

UNSCEAR2020/2021 の Cs137 過小評価の原因

放射性プルーム中の大気中浮遊粒子(SPM)が濾紙に到達する以前に排除される主原

因はサイクロン効果であり、「霧箱効果」はあり得るが主たる効果ではない

矢ヶ崎克馬

(概要)

湿った空气中での放射性微粒子は、放射性微粒子単独で存在せず、ベータ線放出により荷電するために、電気力により周囲に水分子を凝縮させる。放射性微粒子を核とした水滴（放射性水滴）の粒径は湿度に依存し湿度が高いほど大きくなる。湿度に応じ粒径 $10 \mu\text{m}$ 程度の霧滴から粒径 1mm 程度の雨滴まで成長する。SPM 測定装置は $10 \mu\text{m}$ 以上の粒径を持つ浮遊物を排除するために大気導入口にサイクロンを設置するので、放射性水滴の大部分はこれにより排除される。黒川氏の提唱する「霧箱効果」は単独で存在する放射性微粒子を前提とするものでそれ自体湿った大気中では物理的に存在しない。放射性水滴による「霧箱効果」はあり得るが、吸引（空気の断熱膨張）により飽和水蒸気圧が低下し、粒径が $10 \mu\text{m}$ 以下の状態から粒径が $10 \mu\text{m}$ 以上に成長するものであり、あり得る現象ではあるが主たる効果ではない。

経緯

被曝・診療月報 66 号に黒川真一氏の論考が掲載されていました。

『(特集) なぜ UNSCEAR2020/2021 報告におけるヨウ素 131 の線量は大幅に過小評価されるのか：霧箱効果仮説について V3plus』です。

子ども甲状腺がん裁判における「黒川第 5 意見書」も参考にしました。

前回、「霧箱効果」のみに限定して考察をお伝えしましたが今回は全容について考察いたします。この考察のきっかけを提供して下さった黒川氏に篤く御礼申し上げます。

SPM 局の資料収拾システムには、サイクロンが使用されていますので、サイクロンを含めた試料収集システムの全容を理解する必要があります。今回は SPM 試料収集システム全容を理解することに努めます。黒川氏が提供してくださった放射性プルーム到着前後の諸測定記録の解明を行い、放射性降雨、濾紙に付着する物質量測定のためのベータ線遮蔽効果を利用した計測システムによるベータ線放出体 (Cs137) の計測の問題点、自然降雨の SPM 除去があるかないか、猛烈に強い放射能プルームが、非放射性 SPM をも放射性水滴に取り込む可能性などを考察しました（その結論は、あくまで可能性の追求であり、仮説の域をでないものがあります）。

一般論

放出された放射性物質の物理的形態は直径数 μm 程度 ($1 \mu\text{m}$ 程度と表記する) の放射性微粒子が圧倒的です。この大きさの微粒子は静止空間では毎秒 0.1mm 程度の等速落下をします（粘性抵抗による。運動はストークスの法則として理解される）。

まず β 線放出が主である放射性微粒子と水分子との相互作用を論じます。

主として生じる β 崩壊により放射性微粒子は正電荷を帯び、電気力学の引力で、水分子が凝集します。水分子の凝集は水分子の正負の電荷中心が一致しないことによります。

水滴の直径が $100 \mu\text{m}$ 程度以下の時にはその水滴に関する力学は、主として粘性抵抗を受け、毎秒 1mm 程度の落下速度（等速）となります（落下速度は水滴の大きさ（質量）に依存します）。粘性抵抗は速度に比例します。これは目に見えても見えなくとも「霧」の状態です。

しかし、直径が 1mm 程度の水滴（雨滴）は落下速度が大きくなり、空気分子等との弹性衝突をする力学領域となり、弹性抵抗は速度の二乗に比例します。この状態は弹性抵抗が重力と釣り合いで、雨滴が等速で落下し、降雨と呼ばれます。

放射性微粒子の周囲に凝結する水分子の量は湿度に依存し、湿度が高いほどたくさんの水分子が凝結します。また、放射性微粒子のベータ線放射能の強さにも依存します。

湿度が低いと、空気中の水分子の間隔が大きいので、電気力で凝集される範囲には小数の水分子しか無く、凝集する水分子は少ないです。従って微粒子サイズは小さなものです。また、放射性微粒子の放射能が弱いと同様です。

