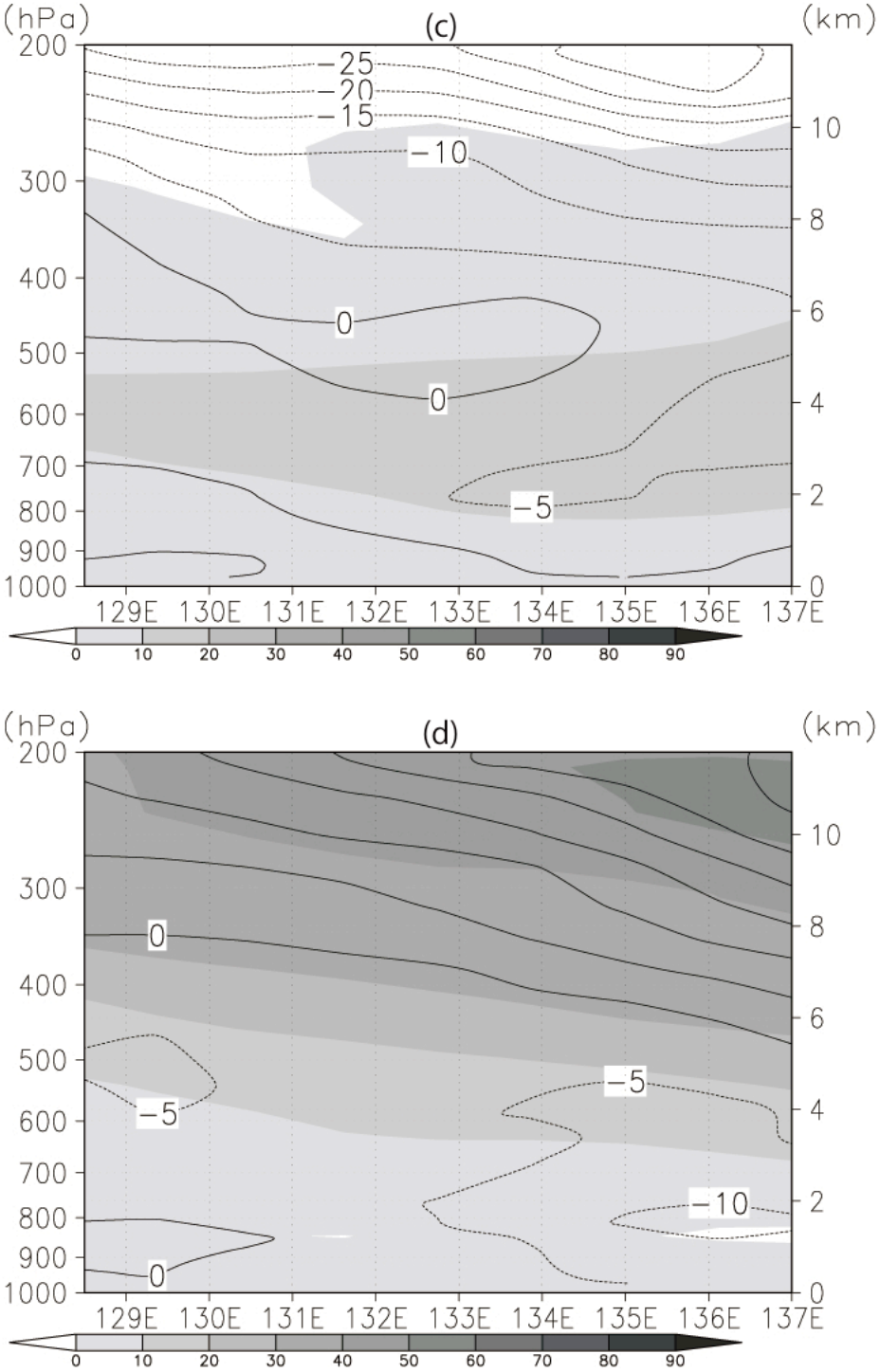


図 1 (a) 2012 年 12 月 8 日 15 時における約 33° N に沿う風の高度・経度分布. (b) 2013 年 4 月 14 日 15 時における約 34° N に沿う風の高度・経度分布. (c) 2013 年 7 月 28 日 15 時における約 33.5° N に沿う風の高度・経度分布. (d) 2013 年 10 月 27 日 15 時における約 33° N に沿う風の高度・経度分布. 陰影が西風, 等値線が南北風(南風を正とする)を表す. 縦軸は左側が高度に対応した気圧(hPa), 右側がおよその高度(km), 横軸は経度を示す. 横軸下の陰影のスケールは西風の風速(m s^{-1})を示す.

実際の風向きと風速は，これらの西風（あるいは東風）と南風（あるいは北風）の合成となる．例えば，西風の風速が 20 m s^{-1} であり，南風の風速が 20 m s^{-1} であれば，実際の風向きと風速は，それらをベクトル的に合成した南西風で 28 m s^{-1} ということになる．このように図 1 (a)は，2012 年 12 月 8 日 15 時における北緯 33 度付近の東経 128.5 度から 137 度までの上空の風向きと風速を正確に表現したものとなっている．

シミュレーションの拘束条件となり得る発見報告として，2 時間 30 分後に 340 km の地点（高知市鴨部）からのものがあった．仮に発見された時刻と風船の到達時刻が同じであるとすると（実際に差は小さいと考えられる），風船の平均水平速度は 39 m s^{-1} となる．上でも述べたように下層の風速は弱いので，かなりの上空を飛んだものと考えられる．

また，最初の発見は，2 時間 20 分後に福岡市西区周船寺であった．これは，風船プロジェクト参加者が福岡市内の自宅への帰りに飛んできた風船を目撃したものだという．周船寺は 39 km 地点になるので，この風船の平均水平速度は 4.6 m s^{-1} となる．したがって，この風船はそれほど高い上空まで上がらず，比較的低空を飛んだものと考えられる．

第２回目の風船プロジェクトは 2013 年 4 月 14 日に行われ，放球時刻は同じく 14 時である．この回から使われる風船は「固い」材質のものに変わった．形状も円盤状である．

この日の上空の風は図 1 (b)に示しているように陰影は薄くなっており，冬と比べると西風はかなり弱い．上空 5 km では 25 m s^{-1} 程度と，冬の約半分である．したがってまた鉛直シアーもそれほど強くない．一方，南北風は，高度 5～6 km の 134°E（東経 134 度）以西を除いて一般に南風である．

シミュレーションの拘束条件となり得る最初の発見報告は，3 時間後の 210 km の地点（山口県熊毛郡田布施町波野）からのものである．発見された時刻と風船の到達時刻が同じであるとすると，風船の平均水平速度は 19 m s^{-1} となる．

４　放射性微粒子と風船の飛行シミュレーション

４回の風船プロジェクトにおいて飛ばされた風船と放射性微粒子の飛行シミュレーションを比較してみよう．原発事故により放出される放射性微粒子は，その爆発の規模によりさまざまな高度まで噴き上げられる．2011 年 3 月 14 日の 3 号機の爆発と同程度の爆発規模であれば 500m まで噴き上げられると考えてよい．また，1986 年 4 月 25 日のチェルノブイリでの最初の爆発と同程度の爆発規模であれば数千メートルまで噴き上げられると考えられる．ここで，これらの２つの爆発規模を想定して，玄海原発サイトから爆発により 500 m と 3000m まで噴き上げられた粒径 2 μm と 20 μm の放射性微粒子，および同じサイトの地表面から飛ばされた風船の飛行シミュレーションを行うことにしよう．Kaneyasu 等[9]あるいは大原等[10]によると，放射性セシウムの粒径は大部分が 2 μm 以下あるいは 2~3 μm に極大があると報告されているので，20 μm は明らかに大きすぎるが，比較のためシミュレートしたものである．

