

大気中の物質拡散入門

原子力発電所からの放射性物質拡散を念頭に

地球流体電脳倶楽部 大気中物質拡散入門執筆グループ
<http://www.gfd-dennou.org/library/kakusan/>
kakusan-staff@gfd-dennou.org

| | | | |
|------|-------|-------------|------------|
| 林 祥介 | 神戸大学 | 理学研究科 | 惑星科学研究センター |
| 石川裕彦 | 京都大学 | 防災研究所 | |
| 乙部直人 | 福岡大学 | 理学部 | |
| 酒井 敏 | 京都大学 | 人間・環境学研究科 | |
| 塩谷雅人 | 京都大学 | 生存圏研究所 | |
| 竹見哲也 | 京都大学 | 防災研究所 | |
| 坪木和久 | 名古屋大学 | 地球水循環研究センター | |
| 山田道夫 | 京都大学 | 数理解析研究所 | |
| 余田成男 | 京都大学 | 理学研究科 | |

2011年3月11日、東北地方太平洋沖地震が発生し福島原発の原子炉冷却機能が失われた結果、放射性物質の環境への拡散という深刻な事態が発生しました。その後、放射性物質の大気中への拡散について、国内でもっとも研究開発が進んでいる数値モデル SPEEDI による計算結果が公開され、拡散予測とともに過去の放出時の検討も行われるようになりました。しかし大気中の物質拡散を予測することにどのような困難がありどのような不確実性があるのか、数値計算結果はどれくらい信用できるのかという点については、必ずしも広く理解されているとはいえない状況にあると思われます。そこでここでは、気象力学など地球流体力学を専門としている研究者が、このような大気拡散予測の現状を説明することを試みます。この文書は、震災発生当時、有志にて大学初年次レベル程度の解説を作ろうと企画したのですが、遅筆な編集担当のせいで震災からすでに半年が過ぎてしまいました。時期を逸した感は否めませんし、個別的な情報は古くなってしまっているかもしれませんが、一般的な考え方は変わらないと思いますので、Q and A 形式でまとめた文章を、いまさらではありますが、掲載したいと思います。このような文章がさらに必要となるような事態が再発することのないことを祈りつつ(2011/09/11)。

目次

- 第一章 大気中の物質拡散にまつわる流体力学：煙を例にして
- 第二章 大気中の物質拡散を計算するための基礎知識
- 第三章 SPEEDI について
- 第四章 観測と予測： 気象の場合と放射線の場合

第一章 大気中の物質拡散にまつわる流体力学：煙を例にして

ここではまず、大気中での物質拡散の基本的なイメージを説明します。大気中の物質拡散とはどのような現象なのか、それを予測しようとするときどのような困難があるのか、ということの概論です。煙を例にして考えてみましょう。

●大気中に出た物質はどういうふう拡がるのですか？

煙突から出る煙を想像してください。煙は風に流されてゆきます。そのイメージです。流体力学では、流されることを「移流」といいます。

●だんだん薄まるのですね？

はい、ふつう煙は最初濃くてもすぐに薄くなります。それと同じです。

●煙は、風下に流されて行くときとても複雑に動いているようですが、それも風のせいですか？

はい、風は同じ方向に一様に吹いているわけではありません。場所が違えば向きも変わるし、同じ場所でも時間的にどんどん変化します。風はいつも変化して乱れています。時々刻々変化し、しかも、その変化の様子が予想しにくいなぐれを「乱流」といいます。穏やかに一様に吹いていると人が思う時でさえ、実はかなり激しく乱れています。まして強風のときなどは強烈に乱れています。風はいつも乱流になっているのです。煙の拡散はその乱流によるものなので「乱流拡散」とよばれます。

簡単な実験をしてみましょう。

図 1-1 は実験室の中で線香の煙を 30 秒ごとに記録したものです。線香から立ち上る気流が乱れて様々なパターンができています。また、少し左から右に風が吹いていますが、その風も時間とともに揺らいでいます。この写真からも想像できるように、実験を繰り返しても煙の形は決して同じにはなりません。これは、煙を流している風の揺らぎが、実験を繰り返しても決して同じものにはならないためです。毎回毎回、新しい複雑な形の煙が見えることとなります。

なぜこんなに変化が激しいのでしょうか。それは乱流には、ある時刻のちょっとした違いが時間と共に急速に大きくなって後の時刻の様子が全く変わってしまう、というとても不安定な性質があるからです。このような不安定な運動を一般に「カオス」といいます。毎日の天

気は、大気のながれが乱流であることに依存する、カオスの典型的なものです。

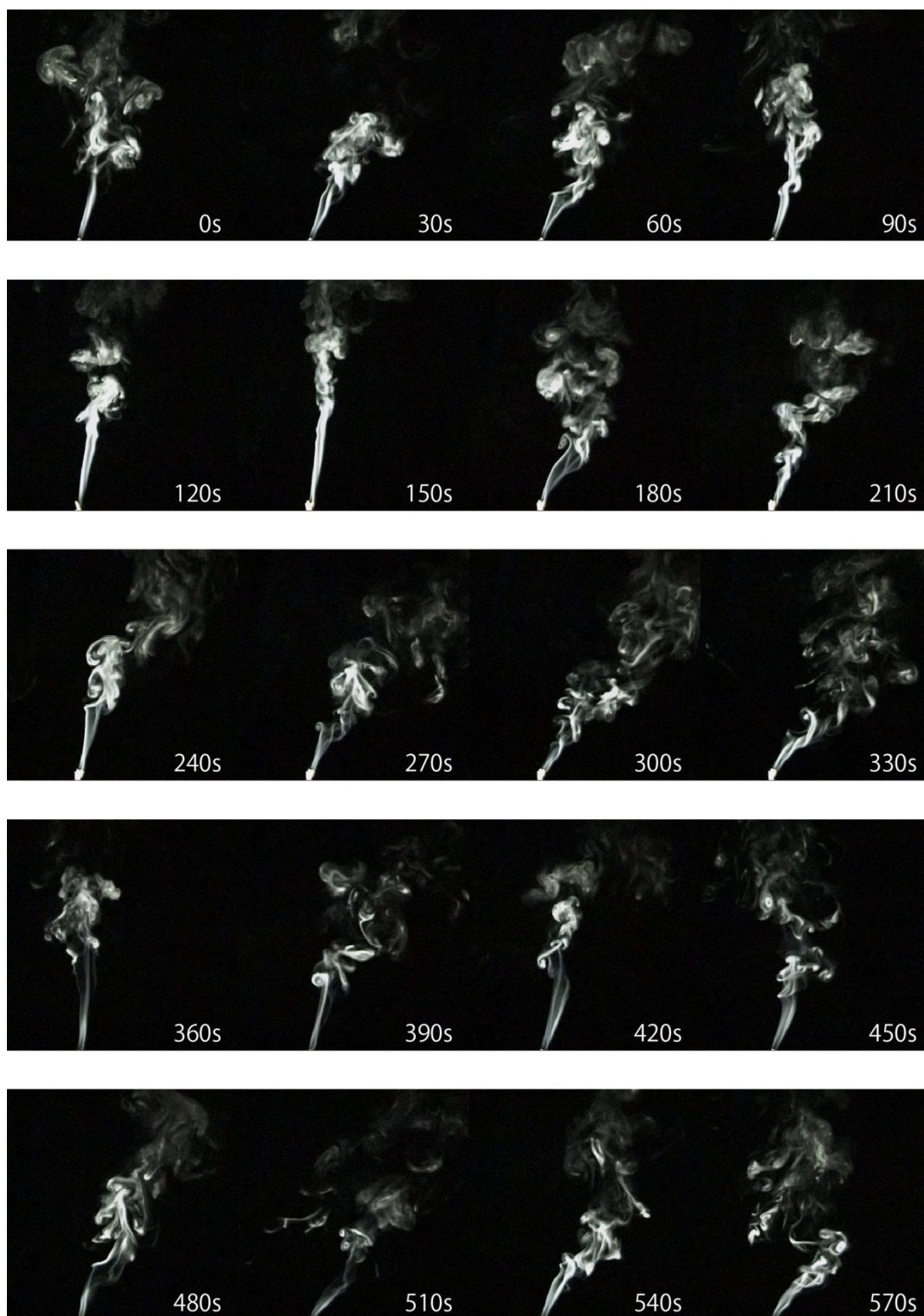


図 1-1 線香の煙の時間変化 (s は秒を表す)