湿度が 100%近くでは単位体積中の水分子が多く、大きなサイズの水滴が生じます。特に放射能が強く、かつ湿度が高いときには、猛烈な短時間で直径が 1mm 程度の雨滴に成長するでしょう。これが放射能降雨の原因です。3月 15 日の降雨は放射能降雨と判断しました（後出）。放射性微粒子の 100%近くが雨に含まれるために SPM システムに吸引されないので、SPM 濾紙に到達する $10 \mu\text{m}$ 以下の粒子は極端に少なくなるのです（サイクロン効果や霧箱効果ではなく放射性降雨の雨滴に含まれてしまうのが原因です）。

SPM での大粒子排除

SPM は粒径が $10 \mu\text{m}$ 以下と定義されているので、サイクロンで $10 \mu\text{m}$ 以上の大粒子を排除します。

- ① (サイクロン効果) 放射性微粒子を核とする水滴は、湿度が高いほど平均の粒径が大きく、サイクロンで排除される割合が大きくなります。
- ② (霧箱効果) それに加えて $10 \mu\text{m}$ 以下のサイズの小さな放射性水滴（放射性微粒子を核とした水滴）はサイクロンへ導入する吸引により、空気温度が断熱的効果により下がり飽和水蒸気圧が下がります。気体でいられなくなり水滴となり、放射性水滴のサイズが大きくなり $10 \mu\text{m}$ 以上となり、排除されるという霧箱のような効果が生じます。この効果による排除対象放射性水滴は少ない割合だと思います。
- ③ 上記 2 つのプロセスが福島県健康調査検討委員会が引用している UNSCEAR2020/2021 のデータが放射能の客観的データとなり得ないことに対する重要な考察です。

黒川氏は SPM 局の試料収集システムの問題点を論じており、着想点は面白いと判断いたしまし

たが、残念ながら、放射性微粒子の単独存在（水分子を凝集しない状態）を前提にしています。放射性微粒子のベータ線放出による水分子凝縮水滴形成で、まずサイクロン効果があり、それに加えて、黒川式ではないが、霧箱効果は実際生じていると判断いたしました。

諸条件での SPM 局の記録の読み解き

(1) 図 3-1

①ヨウ素 131 の大気中濃度が 20000 (Bq/m³) 程度と大量です。降雨があり、降雨の開始および終了が放射性プルームの到来ときちんと同期していることから、降雨は「放射能降雨」と判断いたしました。この場合、放射性微粒子は雨に含まれます。

②3/15~16 は、湿度が 90% 以上なので水分子の凝集作用は急速に進み、放射性微粒子を中心核とした水滴は、雨滴（直径 1mm 程度以上）迄成長し、雨滴は毎秒 1m オーダーで落下すると仮定して妥当だと思います。

この場合大部分の放射性水滴は雨滴サイズまで成長し雨に含まれます。従って初めからサイクロンへは吸入されず、サイクロンに吸収されたとしてもサイクロンに補足されて検出部へは届きません。

もちろんそれ以下のサイズの放射性水滴は存在しますが、霧箱効果で排除される物は少ないと考えられます。濾紙に Cs137 が到着していますので、わずかばかりの 10 μm 以下の放射性水滴は届いていることが分かります。

③しかし SPM 記録は、この到達している放射性水滴を記録せず、プルーム到来まで届いていた SPM 迄が記録されない「ゼロ」の記録状態となっております。

雨により SPM がたたき落とされたのか？しかし図 3-3 では降雨にも拘わらず、SPM 局の記録は降雨「あり」と「無し」とでの記録上の変化はありません。この場合の降雨は自然降雨であり、降雨は SPM には作用していないようです。

ここで問題は<1>何故非放射性 SPM が記録から排除されたか？<2>何故 Cs137 の到来が記録されなかったか？の二つがあります。

④図 3-1 で、濾紙は Cs137 の到来を記録しております。しかし SPM 記録には、この濾紙に到達した分の記録は無く、「ゼロ」のままでです。

ベータ線を利用した記録システムでのベータ線効果が「ゼロ」を導いたか？

⑤図 3-2 の記録からは、図 3-1 以上に濾紙に到達した Cs137 が多いのですが、非放射性の SPM (プルーム到来以前の SPM) 記録は放射性プルームの到来以前の SPM をほぼ同程度で記録し続けていて、Cs137 の新たな到来を記録していないようです。