時間とともに微粒子と風船の位置がどのように変化するかを式で書くと，以下のようになる．いずれも速度を時間 t で積分すれば距離となることを使っている．まず微粒子であるが，初期時刻を 0 とすると，

$$\boldsymbol{X}(T) = \int_0^T \left\{ \boldsymbol{V}(\boldsymbol{X}(t)) - w_r \boldsymbol{k} \right\} dt + \boldsymbol{X}_0 \tag{4}$$

となる．ここで T は任意の時刻，$\boldsymbol{X}$ が 3 次元空間の位置ベクトル，$\boldsymbol{V}$ は 3 次元の風ベクトル(水平風+鉛直流)，w_r は放射性微粒子の終速度，$\boldsymbol{k}$ は鉛直方向の単位ベクトル，$\boldsymbol{X}_0$ は微粒子の初期位置である．要するに風によって流されながら w_r で落ちていく粒子の動きを求めている．$\boldsymbol{X}_0$ のうち水平位置($\boldsymbol{x}_0$)は原発の位置，高さ方向は浮力を失った位置(z_p) であり，ここでは z_p = 500 m (または 3000 m)とする（正確には 500 m (または 3000 m) + その場所の標高 z_0 としている）．

次に風船であるが，こちらは高度と水平位置を分けるほうがわかりやすい．

$$z(T) = \int_0^T w_b(z) dt + z_0, \tag{5}$$

$$\boldsymbol{x}(T) = \int_0^T \boldsymbol{\upsilon}(\boldsymbol{x}(t), z(t)) dt + \boldsymbol{x}_0 \tag{6}$$

となる．z は高度，$\boldsymbol{x}$ は水平位置を表すベクトル，w_b は風船の上昇速度，$\boldsymbol{\upsilon}$は水平風ベクトルである．(5)では，積乱雲域を除くと $w_b >> |w|$ (w は鉛直流の速度) なので，それを用いている．

このように方程式が書けるので，風の 3 次元データがあれば風船と微粒子の飛行シミュレーションが可能となる[11]．風の 3 次元データとしては，気象庁気候データ同化システム(JCDAS) による客観解析データを用いた．客観解析とは，不規則に分布した観測データから規則的な格子点での大気の状態を与える過程を言い，本データの解像度は緯度・経度とも 1.25°（緯度 1.25°は約 139 km になる）である[12]．詳しい計算方法は少し専門的になるので省略するが，興味のある方

は文献[2]に書かれているので参照していただきたい．

風船の飛行シミュレーションにおける大きな問題はその上昇速度をどのように設定するかである．風船の上昇速度は，風船が球形と見なされる場合，純浮力と自重の関数である半経験的な式がある．しかし球形の風船を用いた第 1 回目には事前に浮力等の測定を行っていない．第 2 回目は「固い」風船なので浮力は決まっているが，形が円盤状なので式に当てはめるわけにはいかない．したがってどちらとも推測によらざるを得ない．まず，具体的な上昇速度は風船ごとに異なるもののそれほど大きなばらつきはないものと仮定した．

さらに，風船の発見場所と時刻が強い拘束条件となるので，さまざまな上昇速度を与えたシミュレーション結果と照らし合わせて，それらにうまく合うような上昇速度が実際の上昇速度であるとした．第 1 回目のプロジェクトにおける風船は，すでに述べたように，ゴム風船に似た膨らみ方をするものであったので，上昇速度は高度によらず一定とした．いくつかの上昇速度を与えたシミュレーションの結果，$w_b = 0.8$ m s^{-1} が最も良い結果を与えた．

第 2 回目と第 3 回目の風船は,「固い」材質の円盤状のものであった．製造元に問い合わせたところ,「固い」とは言ってもある程度は気圧低下にともなって膨らむとのことであったので，次のような上昇速度を仮定した．

$$w_b(z) = w_0 \exp\left(-\frac{z}{h_0}\right) \tag{7}$$

風船の平均的な浮力や自重，形状を考慮したうえで，シミュレーション結果を踏まえ, 最終的には, 第 2 回目と第 3 回目は w_0 =0.70 m s^{-1}, h_0 = 7000 m とした[13]. 第 2 回目, 第 3 回目とは異なる紙による風船を使った第 4 回目は, (7)式で w_0 =0.50 m s^{-1}，h_0 = 4000 m とした．上昇速度が十分小さくなると，鉛直流の効果が効いてくるが，それは無視している．

４－１　第１回風船プロジェクトの飛行シミュレーション

実際に風船と放射性微粒子の飛行をシミュレートした結果を見てみよう．図 2 と図 3 は，2012 年 12 月 8 日 14 時に放球された第 1 回風船プロジェクトの風船と初期高度 500 m の放射性微粒子を 6 時間後までシミュレートした結果で，図 2 が水平位置，図 3 が経度・高度位置を示している．

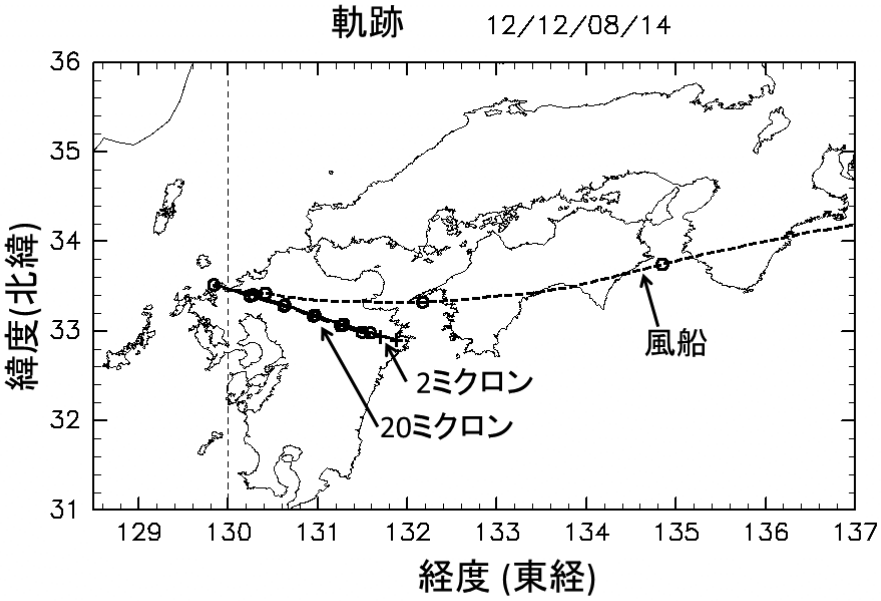


図２　2012 年 12 月 8 日における風船と放射性微粒子の飛行のシミュレーション結果．水平位置を示す．点線は風船，実線(粒径 2 ミクロン)と破線(粒径 20 ミクロン)は初期高度 500 m に置いた放射性微粒子の位置を示す．丸印は 1 時間ごとの位置を示し，+ 印は 6 時間後の位置を示す．風船は 4 時間後以前にこの図の範囲から外へ出ている．