●そうすると煙がどこに流されて行くかを予測するのはとても難しそうですね？

その通りです。

もしも風がいつでもどこでも一定の風向風速をもつなら、煙はまっすぐ下流に流れるだけなので、いつどこに流れてゆくのかを予想することは簡単です。しかし現実の風は揺らいでいて乱流になっているので、煙をきちんと追跡するには、時々刻々変化する風を正確に知ることが必要になります。明日の煙の様子を知るには、明日までの風を正確に予報しなければなりません。

●そうは言っても、煙突の煙を見ていると、風の乱流を正確に知ることなど不可能に思えますが？

実際そうですね。煙の動きを見ていると、大きな動きから小さな動きまでさまざまな動きが重なっています。それらを正確に捉えるためには、非常に細かな風の動きまで知ることが必要です。煙突の煙などの場合、一番小さな風の動きはおおよそ 1 mm くらいの大きさです。一番大きな風の動きは、煙突の大きさの 100 m 程度でしょうか。この 100 m から 1 mm の間のすべての大きさの風の動きがあると思ってください。

●そんな複雑な風の動きを完全に捉えることなどできそうにありませんね？

その通りです。

しかも煙が拡がっていくと、一番大きな動きの大きさも大きくなります。放射性物質の拡散なら水平 100 km くらいの大きさの風の動きまで考えることが必要になるでしょう。

さらに高さによる風の違いもあります。ふつう地上付近と上空の風は、風速も風向もかなり違います。煙が暖かいと上に昇り上空の風に流されます。煙が冷たければ地面に近い風に流されます。これらの風ももちろん乱流です。ほどほどの温度の煙が地上から出て拡がる時は、ほぼ高さ 1000 m くらいまでを考えます。火山の噴煙のように、高い山から放たれたり、煙が熱かったりする場合にはもっと高く昇ることもあります。

●そうすると広さが 100 km X 100 km で高さが 1 km くらいの中を、1 mm 毎に風速を調べないといけないことになりますか？

そうです。100 km / 1 mm = 10^8 , 1 km / 1 mm = 10^6 ですから、全部で 10^{22} 個のデータになります。とんでもない数のデータですね。こんな莫大なデータを扱えるコンピュータは地球上には存在しません。観測できないばかりかデータを保存することも不可能です。まして、

この詳しさを風の予報、つまり、数値シミュレーションをすることなど人知の及ぶところではありません。

●完全な風のデータを得ることが不可能であることは分かりました。でもこのようなデータは、煙の拡がりを 1mm 単位で完全に予測するときに必要なだけで、本当はそんなに精密なデータはいらないのではないですか？ たとえば煙の拡がりを 100 km X 100 km の地図に濃淡が書けるくらいの精度で分かればよいなら、大幅にデータを減らすことができそうな気がします。

たしかにそう思うのは自然ですね。ある程度小さな動きは無視して大きな動きだけ考えればいいのではないかと、思うのは当然です。でも本当にそうやって良いのかどうか、は慎重に考える必要があります。たとえば 101 m の大きさの動きは考慮するけれど 99 m の大きさの動きは無視する、ということをしてよいのか、という問題です。

実は、時々刻々の風の変化を考えると、小さな動きはそんなに簡単に無視してはいけなことが分かっています。流体の運動やながれによる拡散の中には、小さな動きどうし、あるいは、小さな動きと大きな動きが協力して大きな動きに影響を与える、という仕組みがあります。そのため、小さな動きを無視してしまうと、大きな動きにも誤差を生じるのです。

小さな動きを無視してデータ数を減らすのなら、少なくとも、小さな動きが大きな動きに及ぼす効果はきちんと考慮しておかなければなりません。

●大きな動きだけを考えていてはダメで、小さな動きの効果も取り入れて考えないといけない、ということですね？だんだん話が難しくなってきました。

難しいのは当然で、この問題は実は、物理学の未解決難問の一つである乱流の力学と密接に関係しています。小さな動きが大きな動きに及ぼす効果をきちんと考慮するやり方が、未だよく解っていないのです。

風の詳細かつ完全なデータを得ることは不可能だから、ある程度粗い風のデータを用いて煙の拡がりを予想したい。そのとき、粗いデータから落ちてしまった細かな風の動きも重要なんだけど、その効果をどうやって取り入れたらいいのか、ちゃんと解ってはいない、ということ。

●そうすると煙の拡がりを予測するのは無理なのですか？

きちんと論理的に隙のない方法で予測する、ということは残念ながら現代の科学にはできません。

しかし実用的な方法の有無は別問題です。理屈にはよく分からない部分があるけれどある程度うまくゆく、という方法があれば、実用的な予測に使うことができます。

●そういううまくい方法があればそれで良いわけですね？

たとえば天気予報は、明日の天気をコンピュータで計算しているのですが、1 mm の大きさの動きまで計算しているわけではありません。せいぜい数 km までです。そのためコンピュータで計算するときには「小さな動きの効果」がさまざまな方法で考慮されています。これらは、論理的に隙なく導かれた方法ではないのですが、ある程度の理論的根拠とある程度の経験から採用されたもので、「地球の現在の天気」に合うように調整されています。この調整は大変な努力を要するものですが、そのおかげで明日の天気の予報は実用的なレベルに達しています。

ただし、天気予報については一つ重要なことがあります。それは、天気については、世界各国の気象官署を中心とする膨大な努力によって、時々刻々、数多くの観測データが入ってくるようになっていくということです。このため計算は観測に合うように毎日修正が施されており、それによって明日の予報の実用性が保たれています。しかし数日から十日を越える予報となると予報精度を保つことができなくなります。

●煙の拡散についても実用的方法はあるのですか？

先に説明したように、実用的方法は、「ある程度の理論的根拠とある程度の経験」から採用されたやり方を用いています。実際には、この方法はどんなときにも正しい答を与えるわけではありません。そのため、

- ・ どのような状況においてどの程度の精度の予報を求めるのか
- ・ その要求に答える実用的方法はあるのか

ということが問題になります。

つまり概論ではすまなくなるわけです。そこで第二章以下では実際の大気拡散を扱う方法について説明することにします。

■拡散の基礎についてもっと詳しいことが知りたい方のために

拡散現象について少し知っている方なら「分子拡散」という言葉を聞いたことがあるでしょう。そこで「分子拡散」と「乱流拡散」はどう違うのか、ということに触れておくことにします。上の説明と重複する部分もありますが、より詳しい説明がほしい人向けです。

●まず、分子拡散ってなんですか？

物質が分子運動によって拡散する現象で、ながれのないときにも起こる狭い意味での拡散です。ながれによって物質が拡散する「乱流拡散」と区別して「分子拡散」と呼びます。この分子拡散はランダムな分子運動によるものなので、媒質と拡散する物質の物理的性質によって決まり、その拡散のしやすさは「拡散係数（ κ と書くことにします）」という量によって表されます。最初一点にあった物質が時間 t の間に拡散する範囲はおよそ $\sqrt{\kappa t}$ となります。

一般に、分子拡散は非常に遅く、拡散係数は非常に小さな値になります。気体の中に拡散するのか、液体の中に拡散するのか、あるいはまた何が拡散するのか、によって拡散係数の値は当然異なりますが、目安としては、液体中での拡散係数は $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 程度、気体では $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 程度です。1日の間に拡散によって広がる範囲は、液体で 1 cm 程度、気体で数 m 程度になります。

●分子拡散を実際に見ることはできますか？

図 1-2 は 2 枚の板で 0.5 mm の隙間を作って、その間をグリセリン水溶液で満たし、そこにインクを注入して拡散の様子を見たものです。初期の半径数 mm のインクが、半日で半径約 1 cm に広がっていることがわかります。物質の種類によって拡散の速さは異なりますが、液体の場合は、だいたい、この程度の「桁」のスピードになります。

本当は水とインクだけで実験したいところですが、0.5 mm の隙間でも水とインクの密度差などでながれができてしまい、拡散だけの様子を見ることができません。それだけ、分子拡散は小さいのです（この実験でも少し流れています）。