濾紙には放射性 SPM が届いています。しかし、SPM 記録はその分だけ増加した気配が無いのです。

⑥黒川氏は、図 3-1 に記録された放射性プルームがいわきを襲ったとき、いわきの SPM 局は、図 3-1 同様な SPM 記録「ゼロ」を示したと記述しています。

⑦以上の状態から総合的に推察するに、図 3-1 と図 3-2 の条件は何が異なるのかを具体的に見ます。まず放射性プルームの図 3-1 放射能が図 3-2 に示される濃度の 50 倍もあるこ

とから、プルーム中の放射性微粒子のサイズが両プルームで同程度 ($1 \mu\text{m}$ 程度) だと仮定すると、放射性微粒子の空中濃度が 50 倍あることになります。

放射性微粒子に水分子が凝集される際に空中の SPM を巻き込んで放射性水滴中に取り込んでしまった可能性を考慮せざるを得ません。

その結果同じプルームでの状態を記した図 3-1 に示される南町局と図示はされていない「いわき局」と共に「ゼロ」を示したのは、高濃度の放射性微粒子が水分子を凝縮する際の、取り込み効果によるのではないかと推察します。図 3-1 の放射能降雨の雨滴中に非放射性 SPM が取り込まれたために非放射性 SPM をもゼロになったということです。

⑧Cs137 を含む SPM が到来しているにも拘わらずその量が SPM 記録に反映されていないで、上記⑦の考察に加えて次の考察をせざるを得ません：粒径 $10 \mu\text{m}$ 以下の放射性 SPM のベータ線強度はちょうど濾紙に付着した放射性水滴で遮蔽されるベータ線量と同程度であり、いつでも SPM 記録には記録されないのでないか？

即ち濾紙に放射性水滴が到達しても遮蔽された分だけ放射性 SPM から出るベータ線が補うので、SPM 局記録には常に記録されない、という推察をせざるを得ません。

⑨黒川氏は SPM いわき局での「ゼロ」は β 線効果ではないかとするが、以上の考察したようにいわき局特有の事象ではないとした方が良さそうです。

(2) 図 3-2

①ヨウ素 131 の大気中濃度が $400 (\text{Bq}/\text{m}^3)$ 程度です。このプルームが到着した直前の値を SPM 局記録はプルーム到来期間中維持しています。即ちプルームに関わりなく直前の値が維持されているのです。

②新たにプルームとして到着した放射性水滴は大部分は濾紙には届かなかった、わずかな量が濾紙に Cs137 記録として補足されているだけだと推察いたします。

サイクロン効果で、粒径の大きな放射性水滴は除外され、残った粒径の小さな放射性水滴についてはおそらく「霧箱効果」が働き、SPM として通過する放射性水滴はごく少量となります。

③この時の直前の SPM 値は記録された空中浮遊物に放射性微粒子が含まれていないことが濾紙の記録により確認出来ます。この SPM は湿度に関わりなくいつでも微粒子のままです。ですからそのまま SPM 記録に残されたのです。

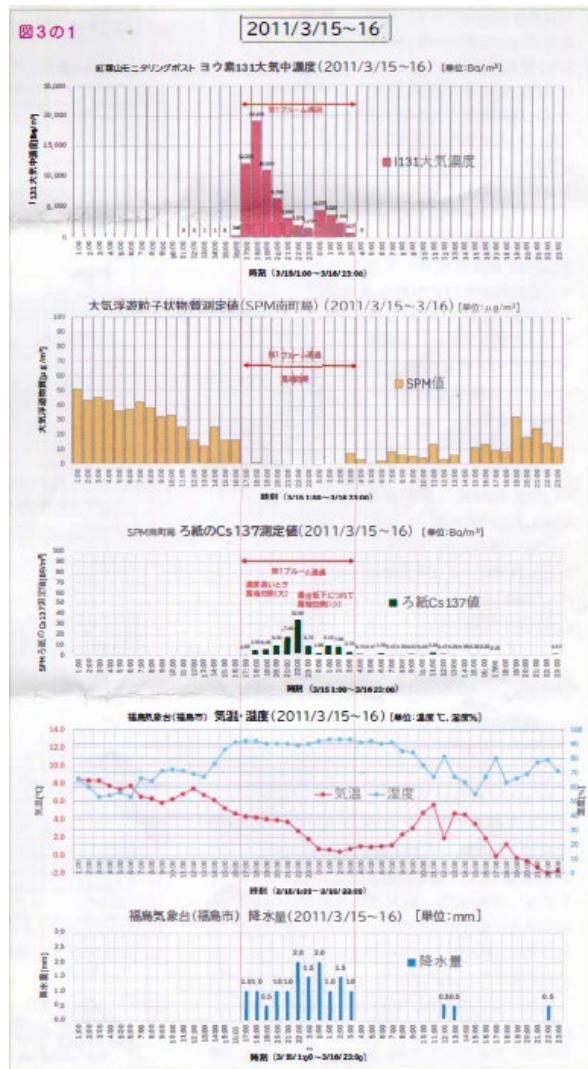
④濾紙に付着した放射性水滴がもし、SPM 記録に記録されると仮定した場合、放射性でない SPM に加えて放射性水滴の分だけ増加するはずですが、図 3-2 はその様な増加を示していません。