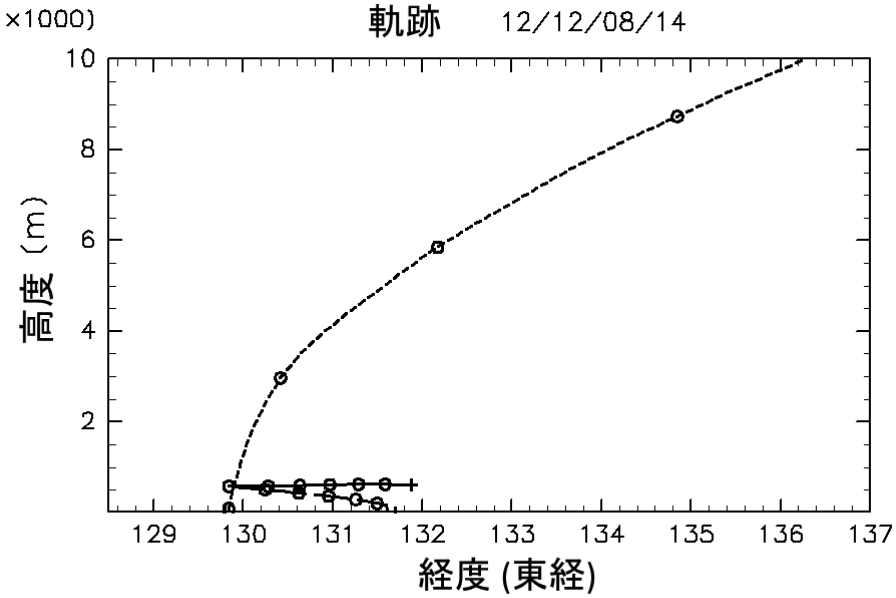


図３　風船と放射性微粒子の飛行のシミュレーション結果．図 2 と同じで，経度・鉛直断面を示す．

東に進みながら，最初は少し南へ，後に北へ動いていくが，当然ながら図 1 の風と整合的である．高知市まで約 2 時間半で飛ぶという拘束条件もうまく満たしていることがわかる．また他の発見場所とも齟齬はなく，全体として風船の飛行シミュレーションはうまくいっていると言える．20 μm の放射性微粒子のほうは下降傾向が見られ，5 時間過ぎに乾性沈着している．一方，2 μm のものはほぼ大気の運動に追随して，ほぼ水平に移動している．2 μm の粒子の 1 時間あたりの落下速度が 1 m 以下であるので（表 1 参照），飛行域周辺で鉛直流が弱かったことを反映している．

風船と放射性微粒子の位置関係を見てみよう．図からすぐにわかることは，両者はかなり異なった運動をするということである．特に高度の違いと時間ごとの位置の違いは顕著である。飛行方向は比較的合っているように見えるが，これはどこの高度でも西風が卓越しているためである（図 1 (a)）．

風向が高度によって違えば，飛行方向も大きく食い違ってくる．ここでは示していないが，風船はどこかで破裂して下に落ちてくる．しかし，2 μm の放射性微粒子は 6 時間後までにはなお 500 m の上空に位置しているので，少なくとも雨が降っていなければ，地表には落ちてこないこともわかる．放射性微粒子は 6 時間後でも九州の上空から抜け出ていない．

図 4 と図 5 は, 第 1 回風船プロジェクトの風船と初期高度 3000 m の放射性微粒子を 6 時間後までシミュレートした結果で，図 4 が水平位置，図 5 が経度・高度位置を示している．風船の飛行軌跡は図 2，図 3 とまったく同じである．3000 m 上空では，図 1 に見られるように西風は約 40 m s^{-1} と比較的強いため，放射性微粒子の飛行軌跡の水平位置は風船のそれにより近くなっている．九州内ではほぼ重なっている．また，6 時間後には紀伊半島の南方海上にまで達している．

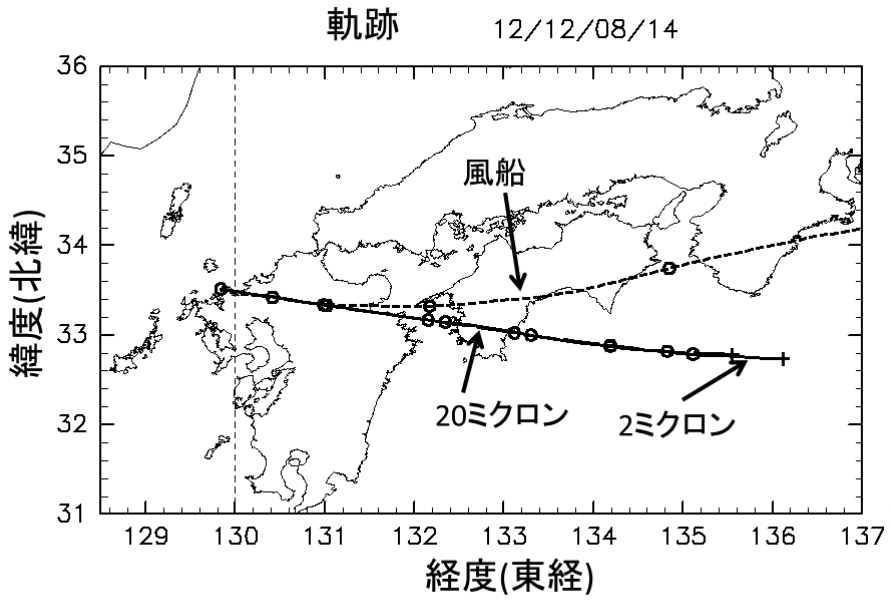


図４　放射性微粒子の初期高度が 3000 m であること以外は図 2 と同じ.

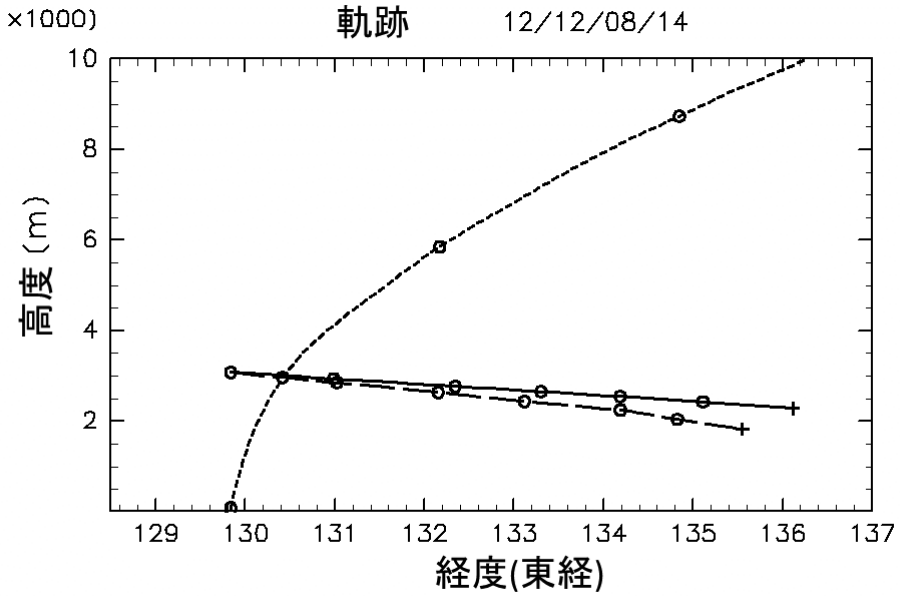


図５　放射性微粒子の初期高度が 3000 m であること以外は図 3 と同じ.