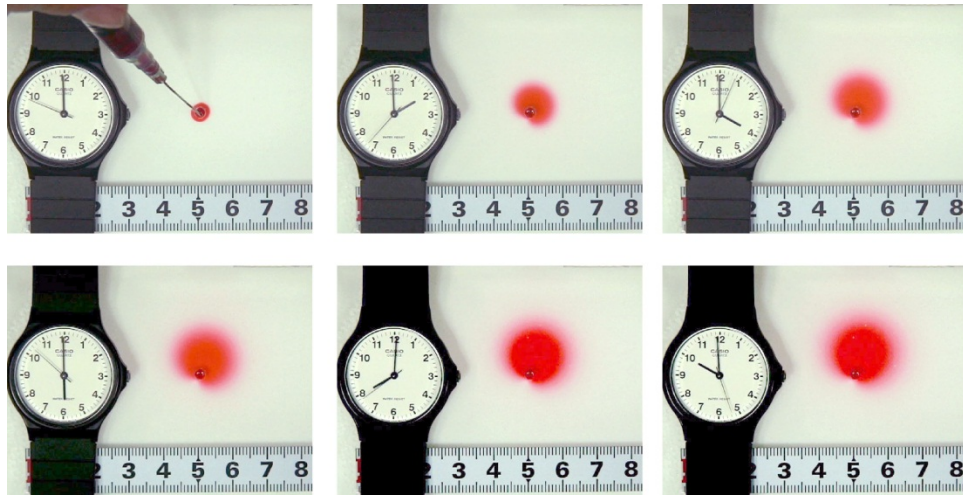


図 1-2 インクの拡散の様子

●これではなかなか混ざりませんか？

その通りです。コーヒーに砂糖をいれて、静かに放置したとすると、1日たっても、カップの底のほうに甘いコーヒーがたまっていることになります。「スプーンでかき混ぜる」(ながれによってかき混ぜる)ということが、いかに大切なことがわかんと思います。別の言い方をすると、日常生活で目にする「拡散現象」は、多くの場合、分子拡散によるものではなく、もっと大きなながれによってかきまぜられて起こる「乱流拡散」によるものです。

●ながれに流されて混ざっていくのが乱流拡散ですね？

はい。分子拡散がランダムな分子運動によって起こるのに対して、流体のかたまりが乱流によって激しくかきまぜられることによって起こるのが「乱流拡散」です。分子拡散の原因が分子運動にあったように、乱流拡散の原因は乱流にあります。大気や海洋のように自然界の流体は決して静かに静止していることはなく、常に乱れた状態にあり、この乱れたながれによって流されることで物質は急速に混ざります。スプーンで砂糖をかき混ぜるときのように、混ぜる効率は分子拡散に比べ乱流拡散が圧倒的です。

●乱流拡散を実際に見ることはできますか？

先に見た図 1-1 は実験室の中で線香の煙を 30 秒ごとに記録したものです。線香から立ち上る気流が乱れて様々なパターンができています。また、少し左から右に風が吹いていますが、その風も時間とともに揺らいでいます。この画像は数十 cm の範囲を写していますが、この

範囲での分子拡散の影響は 1 cm 程度です。

●このような煙の動きをコンピュータで計算できますか？

乱流は、初期の非常に小さな誤差が時間的に急速に（指数関数的に）拡大するという性質を持っています。このように誤差が急速拡大する運動は「カオス」とよばれます。カオスでは、拡大する誤差のためにある期間以上の将来の予測は事実上不可能になります。

この実験でも、最初から終わりまで同じ条件で実験をしているつもりなのですが、実際には、（実験には常につきものの）コントロールできない小さな違いがカオスの性質によって急速に拡大されるため、30 秒ごとのパターンはまるで違います。つまりある時刻に図 1-1 の写真のどの状態になるかを計算で予測することはほとんど不可能です。

煙のパターンが異なる原因はそれだけではありません。実は、仮に風の乱流の場が正確に分かったとしても、その風に流される煙の動きを予測することには同様の難しさがもう一つあります。乱流の場が正確にわかっているとしても、煙の位置に小さな誤差があると、やがてその誤差が拡大してしまい、正しい位置から大きく離れてしまうからです。ながれだけでなく、ながれに流される煙の移動そのものがやはりカオスの性質をもっているため、ある程度以上の将来予測は事実上不可能になります。

このように大気中での乱流拡散では、風の動きと風に乗って流される煙の動きの両方がカオスの性質をもつという二重のカオスになっており、このことがコンピュータによる拡散予測計算の困難を生んでいます。

●でも、おおよそ下から上に広がっていることは確かですね？

確かに、おおよそ下から上に広がっていますね。そこで、このような煙の様子を平均し、平均的な煙の広がりを考えてみましょう。図 1-3 は図 1-1 の煙のパターンを数分間平均したものです。この図を見ると、平均的には、煙は上昇しながら横方向にも「拡散」していくように見えます。分子拡散の時のように、この「拡散」の強さを表す量として、分子拡散のときの拡散係数に対応する「乱流拡散係数」を考えたりもします。



図 1-3 煙の平均的な様子

●この平均的な「拡散」の様子ならコンピュータで計算できるのですか？

図 1-3 のように(時間的あるいは空間的に)平均された様子なら、「ある程度」計算することができます。そのような計算には乱流拡散係数のような量が使われることになります。

●乱流拡散係数の値はどうやって決めるのですか？

実際には、この乱流拡散係数の値は、計算の前にあらかじめ分かっている、というよりは、今計算しようとしている状況と似た状況において、コンピュータの計算結果が室内実験や観測の結果に近くなるように調整された値になっています。つまり、乱流拡散係数の値は、いくつかの典型的な状況を計算したときに正しい答を出すように調整されているわけです。

さらに言えば、このような調整は、今計算しようとしている状況で正しい答を出すことを保証するものではありません。経験と勘によってある程度の結果は期待されるものの、先に書いたように、このような問題を扱える論理的に隙のない理論はない以上、厳しく言えば、やってみなければ分からないのです。一般的に言えば、実験や観測の難しいながれについては調整も難しく、したがって大気や海洋のながれなどのように大規模なものは計算が難しいながれになります。天気予報のために全世界に観測網を展開したのはこの調整のためと言っても良いでしょう。

●なぜ乱流拡散係数の値を理論的に決めることができないのですか？

分子拡散の場合、拡散係数とは、小さなスケールの運動である分子運動の効果を、拡散現象が観察されるような大きなスケールの現象に反映させるための量でした。このような量を決めることができるのは、小さなスケールの分子運動と大きなスケールの拡散現象が、スケールの上ではっきり分かれていたからです。

しかし乱流拡散には、そのようにはっきりとスケールを分けることができない、という性質があります。これは乱流の本質的な性格と密接に関係しています。乱流の中のいろいろな運動のスケールは連続的に分布しているため、ここまで大きなスケール、ここから小さなスケール、というようにスケールを分離することができません。

分子運動のアナロジーで乱流拡散を考えているにも関わらず、その考え方の基礎となるスケールの明確な分離が成立しません。そのため乱流拡散における乱流拡散係数の概念はしっかり基礎づけることができないのです。これが乱流の扱いが難しい理由の一つです。

●それでは乱流拡散係数は考えることができないのですか？

乱流拡散では、分子拡散のときのような明確な拡散係数は定義できません。

しかしそうはいつでも、工学や気象学など実用的計算を必要とするさまざまな分野があります。そこで、強引ではありますが、大きなながれから小さなながれまで含む乱流に対し、便宜的にある空間（あるいは時間）スケールで区切って、それより大きなものは「ながれ」、小さなものは「ランダムながれ」として考えることにします。こうすることによって一応「乱流拡散係数」を考えることはできます。

このとき乱流拡散係数の値は、どのスケールで区切って考えたかに依存します。当然ながら乱流の強さにも依存します。またこのように定義した乱流拡散係数にしても、理論的に（論理的飛躍なしに）その値を求めることは、今の科学にはできません。何かもっともらしい仮定をおいて値を求めるか、あるいは実験や観測の結果と計算結果が近くなるように調整して値を決めることになります。