⑤前記のように、ベータ線の遮蔽効果を利用した検出システムのベータ線遮蔽分をちょうど補う放射性水滴からのベータ線があると仮定すれば、図 3-1 と同様に全記録が辻褄が合って理解できます。

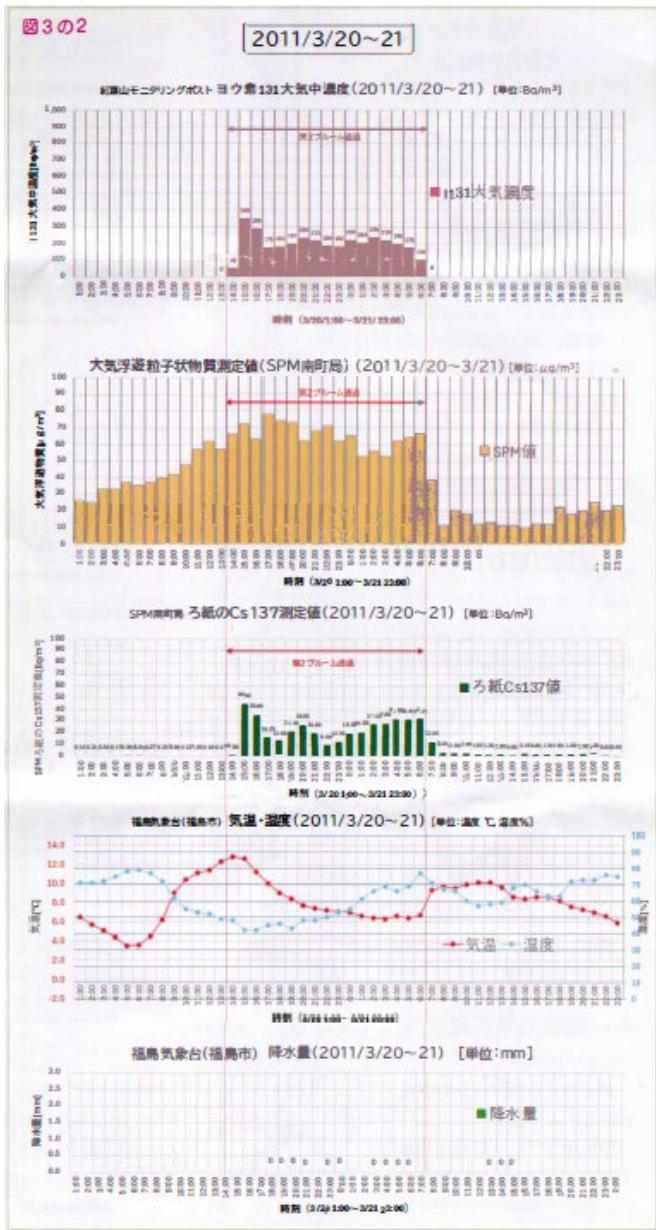
⑥原理的にも、現実的にも、SPM 局の検出・記録システムがベータ線の遮蔽率から算出するシステムであることは、ベータ線放出物質（ベータ線放出 SPM）を把握することは全く不可能であることを示していると思います。

健康評価委員会が引用している UNSCEAR2020/2021 のデータが放射能の客観的データとなり得ないことに対する考察ですので、特に重要であると考え、ご説明する次第です。