４−２　第 2 回風船プロジェクトの飛行シミュレーション

図 6 と図 7 は，2013 年 4 月 14 日 14 時に放球された風船と初期高度 500m の放射性微粒子を 6 時間後までシミュレートした結果である。第 1 回目との大きな違いは風船が高高度にまで到達せず，8000 m 程度で頭打ちになっていることである．このように風船の違いによる上昇過程の違いは大きい．

今回は東に進みながら，ほぼ北へ動くという飛行ルートをとっているが，南風が卓越していたことに因っている．風船は瀬戸内海に出たあたりから少し南へ行く．これは高度 5〜6 km の北風（図 1(b)参照）に乗ったためである．田布施町まで約 3 時間という拘束条件もうまく満たしており，他の発見場所もほぼ飛行ルートに乗っている．2 μm の放射性微粒子は上昇傾向を示し，20 μm の放射性微粒子は若干下降しているが，6 時間後まで上空にとどまっている．今回は飛行域周辺が上昇流であったためである．

このシミュレーションにおける風船と放射性微粒子の位置関係を見ると，2 時間までは両者はかなりよく似ているが，それ以降は少し離れている．これは 500 m 付近の低空では 10 m s^{-1} の南風があるのに対して，6〜8 km の高さでは南方からの風はほぼゼロになっていることによる（図 1 (b)参照）．

図 8 と図 9 は，第 2 回風船プロジェクトの風船と初期高度 3000 m の放射性微粒子を 6 時間後までシミュレートした結果で，図 8 が水平位置，図 9 が経度・高度位置を示している．風船の飛行軌跡は図 6，図 7 とまったく同じである．

風船と放射性微粒子の飛行軌跡の水平位置はほぼ重なっている．これは，先ほど指摘した 500 m 付近の低空での南風の影響をどちらも受けず，3000〜6000 m あたりの鉛直シアー（上下の風速差）が小さい（図 1(b)参照）ことに起因している．