たとえば、線香の煙の例で言えば、図 1-1 のような観測を多数行い図 1-3 のように平均された様子を知っているなら、計算結果がそれになるように乱流拡散係数の値を調整することはできます。しかし、そのような調整を行ってしまうと決して図 1-1 のどれかのような煙のようす（煙が渦巻いている様子）を表現することはできません。この場合求める大きなながれは図 1-3 に表現されるような煙が下から上に広がるおおよそのながれであって、煙の渦々した振る舞いは小さなスケールの「ランダムながれ」として切り取られ、乱流拡散係数に組み込んだことになります。

●そのようにして得た乱流拡散係数の値はどのくらいですか？

今日行われている大気や海洋のシミュレーションでは、計算する格子点の間隔（粗さ）は km 単位ですから、そこで用いる拡散係数は当然「乱流拡散係数」となります。一般にその

値は分子拡散係数に比べて数桁から十数桁大きな値とします。これは、乱流拡散の方が分子拡散よりもずっと強力な拡散を引き起こすことを反映しています。

第二章 大気中の物質拡散を計算するための基礎知識

前章では、大気中の物質拡散を流体力学はどうとらえているのか、そのイメージを概観しました。大気中の物質拡散は「乱流拡散」という現象で、それを予測するには具体的な設定と「小さな動きの効果」の取り込み方を確認するための観測が必要となります。ここではより具体的な物質としての原子力発電所から放出される「放射性物質」をとりあげて、その予測を考えてみることにしましょう。「放射性物質」とは、放射線を出す性質（これを「放射能」といいます）を持つ元素（これを「放射性元素」といいます）を含む物質のことです。

大気中を拡がる放射性物質の予報計算は、天気予報の計算に似ています。天気予報で雨や雲が予報できるのだから、放射性物質の拡がり方もコンピュータで予測できるように思えるかもしれませんが、ですが、天気予報と放射性物質の拡がりの予報にはいくつかの点で決定的な違いがあり、必ずしも同じようにはいきません。

●放射線はどこから来るのでしょうか？

原子力発電所から直接に出る放射線（アルファ線、ベータ線、ガンマ線、中性子線）があったとしても、それらは遠くまでは届きません。1気圧の空気中ではアルファ線（ヘリウム原子核の高速なながれ）は数 cm、ベータ線（電子の高速なながれ）は数 m 程度、ガンマ線（非常に波長の短い光（電磁波））はもう少し長くて数百 m 程度です。

大気中には目に見えないほど小さな塵（これをエアロゾルといいます）があります。塵の大きさは 1000 分の 1 mm 以下から 100 分の 1 mm 程度です。前章で例として出した煙も燃える線香が作り出した小さな塵の集まりです。原子力発電所から放出される放射性物質もこのような塵として、あるいは塵の中に含まれた状態で大気中に放出されます。

大気中に放出された放射性物質を含む塵は大気のながれに乗って遠くに運ばれます。塵は運ばれながら重力によってゆっくりと、また、雲や雨などの水滴があるとそれらに取り込まれて雨として速やかに、地上に運ばれます。大気中ならびに地表に沈着したこれらの放射性物質を含んだ塵が、原子力発電所から遠く離れた場所での放射線をもたらします。放射性物質を含む塵が風に流されて上空を通過する際に観測される放射線は主としてガンマ線です。

●小さな塵の粒子の大きさは重要ですか？

重要です。空気中では大きくて重い粒子は早く落下し、小さくて軽い粒子ほどゆっくり落下します。放出される放射線の塵粒子の大きさ・重さがわからないと、どれくらいの速度で落

下するのかを計算できません。放射性物質がどこまで運ばれるかを知るためには、放出される塵の大きさ・重さを知っている必要があります。

ちなみに、プルトニウムは重い元素なので、速く落ちて遠くに運ばれないという報道が原発事故後の混乱した時期にありましたが、これは間違いです。確かにプルトニウムは原子一つで比較するとヨウ素より重いですが、落下速度はプルトニウムやヨウ素などを含む塵の大きさ・重さで決まります。プルトニウムを含む塵が小さければ、ヨウ素を含む大きな塵よりゆっくり落ちるのです。個々の元素の重さは関係ありません。

●一緒に放出される空気の温度や水蒸気量は重要ですか？

重要です。暖かい空気は浮力で高くまであがります。また、水蒸気量が多いほど空気は軽くなります。放出されたときの放射性物質を含む空気の温度や水蒸気量で、どの高さまで到達するのかが決まります。もっとも顕著な例は、広島や長崎の原爆で、このとき高温の空気は対流圏を突き抜けて成層圏に達しました。

地上から対流圏下層 1~2 km 程度までの大気のながれ（風）は高度とともに大きく変わりますから、放出された塵を含む空気がどの高さまで達するのかわりに、拡がる方向と距離が大きく変わってきます。平均的な風速は地表から離れるにつれ通常大きくなります。いつもではありませんが、高層ビルでは一般に窓は開けていられませんね。多くの場合、高いところに放出されればそれだけ遠方にまで流されることとなります。風向も高さとともに変わるのが普通です。たとえば、地上付近では南風が吹いていて、高度 1 km より上では西風が吹いている、というような場合もあるでしょう。そのような場合、地上付近にたまるような放出のされ方であれば北に流されますが、高度 1 km 以上に達するのであれば、東に流されてしまいます。

放射性物質がどこまで運ばれるかを知るためには、放射性物質を含む塵を含んだ空気が原子力発電所上空のどの高さまで達するか、それを決める温度と水蒸気量を知っておく必要があります。

●放射性物質の塵は大気中をどのように拡がっていくのですか？

放射性物質を含む塵の大気中での拡がり方は、第一章で説明した乱流拡散です。その動きを予測することの難しさは、乱れた空気中を広がる煙の拡散を予測する難しさと同じで、小さな動きが及ぼす効果をどう取り込むかが問題となるのでした。

さらに塵が重力によりゆっくりと落下すること、雲や雨の水滴に取り込まれて雨として落下することを考慮しなければなりません。

●雨はどのように放射性物質を運ぶのですか？

雲は、大気中の塵が凝結核となり周囲の水蒸気を集めて微小な水滴を作ることによって生まれます。どんな塵でも凝結核になれるわけではなく、凝結核になれるかどうかは塵を構成する物質や大きさによっています。放射性物質を含む塵が凝結核になって雲を作れるかどうかを知るためには、その塵の大きさやそれに含まれる物質の性質を知る必要があります。

また、塵は落下する雨粒と衝突して取り込まれ、雨粒と一緒に地上に運ばれます。雨粒が落下の途中で蒸発してしまう場合は、取り込まれた塵は雨粒が蒸発した高さの大気に放出されます。

●大気中を拡がる様子はどのようにコンピュータで計算するのですか？

まず大気のながれを計算し、そのながれを元に水蒸気や水滴・塵の動きを計算します。大気のながれの計算は天気予報で用いられるものと同じです。まず大気のながれの計算を説明しましょう。

大気のながれは流体力学の方程式に従っています。風や温度・圧力のある時刻での分布を与えれば流体力学の方程式を使って次の時刻でのこれらの分布を知ることができます。しかし、コンピュータでは有限の量のデータしか扱えませんので、計算したい領域を分割し適当な距離ごとに点（通常、格子状に置くので格子点といいます）を置いて、その格子点での風や温度・圧力の量だけでながれを表現できるよう方程式を近似します。ちょうど豆腐をさいの目状に切るようなイメージです。時間についても同様に有限の時間間隔で計算できるように近似します。これで、ある時刻にすべての格子点での風や温度のデータが与えられれば、次の時刻（有限の時間間隔後）での風と温度・圧力の格子点での値を計算することができるようになります。以後この計算を繰り返すことで、風と温度・圧力の予測ができるわけです。

格子点間隔のことを「空間解像度」、時間間隔については「時間解像度」ということがあります。これらが細かいほどより小さな動きまで正確にとりこんだ計算ができるわけですが、実際に表現できる動きの大きさは格子点間隔のおよそ5倍から7倍くらいの大きさをもっているながれであることに注意してください。たとえば気象庁の天気予報計算では、地球全体の計算と日本領域の計算を組み合わせて行っていますが、それぞれの空間解像度は20 kmと5 kmです。この5倍くらいの大きさのながれが表現できているとすると、日本の気象庁