(図 3-1)



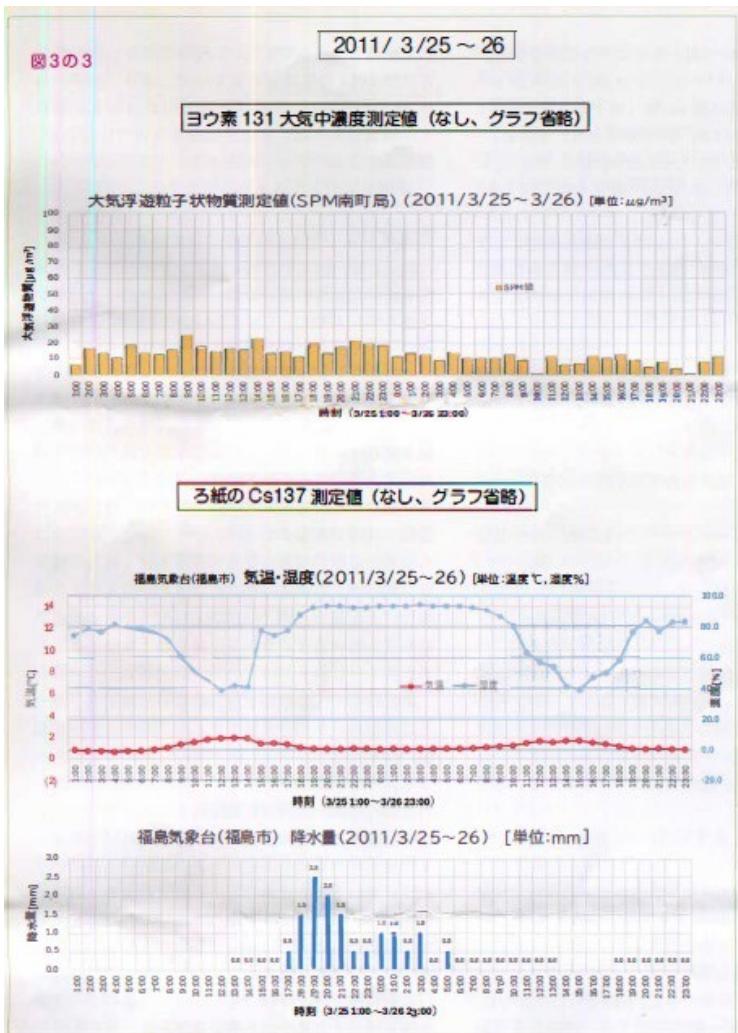
(図 3-2)



(3) 図3-3

図3-3での降雨は自然降雨であり、自然降雨によってSPM記録は影響を受けていません。

(図3-3)



(4) 放射性微粒子と霧箱

①放射性原子（微粒子）から発射された放射線による空気あるいは水分子の電離は、電離された分子が電荷を帯びることから、その分子を中心核となり水滴が凝集され、放射線の飛跡が観測されます。

霧箱では、温度冷却あるいは減圧により電離されたイオンの周囲の水滴が見えるサイズの霧を発生します。これは普通の霧箱ですが、この霧中には放射性微粒子（放射性原子）は存在しないので考察対象から外します。

普通の霧箱で観察されるのはこの場合で、湿度100%を実現させ、電離した荷電の周囲に水分子が凝縮するのを利用して放射線の飛跡を可視化するものです。

温度100%の空气中で放射線を飛ばすことの実現方法として、①低温にする、もしくはもう一つの方法として②空気を断熱膨張させて気温を低下させ、飽和水蒸気圧を低くする（飽和水蒸気圧は温度が低下すると飽和水蒸気圧も低下するものです）方法があります。

②放射線が水や窒素・酸素の分子に当たり、電離作用をすると、そこで生じる電荷に電気力学的

引力により水分子が凝集して、あっという間に直径 $100 \mu\text{m}$ 程度の霧粒になり、目に見えるようになります。水分子が電荷的に非対称だから一端凝集すれば加速度的に凝集速度が増加します。

③以下の霧粒が「霧箱効果」の対象となるものです。

SPM 局の試料収集システムに掛かるのはサイクロン効果で粒径の大きな放射性水滴は除外されるので、粒径が 10μ 以下の放射性水滴がポンピングにより、飽和水蒸気圧が降下する影響でくつき合って粒径が大きくなり除外されるものです。