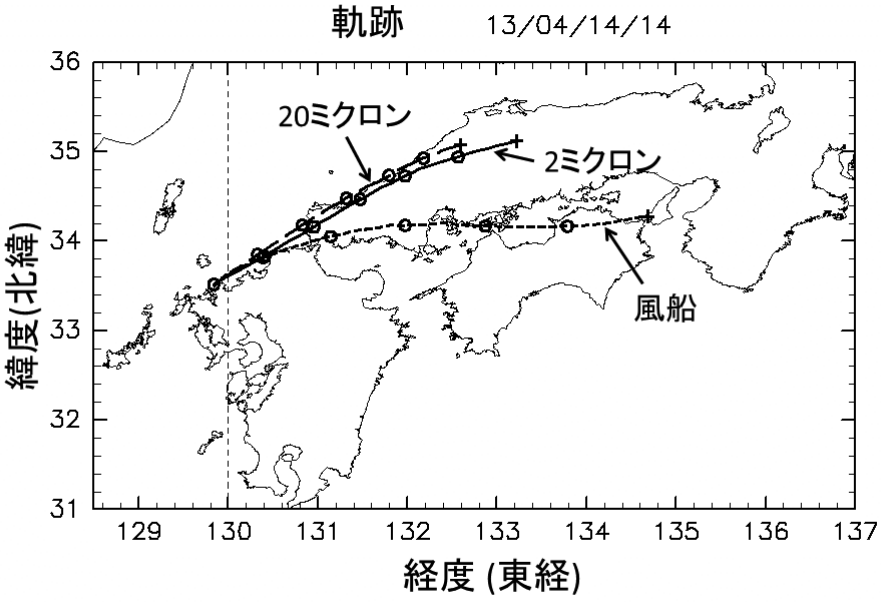


図６ 2013 年 4 月 14 日であること以外は図 2 と同じ

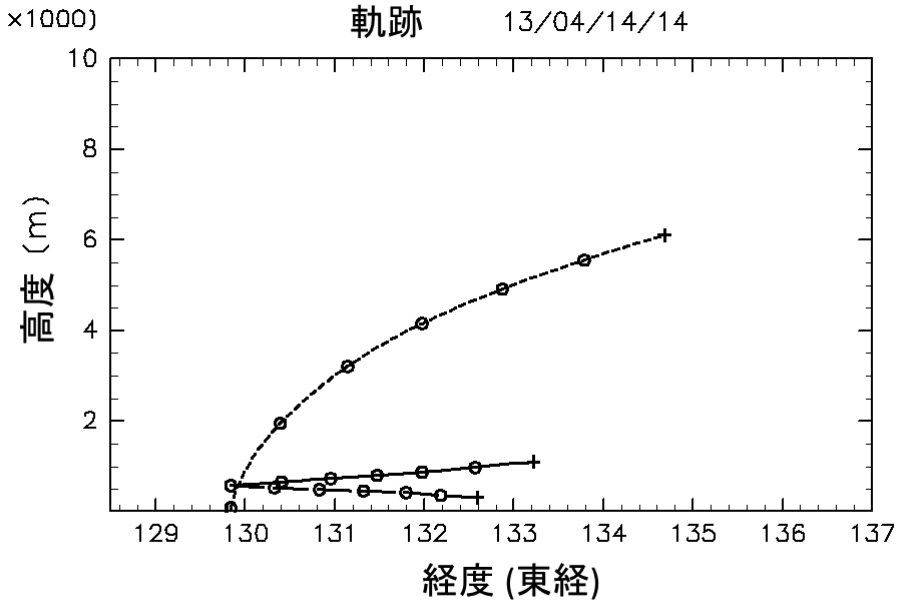


図７ 2013 年 4 月 14 日であること以外は図 3 と同じ

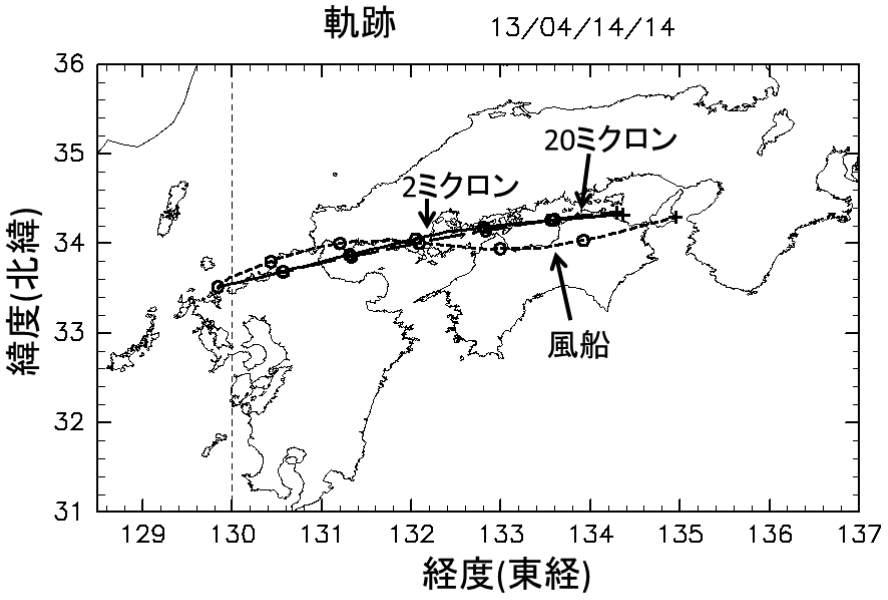


図８　放射性微粒子の初期高度が 3000 m であること以外は図６と同じ

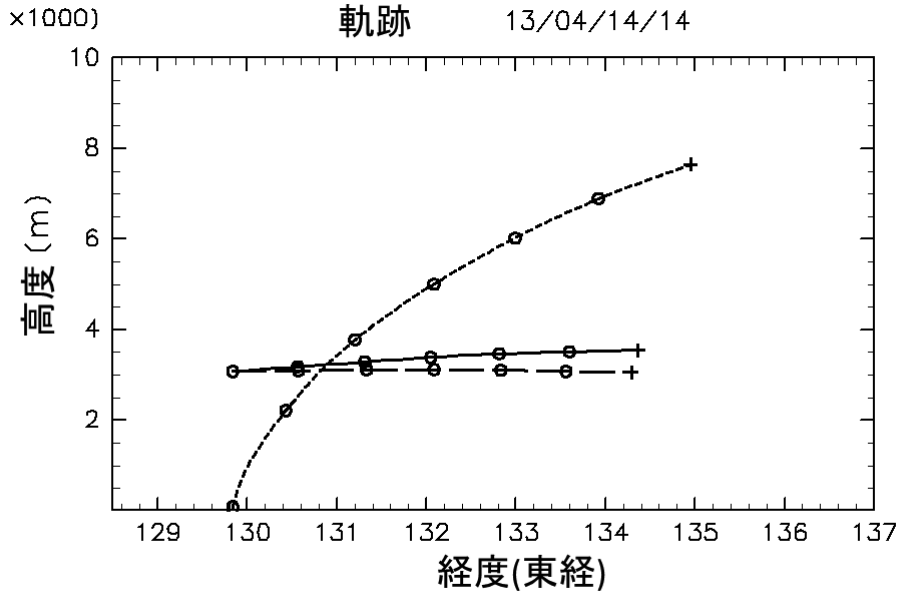


図９　放射性微粒子の初期高度が 3000 m であること以外は図７と同じ

４−３　第 3 回風船プロジェクトの飛行シミュレーション

図 10 と図 11 は，2013 年 7 月 28 日 14 時に放球された風船と初期高度 500m の放射性微粒子を 6 時間後までシミュレートした結果である．第 2 回目と同じ風船を使っている．風船の飛行軌跡は福岡県豊前市や大分県中津市の上空を通っている．第３回風船プロジェクトの発見情報はそれらの市からのものが多く，シミュレーションはうまくいっているといえる．1 時間後には 2000 m にまで上昇した風船は，西風に乗って東の方向に流れている．一方，放射性微粒子は，当日の風の高度・経度分布（図 1(c)参照）からわかるように，東経 130〜131 度の高度 500 m 以下の領域では南西からの風に乗り，北東の方向に流れている．これまでの第 1 回目，第 2 回目のシミュレーションとは異なり，初期高度 500m の放射性微粒子と風船の飛行軌跡はまったく異なっているといえる．6 時間後には，2 μm の放射性微粒子は萩市沖の日本海上空にあり, 風船は佐賀関半島の約 8 km の上空にある．

図 12 と図 13 は, 第 3 回風船プロジェクトの風船と初期高度 3000 m の放射性微粒子を 6 時間後までシミュレートした結果で，図 12 が水平位置，図 13 が経度・高度位置を示している．風船の飛行軌跡は図 10，図 11 とまったく同じである．

初期高度 3000 m 放射性微粒子の飛行軌跡の水平位置は風船のそれとほぼ重なっている．これは，低空領域の南西風の影響をどちらも受けず，3000〜6000 m 付近の鉛直シアーが小さい（図 1(c)参照）ことに起因している．