の最も高い解像度の予報計算でも表現できる大きさは 30 km 程度ということができるでしょう。半径 20 km のなかの放射能分布を計算するためには、空間解像度が 1 km 程度以下でなければなりません。

ちなみに、コンピュータでの計算では、格子点間隔で定められる空間解像度よりも大きな大きさを持つながれを、「コンピュータで表現できるながれ」や「コンピュータが解像できるながれ」などと言います。

●ながれの計算には、小さな動きの効果をとりこまないといけないのですよね？

はい、空間解像度で定められる大きさより小さな大きさをもつながれは、コンピュータでは表現できません。しかし、第一章で説明したように、小さな動きの効果をとりこまなければなりません。適当な仮定の下で物理的考察を行い、各格子点での乱流拡散係数を計算することによって小さな動きの効果を表現します。その係数が正しいかどうかは計算結果と観測との比較により検証せねばなりません。

●コンピュータでは小さな塵はどう扱うのですか？

水蒸気や水滴、そして、塵などの動きもやはり格子点上での量で表現します。しかし、大気のながれによって運ばれる水滴や塵の一粒一粒の動きを全部計算することはできません。コンピュータでは一粒一粒を区別しないで、物質あるいは粒子の種類（構成物質や粒子の大きさや重さなどで区別）ごとにまとめて乾燥空気 1 kg に含まれる重さ（混合比と言います）あるいは 1 m^2 に含まれる重さ（濃度）で表現します。各格子点で風の情報が与えられたのでこれを使って、次の時刻（有限の時間間隔後）に水蒸気や水滴、塵がどこに運ばれるかを計算し、各格子点上の混合比の値に再度内挿して次の時刻での値とします。

水滴や塵などの粒子に関しては、重力によって落下する効果も考慮します。空気中で水蒸気から水滴や氷粒が作られたり、これらがさらに水蒸気を取り込んで成長したり、あるいは、粒子同士でぶつかって合体したり、という粒子成長過程（雲微物理過程と言います）も表現します。ここでも粒子一粒一粒の成長を計算するのではなく、各格子点で混合比の変化を表現します。粒子の種類 A が成長すると粒子の種類 B に変化する、といった具合に計算するわけです。これらの手順は天気予報の計算と同じです。放射性物質を含んだ塵も重力によって落下しますので、その効果は考慮します。さらに、水蒸気の吸収、水滴への取り込みなどを考慮しなければなりません。詳細は第三章の SPEEDI についての解説で説明しましょう。

●塵の動きの計算でも小さな動きの効果をとりにまないといけないのですよね？

はい、水蒸気、水滴や塵など物質が風によって流される計算を行う場合も、空間解像度で定められる大きさより小さな大きさをもつながらの効果を取り込まなければなりません。風そのものの計算と同様、物質が風に流される計算においても、適当な仮定の下で物理的考察を行い、各格子点での乱流拡散係数を計算することによって小さな動きの効果を表現します。その係数が正しいかどうかは計算結果と観測との比較により検証せねばなりません。

「物質が風に流される」という計算の中には、風の場の計算とその風で流される計算の二回の計算で、小さな動きの効果を表現するための乱流拡散係数が登場します。このことは第一章で簡単に言及した「二重のカオス」という話に対応しています。

ちなみに、コンピュータでの物質の動きの計算では、コンピュータで表現できる、空間解像度で定められる大きさより大きな大きさをもつながらで運ばれることを「移流」、乱流拡散係数で表現される、コンピュータで表現できない小さな大きさの動きの効果によって運ばれることを「乱流拡散」あるいは単に「拡散」と言います。

●計算には初期値が必要ですよね？

はい、高校の数学で習うように、時間変化を記述する方程式を解くためには初期の値が必要です。放射性物質を含んだ塵の拡がりを計算するためには、原子力発電所から放出されるとき塵の量、同時に放出される空気の温度と水蒸気量、その時刻の計算したい領域全体の風や温度や水蒸気量、さらには雨や雲の状態がわかっていなければなりません。

しかし、原子力発電所の事故では、どの時刻にどれだけの量の放射性物質を含む塵やガスが放出されるのかといった情報がありません。爆発のときだけ放射性物質が放出されるのか、継続的に放出されているのか、放出される量はどれくらいなのか、原子力発電所のどこから放出されるのか、どの高さまで噴き出しているのかなどの情報がありません。さらに塵状で放出されるとすると、その塵の粒子の大きさはどれくらいか、一緒に放出されるとき空気の温度はどれくらいか、その空気に水蒸気はどれくらい含まれているのかなど、これらの情報もないのです。

●天気予報では初期値はどうしているのですか？

現在の天気予報では、毎日絶え間なく地球全体で各国の気象官署等の協力により行われている気象観測データが瞬時に気象庁に集められています。気象庁ではその膨大な観測データ一

一つの正しさと精度をさまざまな方法でチェックし、すべてのチェックを通過したデータのみを天気予報の計算に用いています。このように厳しい検査を通過したデータを用いて、気象を記述する方程式を上記のように近似して、スーパーコンピュータを用いて計算します。天気予報はこのような観測データの集積の上で実現しています。放射性物質の予報にはこのような観測データがないことが決定的に天気予報と異なる点です。

●気象の予報にはスーパーコンピュータが必要ですか？

気象の予報計算は非常に大きな計算ですので、スーパーコンピュータがなければ計算できません。日本では気象庁が 1959 年に大型計算機を導入したのが気象のシミュレーションの応用としての数値天気予報のはじまりです。その後の絶え間ない研究開発の結果、1980 年代には天気予報の多くの部分が数値予報によるものとなりました。数値計算用の大型計算機がスーパーコンピュータという名前を冠するようになったのはまさにこの頃であったのです。現在、気象庁で気象予測に用いられているスーパーコンピュータは、1 秒間に数 10 兆回の掛け算ができるほど高速のものを用いています。

●放射性物質の塵の拡散の計算も同じようにできないのですか？

先に説明したように放射性物質の塵の拡がりの計算は、大気の運動や雲・降水の計算の上に行われます。ここまでの説明で、気象の計算には元となるデータが必要で、それが膨大なものであることを説明しました。放射性物質の塵の拡がりの計算にも同じように、もととなる観測データが必要です。第三章の SPEEDI の解説で詳しく説明しますが、風と温度・圧力など気象データは気象庁の天気予報モデルの計算結果を利用して観測データに代替することはできるでしょう。しかしその空間解像度は全球モデルで 20 km、領域モデルで 5 km で、それよりも小さな大きさを持つ風や温度・圧力の情報はありません。放射性物質の放出に関する観測データも得られていないという問題とともに、放射性物質の塵の拡がりの計算を困難にしている原因の一つです。

●放射性物質の詳細な計算ができなくても、その拡がる範囲だけでも計算できないのですか？

放射性物質を含む塵の拡がりは移流と乱流拡散で大まかに決まりますので、それを決める風の空間分布とその時間変化がわずかな誤差を含んでいるだけでまったく異なる結果になる場合があります。図 2-1 に、大気のながれ場が 3 時間だけ異なる場合で、塵の拡がり方が全く違う結果になる例を示します。このようなわずかな風の場の違いが放射性物質を含む塵の拡がりの大きな違いになるので、数値計算結果だけをもとにして避難を判断することは推奨

できません。

さらに、放射性物質を含む塵の拡がりを左右する要因に、コンピュータでは表現できない小さな動きによる乱流拡散があります。これについてはこの章の後半に詳細な説明があるのでここでは省略しますが、重要な点はコンピュータによる計算はあくまで近似の計算であり、コンピュータの格子点では表現できない乱流運動が実際には大気中にあり、それが放射性物質の塵の拡がりを大きく左右することがあるということです。

●そのほかに放射性物質を含む塵の拡がりを予測するには何が問題ですか？

原子力発電所の事故が起こった瞬間は、原子力発電所からだけ放射性物質が放出されます。しかし、一度地面に降下した塵も強い風が吹けば再び巻き上げられてしまいます。時間とともに積もった塵の量が増えてそれが再度巻き上げられることを考慮しなければならないとすると、放射性物質の発生源が周囲に面的に広がっていることとなります。しかし、一度降り積もった塵が風によりどのくらい巻き上がるかは、地表面の状況にも依存しており、簡単に時間発展方程式の形を記述することができません。