通常の霧箱効果ではなく、放射性微粒子を核として凝集した霧滴がポンピングでサイズが大きくなり雨滴となる場合の効果です。

広い意味での霧箱効果ですが、通常の飛跡に沿って生じる電荷に水分子が凝集するのではなく、微粒子を核とする霧滴が凝集し合うものです。

対象が異なりメカニズムが異なります。

当然ですが、飛行機雲の生成とも温度が低くなる原因環境が全く異なります。

④この様に、放射性微粒子は単独で存在しているのではなく常に水分子を伴うものです。むき出しの放射性微粒子が吸引されれば、突然「霧箱効果」を発揮するのではありません。放射性微粒子は湿度のある空中では SPM 局の捕集装置に至る前に必ず水分子を凝集させているのです。凝集の程度は湿度に依存します。大気圧も気温も関連いたします。

SPM 捕集装置に入るときのサイズで「霧箱効果」が生じ、放射性微粒子が除外されるかどうかが分かれます。これも通常の霧箱効果と異なります。

⑤放射性微粒子を中心核とする水の凝集は湿度が低くても必ず生じます。唯、湿度によって凝集する水分子量が変わります。湿度が低いと水分子の空中濃度が低く、水分子同士の互いの距離が大きいので、凝集できる水分子の数が制限されます。形成される霧粒の直径は湿度が低いほど小さくなります。凝集した水滴の直径が $100 \mu\text{m}$ 程度以下であれば、空中に浮遊し、落下速度は 1mm/sec 程度です（ストークスの法則、沈着速度）。

⑥ですから空中に存在する霧状の水滴に囲まれた放射性微粒子（放射性微粒子を中心とする水滴）がポンピングの効果を受け、「霧箱効果」を生じるのは湿度がむしろ低い時に生じ安いものです。

霧箱で放射線の飛跡に霧が生じて可視化できる場合と異なる凝集メカニズムです。

(5) 大気中濃度と沈着量

さて、降雨する雨滴に含まれる放射能の量についてですが、

① 黒川氏は 放射性微粒子が雨に含まれていないことを試算により導き、「霧箱効果」により排除されることを証明したと zwarですが、試算する仮定条件が間違っていると判断します。

$$(\text{雨に含まれる}) \text{ 大気中濃度} = \text{地表沈着密度} \div \text{沈着速度}$$

を使用しています。

通常、空気中に浮遊する、水が凝縮した放射性微粒子は霧粒以下の状態なので、毎秒の落下速度は1mm/s程度です。これが普通の沈着速度なのです。

黒川氏は試算では放射性微粒子が全て雨に含まれるとして、沈着速度に雨滴の落下速度を用いています。

繰り返しますが、この仮定は既に放射性微粒子は雨滴に含まれているとすることです。さらに、黒川氏の仮定、ずっと続く雨の中には一定の放射能（放射性微粒子）が含まれているとの仮定から成り立ちます。

黒川氏の結論は上式からは 56Bq h/m^3 にしかならないので、平山論文が算出している 6000Bq h/m^3 と比較して、放射性微粒子は雨には含まれなかつた、としています。

- ② この試算は事実を反映仕切っていないと思います。原子炉から放出された放射性微粒子の噴出の高さが限定し、従って噴出された放射性微粒子が地上に到達する時間も、限定されているから黒川氏の仮定は不適切で成り立たないです。

それは放射性物質の噴出高度は3号炉は270m（3月14日11時1分）、他の炉の水素爆発は凡そ煙突の高さの半分くらいで数十mと報道されています（日テレ）。

仮定として、ある瞬間から1秒間の噴出を考えます。その1秒間に出了放射性微粒子群について考察します。

3月15日の2号炉爆発による放射性微粒子は30m迄吹き上げられ、放射性プルームはその2倍の60mの高さがあったと仮定しましょう。

- ③ 放射性プルームは、60m以下均一に分布したと仮定しましょう。

そうすると、上記の雨滴直径1mm迄に成長するのはどの高さでも一斉に成長し、一斉に直径1mm程度まで成長し落下し始めると考察できます。

仮定が毎秒1mの落下速度ですので、一番高くなる60mで60秒掛かって地上に落下します。

それより下の部分はそれぞれもっと短い時間で地上に落下します。

実際には60秒以上立つと、例え雨は継続したとしても、仮定した1秒間に噴出した放射能は既に全て地上に沈着していて、60秒以降の雨には放射能は含まれません。

簡略的に数式的に近似計算すると、0秒から60秒の平均値の30秒間が一斉に降る時間となります。

- ④ 放射能が放出された時間中、これが毎秒毎秒繰り返されます。噴出が続く間中放射能降雨は続きます。3/15～16の記録が示しますように、放射能降雨は放射能の噴出が停止すると降雨もなくなります。