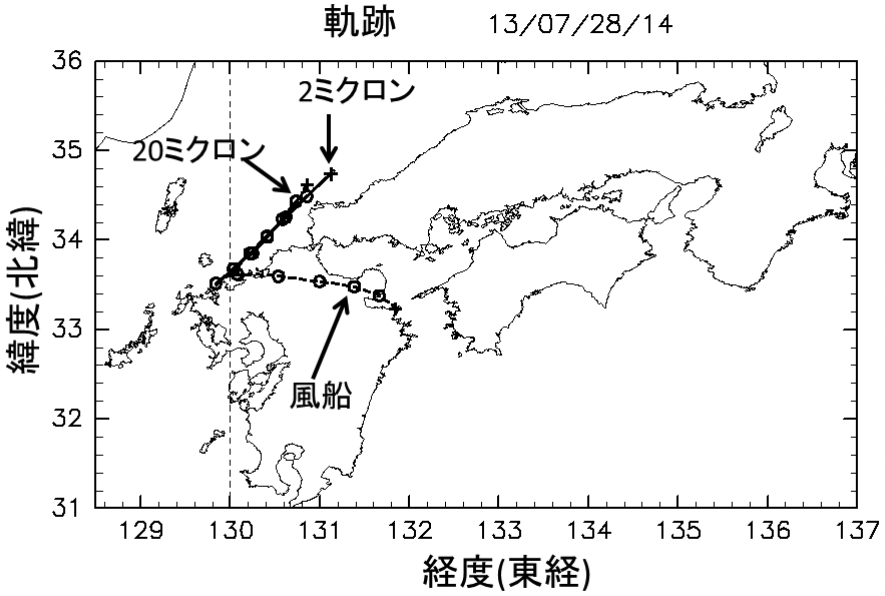


図１０　2013 年 7 月 28 日であること以外は図 2 と同じ

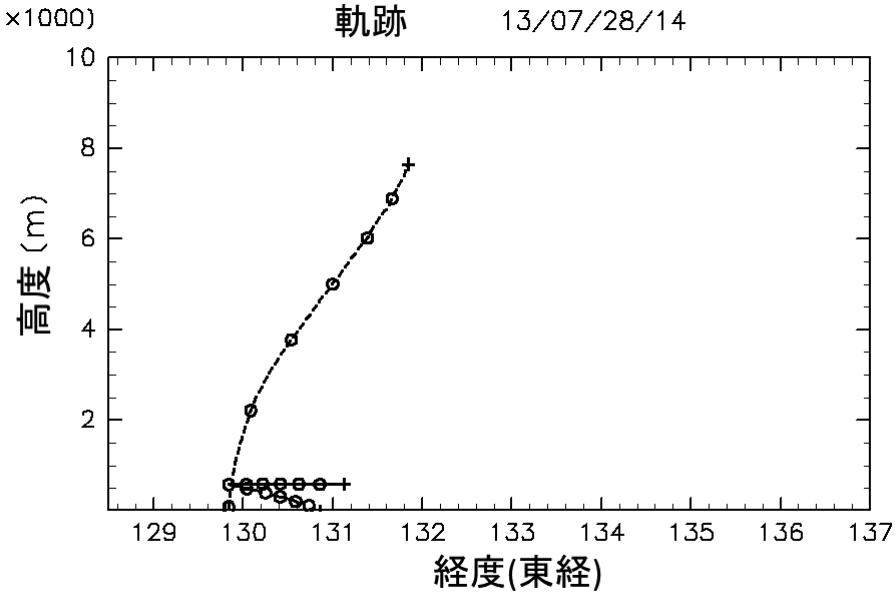


図１１　2013 年 7 月 28 日であること以外は図 3 と同じ

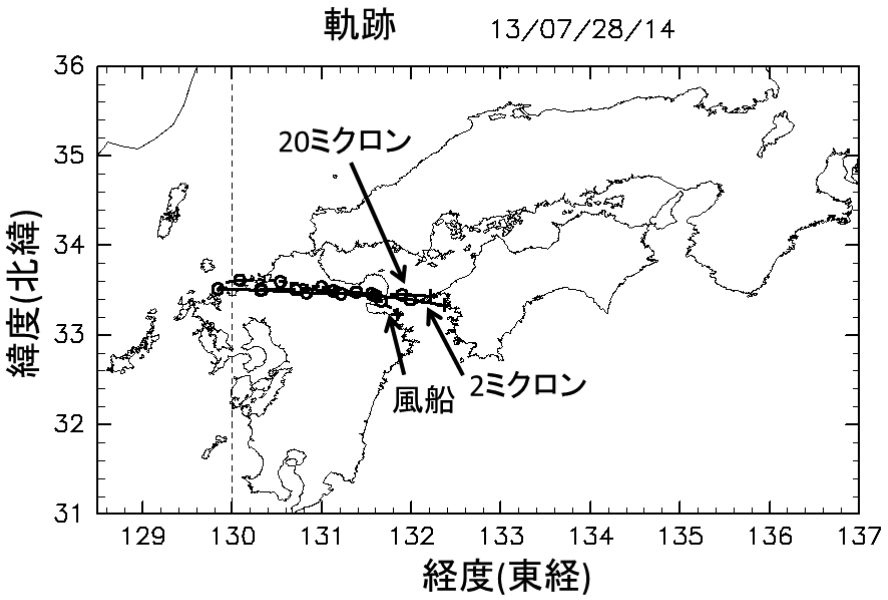


図１２　放射性微粒子の初期高度が 3000 m であること以外は図１０と同じ

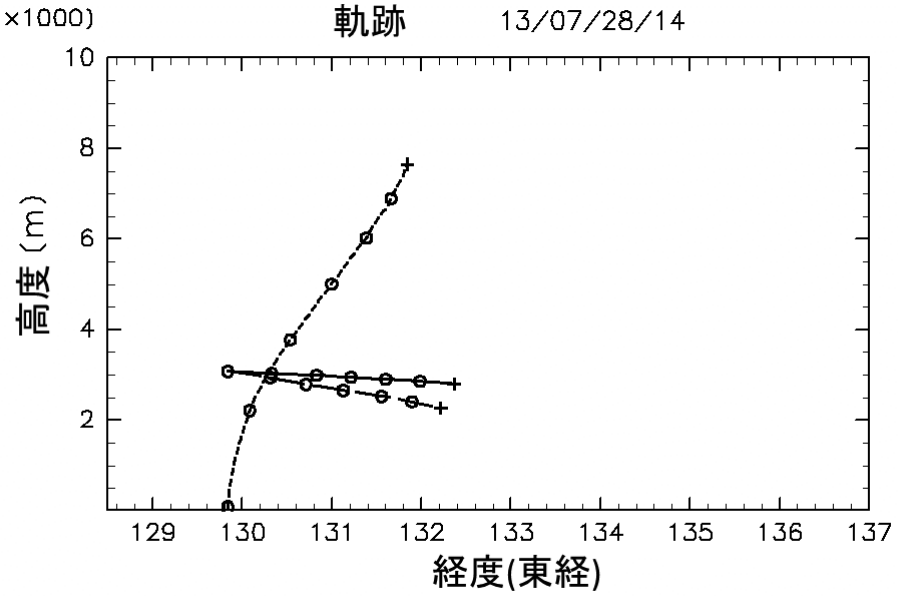


図１３　放射性微粒子の初期高度が 3000 m であること以外は図１１と同じ

４−４　第 4 回風船プロジェクトの飛行シミュレーション

図 14 と図 15 は, 2013 年 10 月 27 日 14 時に放球された風船と初期高度 500m の放射性微粒子を 6 時間後までシミュレートした結果である。この日の風船は前２回とはまた異なる和紙を使ったエコ風船である．放球地点では無風で風船はしばらくほぼ垂直に上昇した．そのことが当日の風データの図 1(d)でも読み取れる．しかし，風船は上昇するに従い，はじめは北西の風に影響され佐賀県南部を通過し，さらに高度を上げると優位となる西風の影響を受けて東の方に流れて，6 時間後には，阿蘇山の上空にまで流されている．この飛行軌跡は，第 4 回風船プロジェクトの発見情報の多くが佐賀県や熊本県からのものであったことと整合的である．一方， 500m にあった 2 μm の放射性微粒子は，ほぼそこに留まったままであり，20 μm の放射性微粒子は 6 時間後に地上に落下している．

図 16 と図 17 は，第 4 回風船プロジェクトにおける，初期高度 3000 m の放射性微粒子を 6 時間後までシミュレートした結果を風船と比較したもので, 図 16 が水平位置，図 17 が経度・高度位置を示している．風船の飛行軌跡は図 14，図 15 とまったく同じである．

初期高度 3000 m にあった 2 μm の放射性微粒子の飛行軌跡の水平位置は，5 時間後まで風船のそれとほぼ重なっている．しかし，風船はその後さらに上昇して西風の影響を強く受けるのに対して，放射性微粒子の方は落下するに従って西風の影響が弱くなり，北よりの風に流されて南の方向に流されていく．落下速度の速い 20 μm の放射性微粒子の方が，風船の飛行軌跡から速く離れることになっている．