まして、雨が降れば地表面に積もっていた塵は流され、あるいは、ながれがよどむところで泥として沈殿集積します。地表面のどこに放射性物質を含んだ塵がどれくらい集積するかは、具体的な細かい状況（水田の配置がどうなっているとか配水溝がどうなっているとか）に依存しますので、予測計算することはさらに困難です。

●諸外国から放射性物質の塵の拡がりを計算した結果が発表されていますが、信頼性はどのくらいありますか？

ここまでに説明してきた問題点は、すべてのコンピュータ計算にあてはまります。SPEEDI（第三章で説明します）もその例外ではありません。ながれ場の初期値の問題や乱流拡散の問題に加えて、そもそも放射性物質の放出についてのデータがないことがSPEEDIによる予測を決定的に難しくしています。

海外から発表されていた計算は、このSPEEDIに比べると解像度が数10kmと粗く、しかも放射性物質の放出についても観測ではなく極めて単純化したシナリオを仮定しています。その予測は、計算精度が低いうえに、原子力発電所で実際に起こっていることを何も反映していないので、計算された数値には全く信頼性がありません。そもそも解像度数10kmでの計算は国際機関による国外への影響を評価することを目的とした計算であり、日本国内での放射性物質の拡散を予測することに用いられることは想定されていないものです。したがっ

て、その精度がどの程度であるのかの知識を持たない方がこれらの計算結果に基づいて何らかの行動（避難するかしないかの判断など）を行うことは推奨できません。この問題は第四章でさらに掘下げます。

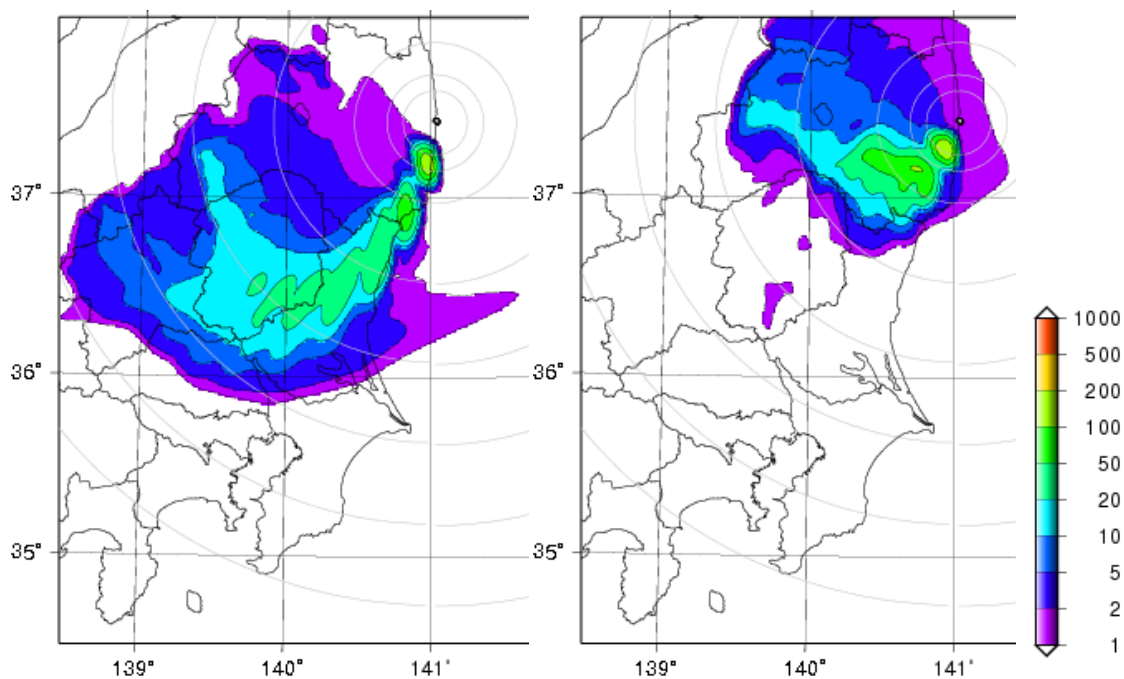


図 2-1：（左）2011 年 3 月 14 日 21 時から，（右）3 時間後の同 15 日 0 時から，福島第一原発で一定量の物質を瞬間的に放出した場合の計算結果。初期から 30 時間の地上における混合比を平均したもの。カラーレベルの値は相対値で、絶対値そのものには意味がない。

■乱流拡散の計算の基礎についてもっと詳しいことが知りたい方のために

●混合比は、差分化した時の計算格子、つまり計算の解像度が細かい場合と粗い場合でコンピュータ上では違う数値になるのですか？

そうです。たとえば、水平 1 km 格子間隔の場合と 10 km 格子間隔の場合を比べると、1 km 格子の計算では 10 km 四方の領域で 10×10 点つまり 100 点で混合比の数値とその分布が求められます。10 km 格子の計算では、その 100 点での混合比分布を平坦にしたような一定の数値しか得られません。

すでに説明したように、雲粒雨粒などの水滴や小さな塵（エアロゾル）など大気中の物質の拡がり方を、私たちが思い描く大気の実空間スケール（数～数千 km の領域）で計算するような場合には、ひとつひとつの小さな塵粒子の動きを追跡するような方法では計算機の能力上対処できないので、物質の混合比という量を考えて、混合比が時間・空間にどのように拡がっていくのかを計算する方法を用います。エアロゾルの混合比の時間・空間変化を表す微分方程式は、移流と乱流による拡散の効果を組み合わせて表現しているので、移流拡散方程式と言われます。

移流拡散方程式をコンピュータで計算するために、微分を差分（物理量の格子点間での値の差）に近似します。このときの差分がコンピュータで計算する際の解像度になり、エアロゾルの混合比はその差分化されたひとつの計算格子に対応して計算されます。逆の言い方をすると、計算格子の代表値（または平均値）として混合比が算出されるのです。

ちなみに、エアロゾルには、植生活動により生じる花粉、土壌面から飛散する砂塵、火山活動により生じるもの、海面からの波しぶき、森林火災、工場などの煙や車の排気ガスといったように、自然起源のものとは人為起源のものがあります。これらエアロゾルは、極めて微小な大きさ（1～100 μm サイズ）でしかありませんが、ひとつひとつの粒子なのです。しかし、エアロゾルほどのサイズで細かく計算格子を設けて、その動きを個々に追いかけていくことは現在の計算機能力では不可能です。

個々の水滴やエアロゾル粒子のながれによる動きを追跡するかわりに、ながれに乗って移流される粒子を仮想的に考えて（疑似粒子と呼ぶこともあります）、その動きをながれ場の情報から計算し、物質の広がり方を計算することはよく行われています。ながれによる移流計算だけだと、乱流による拡散の効果は表現されませんので、乱流による拡散の効果表現する必要があります。たとえば、乱流強度を適当な方法で評価して確率的に位置をずらしたりする手法があります。この場合も第一章で説明したように、決定論的な計算はできません。

乱流による拡散のモデルにある不定パラメタの値を実験や観測で決定する必要があります。

また、物質の動きのカオス性を表現するために同時に複数の疑似粒子を近い初期位置から出発させることがよく行われます。疑似粒子の移流計算によって物質の拡散を計算する手法をラグランジュ的手法と呼んだりします。これに対して、疑似粒子の移流計算を介さない、格子点上の混合比のみを用いて計算する手法をオイラー的手法と呼んだりもします。具体的な例は第三章、四章で説明することにしめよう。

●身近なスケールでの拡がり方を知りたいということを考えて仮に1 km 格子で計算できたとして、あとは移流拡散方程式を差分化してコンピュータで計算すれば答えは分かるのですか？

移流拡散方程式は、時間経過を求めるための微分方程式です。現時点での空間分布の情報が分かって初めて、次の時刻での空間分布が予測できます。この時間経過の元をたどれば、最初の時刻の空間分布の情報が必要になることが分かります。この最初の時刻はいつでもいいのですが、計算するための初期時刻になります。