ですから、この30秒間で計算しないと30秒より後に続く無意味な放射能を含まない状態を計算することになります。

全イベントが終了する30秒（0mから60mの高さでの平均落下時間）で計算しなければならないことになります。

- ⑤ そうすると、1時間当たりの平均計算では無く、イベントが起こる30秒間当たりの平均を取るべきです。

黒川氏は雨の中に永遠に放射性微粒子が含まれ1時間での沈着量で計算しておりますが、30

秒間しか放射性微粒子の沈着に関わりがありませんので、その仮定は現実を近似しております。1時間限りとしても3600mの高さまで吹き上げられていなければ成り立ちません。

- ⑥ 黒川氏の計算を修正すると、

$$200000\text{Bq/m}^2 \div (3600\text{m/h} \times (30\text{秒}/3600\text{秒})) = 6667\text{Bq} \cdot \text{h/m}^3$$

という計算になり、大気中放射能濃度 $6000\text{Bq} \cdot \text{h/m}^3$ に匹敵する値となります。

- ⑦ こういう近似を行えば、大気中放射濃度に匹敵する降雨中濃度が再現され、放射能降雨の降雨条件を満たすことになります。放射性微粒子はほぼ全量が雨に含まれていたのです。これは上述したように降雨が放射能降雨であれば当然のことです。
- ⑧ なお、空中に放射性微粒子が存在して降雨がある場合（降雨の無い場合も）の沈着速度は、数 mm/h （ストークスの方式の速度範囲）であることが測定されており、 1m/h という仮定（雨滴落下速度）の100分の1程度です。仮に大きく見積もって100分の1だとすると、 5600Bqh/m^3 が得られ、上記と同等な値です。平山論文値とほぼ一致するものです。これは上記の30秒間の試算と同程度の値です。放射性微粒子が雨に含まれていてもいなくとも空間濃度は同程度であるという自然の姿を現しています。
- ⑨ 降雨が放射能降雨であり、放射性降下物ほとんど全部が雨に含まれることが数値として裏付けられています。3/15~16のSPM南町局の測定値（～ゼロ）はほとんどが雨に含まれており雨粒は直径 1mm 程度ですので測定装置から除外されます。「霧箱効果」ではないのです。
- ⑩ SPM局における「桐箱効果」は雨粒になりきれていない $10\mu\text{m}$ 以下の直径を持った放射性霧滴が空中に在り、その霧粒（ $10\mu\text{m}$ オーダー直径程度では視覚できる霧にもなりません）が膨張に伴う断熱効果で温度が降下し、飽和蒸気圧が降下し、直径 $10\mu\text{m}$ を越える程度までの霧粒となる効果と考えられるでしょう。しかしそれはサイクロン通過の際の除外効果全体のうちの小部分でしょう。

結論

放射性微粒子は常に水分子を凝集するので、SPM捕集装置のサイクロン効果で大部分が除外されます。

図3-1の時のSPM南町局の「ゼロ」は霧箱効果ではなく、ほとんど全ての放射性微粒子が雨に捉えられていたとした方がよいのではないかと思います。

湿度が高くても低くても放射性微粒子に水分子が凝集することが生じる。大きさが 1mm 程度の雨滴まで成長するのは高湿度で微粒子のベータ線強度が強い時に限ります。

桐箱効果が生じるのは、サイクロン効果で直系の大きな物は排除されるので、直径が $10\mu\text{m}$ 程度以下の状態だった霧粒が減圧されると断熱膨張により空気温度が下がり、飽和水蒸気圧も下がるので、 $10\mu\text{m}$ 以上の霧粒（雨滴）になり、装置から除去されるものです。この状態は湿度に関わりなく生じます。