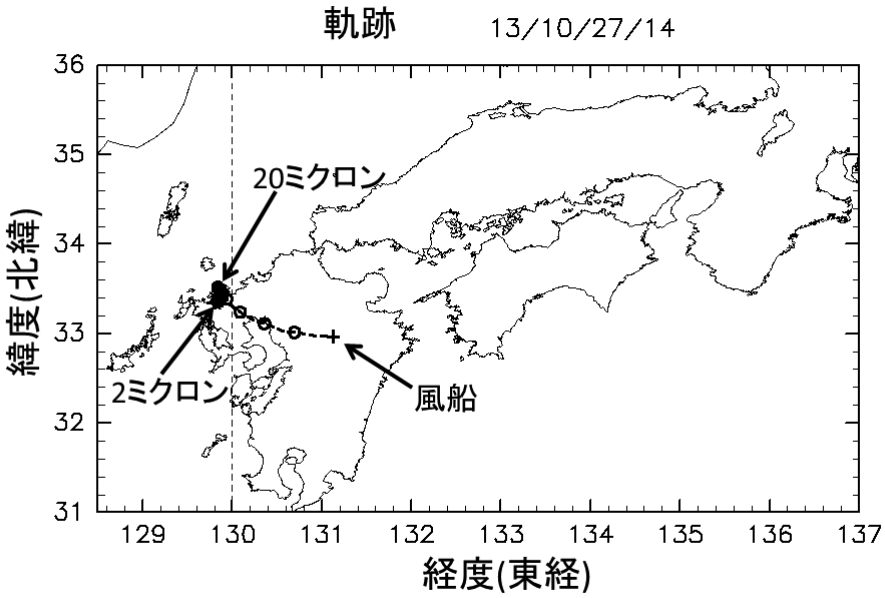


図１４　2013 年 10 月 27 日であること以外は図 2 と同じ

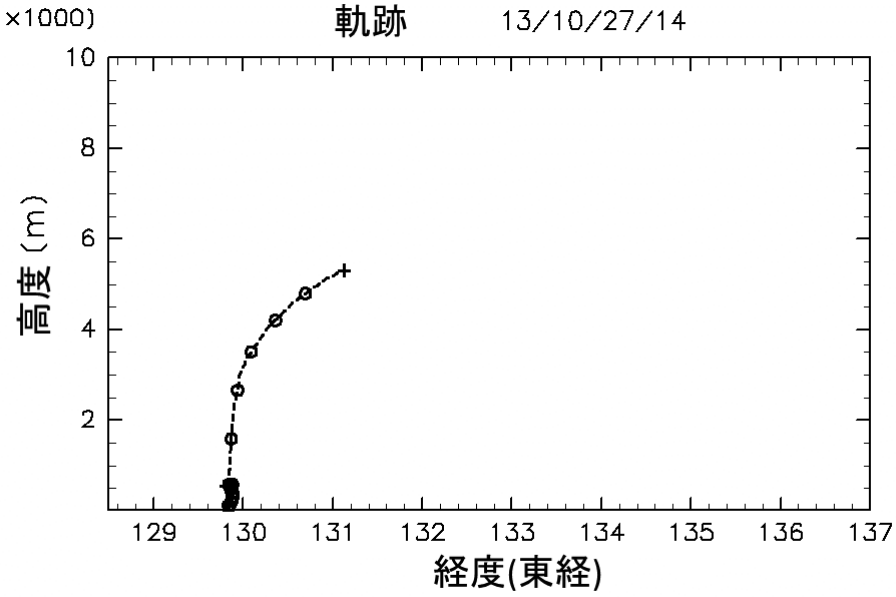


図１５　2013 年 10 月 27 日であること以外は図 3 と同じ

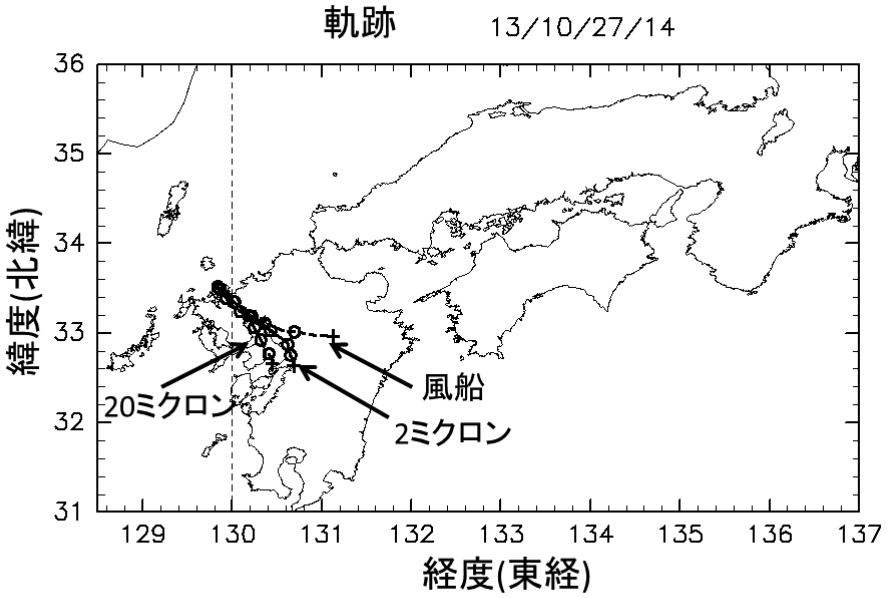


図１６　放射性微粒子の初期高度が 3000 m であること以外は図１４と同じ

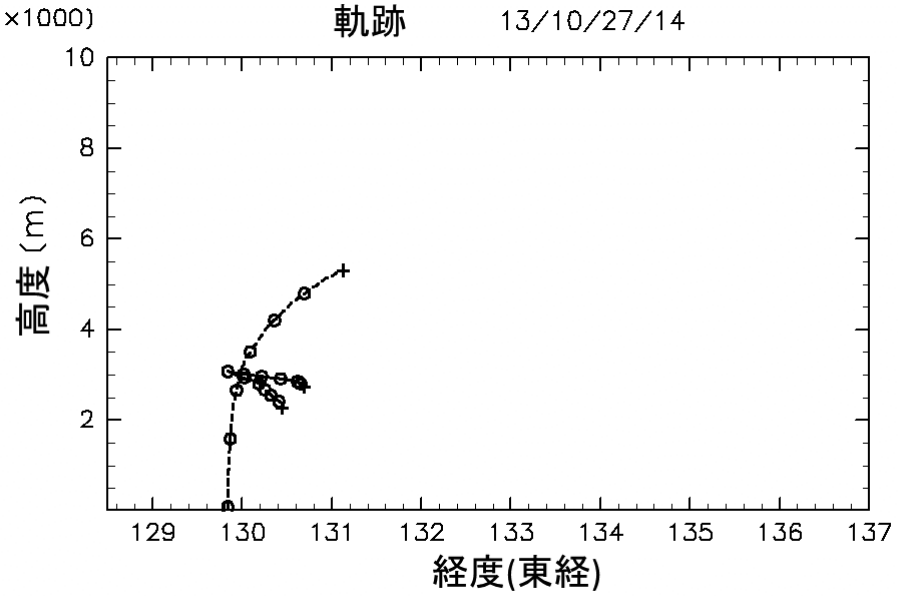


図１７　放射性微粒子の初期高度が 3000 m であること以外は図１５と同じ

４−５　飛行シミュレーションのまとめ

４回の風船プロジェクトの風船の軌跡と初期高度500 mおよび3000 mの放射性微粒子(粒径2 μmおよび20 μm)の軌跡を飛行シミュレーションにより比較した．初期高度 500 m は 2011 年 3 月 14 日の 3 号機の爆発と同程度の爆発規模，また，初期高度3000 mは1986年4月25日のチェルノブイリでの最初の爆発と同程度の爆発規模を想定した放射性微粒子の初期位置として考慮したものである．これら計８回の飛行シミュレーション比較において明らかになった点を以下にまとめてみよう．

（１）まず，風船プロジェクトにおいて発見情報のあった場所と風船の水平の飛行軌跡はきわめて高い整合性を示した．このことは，今回の飛行シミュレーションが精度の高いものであることを保証している．

（２）風船と放射性微粒子の飛行軌跡を比較すると，風船と放射性微粒子の鉛直方向の運動はまったく異なる．風船はひたすら上昇を続けるが，爆発により噴き上げられた放射性微粒子は，上昇気流がなければ落下するのみである．粒径 2 μm の微粒子は 1 時間で約 1 m しか落下しないので，長時間にわたって初期高度を保つことになる．一方，粒径 20 μm の微粒子は，6 時間で 500 m ほど落下するので，初期高度 500 m のものは 6 時間程度で乾性沈着することになる．2 μm の微粒子は，湿性沈着を考えなければ，6 時間程度では地面に落下することはない．

（３）水平方向の運動については，多くの場合，風船と放射性微粒子は類似の運動を行う．特に，初期高度 3000 m の放射性微粒子の飛行軌跡は，４回のすべての飛行シミュレーションで風船の飛行軌跡とよく似た軌跡を示した．この結果は，放射性微粒子の高度が高いために，風船と放射性微粒子に影響をあたえる風が似通っていることによる．

（４）それに比べて，初期高度 500 m の放射性微粒子の水平方向の飛行軌跡が風船の飛行軌跡と似た軌跡を示したのは，４回の飛行シミュレーションのうち２回のみであった（第１回目と第２回目）．第３回目では，6 時間後に，2 μm の放射性微粒子は萩市沖の日本海上空にあり，風船は佐賀関半島の約 8 km の上空にあった．また，第４回目では，放射性微粒子の水平位置は初期位置に留まったままであるが，一方，6 時間後には，大分市の約 20 km 南方上空（あるいは久住山の上空）にまで流されている．