エアロゾルの大気中での拡がり方を計算することを考えると、まずどの程度の放出が初期時刻に起こったのかという情報が欠かせません。植生からの花粉の飛散量、地面からの砂塵の飛散量、工場の煙の量、車からの排気ガスの量、これらが初期時刻にどの程度の放出があったのかという情報がなければ、その後の時間経過は計算のしようがありません。さらに言えば、放出が起きているのは、初期時刻だけではなく、一定の期間連続することもあります。さらには地面からの砂塵の飛散のように、一定の風速以上の場合に風速の大きさに依存して起こる場合もあります。大気でのエアロゾルは時間的に連続して放出される場合がほとんどですので、時間的に連続した放出量の正確な情報が大気中でのエアロゾルの拡がり方の計算には必要不可欠なのです。

●それでは、仮にこの放出量の正確な情報、または推定値でもいいので何かしらの放出量の情報があれば、大気での拡がり方は計算できることになるのですか？

結果はともあれ、計算だけならできます。ただし、第一章の「拡散の基礎についてもっと詳しいことが知りたい方のために」の乱流拡散のところでも説明したとおり、移流拡散方程式での乱流拡散の取り扱いが困難なことが問題です。汚染物質拡散で考えなければならない大気の実スケールを取り扱うための格子点間隔では、表現できない小さな動きを乱流拡散として定式化するために、様々な物理的な考察をおこなう必要があります。

実は、大気のながれには着目する領域に応じた特徴的なスケールがあります。地表に近い 1 ~ 2 km 程度までの大気境界層と呼ばれる領域では微細なスケールの乱流が卓越します。日射が強い季節なら地表面が加熱され、強い上昇気流と下降気流とが併存する対流運動が発生し、水蒸気の凝結を伴う場合は積雲となります。これより上空、地表の影響をあまり受けない自由大気と呼ばれる高さ領域では、境界層に比べると乱流的な運動が抑制され、波動的な運動が卓越します。また、自由大気での運動は上下方向より水平方向にスケールの大きな運動となることが特徴です。例外は、前線に伴う上昇流や積乱雲で、特に積乱雲は水蒸気の凝結熱が大きく、強い対流となって境界層の対流活動が自由大気中に陥入したものです。

これらの運動に対応して、大気境界層での動きの空間スケールは数 m から数 100 m、積乱雲での動きの空間スケールは数 10 m から数 km、自由大気での動きの水平空間スケールは数 km からそれ以上といったように、大気の現象の空間スケールは大変幅広い範囲に及んでいます。これらの広い空間スケールに及ぶ大気の動きのすべてをコンピュータで計算することは不可能で、ある程度粗い格子点間隔で計算するしかありません。ところが、空間解像度が粗いと、表現することができない動きも出てきてしまいます。

乱流拡散の一般的な数理モデルにおいては、ある微細な空間スケールよりも小さいスケールでは乱流の挙動が普遍性を持つということが大前提になっているのですが、大気の現実的スケールでの計算に用いられる解像度では空間格子点間隔が粗いのでその前提が成り立つことはなかなかありません。それどころか、対象とする領域に特徴的な大気の動きをも表現できないこともすくなくありません。物質の輸送の計算では、これらを、表現できない小さな動きの効果、すなわち、乱流の効果として組み込む必要があります。

ちなみに、乱流拡散の一般的な数理モデルを使った数値計算の手法をラージ・エディ・シミュレーション（英語の頭文字をとって LES）と言います。LES を行うためには格子点間隔が、乱流の挙動に普遍性を見いだせる（対象とする領域の特徴的な動きに依存しない細かな）空間スケールと同程度でなければなりません。気象シミュレーションの場合その空間解像度は極めて高く、数 m ~ 数 10 m となります。実大気現象を取り扱う場合には、LES を行うことはきわめて困難であり、実現へ向けての研究は積極的に進められつつありますが、まだまだ計算機能力が足りません。

● それでは乱流拡散の効果は気象の計算ではどう取り込むのですか？

乱流によるながれのパターンや乱流がもたらす効果の平均的な特徴を求めようという立場から乱流拡散の効果モデル化します。モデル化された乱流拡散係数の数式は様々な実験定数が含まれており、これら定数は室内実験や野外実験の結果と比較して決めることになりま

す。

たとえば、一定の流速中に円柱を置いたときのながれの変化を考えてみましょう。このときある程度の強さの流速条件であれば、円柱の周りで渦が作られ、その渦は円柱の下流側へと流され、一定の周期で渦が円柱の両側面から交互に下流へと放出される現象が起こったり、あるいは非周期的に乱れたながれが下流側で発達したりという状況が起こります。しかし、これをある長い時間で平均すれば、交互に渦ができるパターンや乱れが発達するパターンはならされてしまって、円柱を迂回するながれのみが残ることになります。

乱流拡散の効果は、このような平均的なながれの挙動を表現するために経験式と実験定数を用いて気象の計算に取り込まれることになります。従って、エアロゾルなど微粒子の混合比分布の予測は、気象の計算によると平均的な拡がり方しか原理的には求められないことになります。

言い換えますと、平均的な混合比分布を知りたいのであれば、その答えは気象の数値計算からある程度求められる、と言えるでしょう。ただし、求められた混合比は、計算格子の平均値であって、さらに一定の時間間隔での平均値となるわけです。また、コンピュータを用いた差分式の数値計算ですので、先に書いた通り、モデルで表現できる現象の大きさは解像度の5倍から7倍程度になってしまいます。つまり、求まる混合比の実質的な解像度は格子点間隔よりもずっと粗くなってしまいます。計算で求められた混合比分布は、時間的にも空間的にもかなり平滑化されたものとなり、観測データと比較する際には計算の実質的な解像度を勘案して検討する必要があります。

より普遍的な乱流モデルである LES による乱流拡散数理モデルを気象の計算でも採用することができれば、採用する空間格子点サイズに応じて混合比変化の細かい時間変動や微細なスケールでの空間分布も求めることができるようになるでしょう。しかしながら、現在の気象モデルでは、まだまだ空間格子点間隔が荒く、単純に格子点間隔を細かくすることはできません。表現できていない大気の動きの特徴を知って経験式と実験定数を組み込まなければならぬからです。

●今の気象予報の計算では、細かい地形の表現や建物など地面の凹凸は考慮されているのですか？

考慮されていません。気象に限らず、このような複雑地形や複雑地表面での乱流の計算が数100 m～数 km の領域で可能となってきたのはごく最近のことなのです。この空間スケールでの空気のながれの計算は、土木工学・建築学・風工学・機械工学の分野の研究者達が精力

的に研究を進めています。一方、気象の研究者達は、地球規模の大気現象からより身近なスケールにまで徐々に対象領域が小さくなっています。工学系の分野と気象系の分野のそれぞれの研究の発展によって、最近では両者の分野の協力でより現実的な気象状況での街区スケールの気流や拡散の計算もされるようになってきています。たとえば、<http://www.nagare.or.jp/download/noauth.html?dd=assets/files/download/noauth/nagare/28-1/28-1tokushu03.pdf>（竹見哲也，中山浩成，2009：微細規模大気流れの気象モデルと CFD モデルの融合解析。日本流体力学会誌「ながれ」，Vol. 28, No. 1, pp. 13-20.）はインターネットで参照できます。

第三章 SPEEDI について

これまで、大気中の物質拡散にまつわる流体力学の基礎とそれに基づく物質拡散予測の計算を概観してきました。本章ではより具体的に SPEEDI を（本執筆グループの知る範囲で）概観します。この章は技術説明となり用語がやや専門的になってしまいますがご容赦ください。

●SPEEDI って何ですか

SPEEDI は、緊急時環境線量情報予測システム (System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information) の略です。1979 年の米国スリーマイル島原子炉事故を契機に、日本でも原子炉事故対策を強化する必要があると認識され、一連の原子力緊急時対応研究が 6 年計画（1980-1985）中の主要課題の一つとして進められました。

SPEEDI 以前の放射性物質の移流拡散計算では、ガウスプルームモデルと呼ばれる手法が使われていました。乱流による風下での物質の拡散が正規分布に従うと仮定して広がり方をあらかじめ観測によって決めておくモデルです。煙突の煙が風でたなびいているイメージがあてはまるような静かな大気境界層といった気象状況下で用いることができます。静かな境界層では、煙突から放出された煙のイメージ通り、メートル (m) スケールの風の場合は乱れていて煙の幅はだんだん広がっていきます。この広がり方をガウスプルームモデルで表現します。しかし、より大きなスケールでの風の場合はあまり乱れておらず、おおむね風の方向に流される、という表現があてはまります。風の場合を与えることにより、おおむね風下数 km 程度の移流拡散を表現することが可能です（これより遠方になると大きなスケールの場のながれを予測しなければなりません）。