（５）以上から言えることは，原発事故の爆発威力が増せば増すほど，その時に放出される放射性微粒子の飛行軌跡は，風船の飛行軌跡と似た振る舞いをするということである．この点は，風船プロジェクトの意義を考えるうえで重要なことである．

５　拡散について

静止した無色の水に着色した水を滴下すると，着色した水は広がっていく．このように外からみてまったく運動がないときにも物質は広がっていく．この物質が広がっていく現象を拡散という．見方を変えれば，初めはあるところでは濃かった濃度も拡散により次第に薄くなっていく．この場合は，不規則な分子運動によって拡散が担われているので，分子拡散とよばれる．大気中では，分子運動による拡散は弱いので無視でき，もっと強い乱れた流れによる拡散が見られる．煙が空気中に広がる様子が日常的に見られるのがその例である．これは乱流拡散と呼ばれている．

放射性微粒子は乱流拡散の影響により同じ場所に放出された微粒子もどんどん周りに広がっていくことになる．風によって流されながら（これを移流という），乱流によって広く拡散される．これを併せて移流拡散と呼ぶが，これが放射性微粒子の真の運動の仕方である．

初期にはどんなに濃度の高かった放射性物質も時間とともにどんどん拡散し，濃度は薄くなっていく．上の放射性微粒子の水平方向の運動の説明はこのうち移流についてだけ説明していることになる．実際には，拡散もあることに注意が必要である．

６　おわりに

最後に注意すべきことを数点述べて, 風船プロジェクトの意義を考えてみたい.

まず 1 点目は，原発の爆発により最も強く放射能に汚染されるのは，原発サイトの近くである．福島原発事故によって汚染された原発サイト周辺は，今でも放射線量が高くて住むことはできない．この点は風船プロジェクトでは，可視化することができない．ただこのことは誰でもよく知っていることであり，風船プロジェクトの狙いでもない.

2 点目は, 4 節で述べたように, 飛行シミュレーションでは拡散を考慮していないという点である．したがって，飛行シミュレーションで直線として表されている 1 個の風船や 1 個の放射性微粒子の飛行軌跡は，拡散を考えてある程度の幅をもたせたものとして考えるべきである.

この点を考慮すれば，3 節で示した放射性微粒子と風船の飛行シミュレーションの水平方向の軌跡は，第３回目と第４回目の初期位置 500 m の例外的な場合を除いて，おおむね重なりがあると言って間違いではないように思える.

3 点目は，私たちは放射性微粒子の放出形態をあらかじめ知ることは出来ないということである．原発事故から放出される放射性微粒子がどの高度まで上昇するかは，爆発威力によって異なる．大規模な水蒸気爆発が起これば，放射性微粒子は数千メートルまで噴き上げられるであろうが，爆発がそれほど威力のあるものでなければ，放射性微粒子の上昇は数百メートルであるかも知れない．したがって, 第３回目と第４回目の初期位置 500 m の例外的な場合があるからといって, 風船プロジェクトの意義を軽く見ることはできない．風船プロジェクトの重要な意義は，原発事故に際して，事と次第によっては，風船の落下した地点にまで放射性微粒子が降りてくる可能性がありますよ，という注意を一般の人々に喚起することにある．今回の飛行シミュレーションの結果はこの点を明確にした.

4 点目は，風船の飛行シミュレーションの鉛直方向の動きもさまざまな実際の風船の動きの多様性を表現し切れていない点である.

現に，第 1 回目の風船プロジェクトで最初に風船が発見されたのは，原発サイトから約 40 km の地点である．この風船は，飛行シミュレーションからは説明できない．ヘリウムガスの脱け出しにより他の風船に比べて急速に浮力を失ったものと考えられる.

原発事故により環境中に放出された放射性微粒子は，湿性沈着により地面に落下することがある．チェルノブイリでも福島でも，高線量に放射能汚染された地域は，このような湿性沈着により作られたことが知られている.

風船プロジェクトにおいて，さまざまなところに落ちて報告された風船は，このように湿性沈着により地面に降り注いだ放射性微粒子に対応していると考えて大きな間違いはないだろう．われわれは，これらのことが目に見えない放射性微粒子の動きを目に見えるようにする試みとしての風船プロジェクトに大きな意義を与えていると考える.

しかし同時に，風船プロジェクトでは可視化できない点があることを忘れてはいけない．

謝辞

本論文におけるシミュレーションと図の作成は，伊藤久徳 九州大学名誉教授（専門：気象学）によってなされたものである．本論文は，事情により単名で出すことになった．本論文に対する伊藤久徳氏の多大な寄与に対しての深い謝意を表明します．

注および引用文献（HP の最終閲覧日：2018 年 1 月 30 日）

[1] 以下の「風船プロジェクト」ホームページを参照．
http://genkai-balloonpro.jimdo.com/

[2] 三好永作，伊藤久徳，日本の科学者，**49**, 108-114 (2014).

[3] 国会 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会（国会事故調）の報告書, p.167 (2012).
http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3856371/naiic.go.jp/

[4] コリウム・コンクリート反応とは，溶融した炉心がコンクリートに接触することによって大量の水素や二酸化炭素, 一酸化炭素などが発生することをいう．詳しくは以下を参照のこと. 岡本良治, 中西正之, 三好永作, 科学 **84**, 355 (2014).

[5] J. Rudykiewicz, Tellus, **40B**, 241 (1988). J. Rudykiewicz, Tellus, **41B**, 391 (1989).

[6] H. Hass, M. Memmesheimer, H. Geiss, H. J. Jakobs, M. Laube, A. Ebel, Atmos. Environ., **24**, 673 (1990).

[7] 中原純，岡本良治，森茂康，日本の科学者，**21**, 698 (1986).

[8] JAEA 公開ワークショップ「福島第一原子力発電所事故による環境放出と拡散プロセスの再構築」(平成 24 年 3 月 6 日)．以下のホームページを参照．
http://nsed.jaea.go.jp/ers/environment/envs/FukushimaWS/

[9] N. Kaneyasu, H. Ohashi, F. Suzuki, T. Okuda, F. Ikemori, Environ. Sci. Technol., **46**, 5720 (2012).

[10] 大原利眞，森野悠，田中敦，保健医療科学，**60**, 292 (2011).

[11] 実際には雨や雪の影響を考慮に入れないといけないが，それは無視している．

[12] 緯度方向には Gauss 緯度というものを用いているので，正確には約 1.25 °と言ったほうがよい．

[13] ここでは，第２回目と第３回目風船プロジェクトにおいて発見された風船のデータを基にパラメータを決めたために，風船の飛行軌跡が第２回目風船プロジェクトのみの風船のデータを基にパラメータを決めた文献[2]とはパラメータも結果の飛行軌跡も若干異なっている．

【著者のプロフィール】

三好　永作（みよし　えいさく）

1946 年愛媛県生まれ．北海道大学理学部卒業．理学博士（北海道大学）．2010 年，九州大学退職．九州大学名誉教授．現在，福岡核問題研究会世話人．共著，「原発事故緊急対策マニュアル」（合同出版，2011 年）など．専門：理論化学．

2018 年 1 月 31 日
日本科学者会議 JSA e マガジン編集委員会
The Japan Scientists' Association (JSA)