これに対し、上記 6 年計画における SPEEDI の開発では、日本特有の原発立地条件（海岸立地、複雑地形）を念頭に、3 次元移流拡散計算とその結果を用いた被曝線量計算を迅速に実施する計算シミュレーション体系のプロトタイプ構築が行われました。このプロトタイプをもとに、1986 年から、国内の原子力サイトを対象とした実用化整備が進められました。2005 年には大幅な機能向上が図られ現在に至っています。

●SPEEDI で計算していることは？

SPEEDI の計算内容は、風速場計算、移流拡散計算、被曝線量計算の 3 つの部分に大別できます。

風速場計算では、気象庁の全球数値予報（水平格子点間隔 20 km）による計算結果を入力と

し、水平格子点間隔 2 km の気象予測モデルによって局地風を計算し、さらに変分法を用いた内挿により細かい地形を考慮した風速場が 500 m 間隔で計算されます。

移流拡散計算では、この風速場を用いて放射性物質の広がり方が計算されます。降水による地表面への湿性沈着（凝結核となって水滴となり、あるいは、水滴に吸着されて地上に落下すること）や乾燥沈着（水滴を介さないで直接落下する）も考慮されています。

被曝線量計算では、地上に居る人の被曝線量が計算されます。実際には人は屋内待避したりあるいは移動したりしますが、ここで計算されるのは、屋外で同じ場所でじっとしていた人に対する被曝線量です。

● どんない移流拡散モデルが使われているのですか？

大気中の物質移流拡散を計算するモデルは、第二章で説明されているように、オイラー型モデルとラグランジュ型モデルに大別できます。

オイラー型モデルでは、風速場の数値計算モデルと同じ空間に固定した格子点を設定し、各格子点で表現される混合比の時間発展を、移流拡散方程式を差分化して計算します。ラグランジュ型のモデルでは、物質を多数の疑似粒子（物質が構成する実際の小さな塵（エアロゾル）とは違います）で近似し、この粒子の移動を追跡することにより移流を計算します。乱流の効果は、個々の粒子のランダム・ウォークとしてモデル化します。乱流拡散係数はランダム・ウォークの行程と関連づけられて決まります。

SPEEDI ではラグランジュ型モデルを用いて放射性物質の移流拡散を計算しています。原子炉事故のように物質放出点が、風速場を表現する格子点間隔に比べごく狭い範囲に限られている場合（点源放出）、オイラー型の移流拡散計算モデルを用いると、格子間隔程度の大きさで混合比が平均されてしまって濃度が見かけ上薄まってしまいます。これは、放出地点近傍で過大な拡散効果を与えることになり濃度や線量率の過小評価をもたらします。また、オイラー型モデルでは数値拡散と呼ばれる計算技術上の問題により、現実よりも速く拡散が進んでしまう場合があります。SPEEDI では、これらの問題を回避するために、ラグランジュ型モデルを用いて放射性物質の移流拡散を計算しています。

● 被曝線量計算ってどんな計算をするのですか？

被曝線量には外部被曝線量と内部被曝線量があります。

外部線量は、人体の外部にある放射性物質からの放射線による被曝です。これには、空気中を移動する放射性物質から出る放射線の寄与（スカイシャイン）と地表面に沈着した放射性物質からの寄与（グランドシャイン）があります。スカイシャインは、短い時間に大きな被曝線量を与える場合もありますが、時間積算的には地表面に沈着した物質からの影響が外部被曝の大部分を占めます。SPPEDI では、スカイシャインは個々の疑似粒子からの放射線量の和として計算されます。この時、ガンマ線の大気中での飛程が数百 m 程度であることを考慮し、地上から高度 500 m 迄の粒子からの寄与が計算されます。グランドシャインは、地表面沈着量から計算されます。

内部被曝は、体内に取り込まれた放射性物質による長期的な被曝のことを指します。体内への取り込み経路は、呼吸と摂食（水も含む）の2つがありますが、SPEEDI が対象とするのは呼吸により取り込まれる部分だけです。体内への取り込み量は、[吸引する空気の放射性物質濃度] × [呼吸量] × [係数] で計算されます。時間積分が含まれるため、瞬時濃度ではなく積算濃度が重要になります。これらの計算で用いられる[係数]は、ICRP (国際放射線防護委員会) がとりまとめた年齢別、核種別の係数を日本人の体格に合うよう修正した値が用いられています。

●放射性物質に特有な難しさはありますか？

放射性物質の場合は、放射性崩壊による放射能の減少を考慮する必要があります。しかし、この考慮は大気汚染物質の複雑な化学反応に比べると遥かに容易です。より厳密には、移流拡散の途中で生じた放射性崩壊の結果新たな物質が生成されますから、これらが放射性である場合にはこれを含めて計算対象とする必要があります。しかし、量的には元の放射エネルギーよりもずっと小さくなるのでSPEEDI では無視します。

●放射能の計算を行うこと以外に、SPEEDI はふつうの気象モデルと違うところがありますか？

SPPEDI の風速場計算部分では、気象庁の数値予報データである格子点値データ (GPV) を用いて、これをさらに細かい地形を考慮するために風速場の数値計算を行っています。そこで用いているモデルはおおむね通常の気象モデルと同じ、気象学の標準的な数値予報モデルです。ただし、現在のSPEEDI に実装されているのは、気象庁の最新のモデル（非静力学モデル）に比べると一世代古い、静力学モデル（大気は静水圧平衡にあるものとして鉛直加速度を無視し、水平加速度のみを計算することで計算量を減らしたモデル）とよばれるモデルです。WSPEEDI や WSPEEDI-II (SPEEDI-MP) では、最新の非静力学モデルを併用した計算システムも構築されています。物質の移流拡散計算に関しては、通常の天気予報モデルではオイラ

一型の計算（風の場の時間発展と同時に解く場合に効率が良い、厳密には全球モデルではセミ・ラグランジュ計算で、格子点での混合比表現とラグランジュ的移流計算とを行き来する）が行われますが、SPEEDIの移流拡散計算はラグランジュ型です。

●SPEEDIではどのような情報提供が行われるのでしょうか？

放射性物質の広がり方の予測計算に期待されるのは

- ①これまで放出された放射性物質が現在どのように分布しているかを推定する、
- ②推定した放射性物質が今後どの地域に移流拡散するか予測する、
- ③今後放射性物質が放出された場合それがどのように広がっていくか予測する

の三点でしょう。

①は、現況解析にあたります。過去に放出された物質の現状を推定する計算で、「昨日の夕方放出された物質は、今どこそこの辺りに漂っているはずだ」というような情報の提供です。②は①で推定した結果を基に今後の広がりを予測する計算で、たとえば「昨日放出された放射性物質は、今は海上にあるけれど明日は東風が吹いて陸上に戻ってきて、どこそこに××の被曝をもたらす可能性がある…」という類の情報の提供です。③は、今後の放出に関する予測計算であり、「今後1時間に放出された物質は北西方向に広がり最大で××[Sv]の被曝をもたらす可能性がある」というような情報の提供です。

①では過去の計算結果を引き継ぎながら継続しますが、疑似粒子が計算対象領域の外に出てしまった分についてはその後の挙動を追跡することができません。②③では新しい気象予測が入る毎に新しい拡散予測に置き換えられます。

これらの計算には放出源情報（物質、放出率、放出高さなど）の入手が決定的に必要・重要となります。放出率が分からない場合は、定常単位放出（1[Bq/s]）を仮定した計算を行っておき、後で放出率の推定値が与えられたときに放射性減衰を考慮した値付けを行うことがなされます。SPEEDIの公開データを見ると、初期には放出源情報が得られない状態で、定常単位放出を仮定して③の計算を繰り返し実施していたようです。

単位放出に基づく①の計算とモニタリング結果を比較して放出率を大雑把に推定することはできるでしょう。また、③を上手く使うと、たとえば「明日の明け方から陸風が変わる予測なので、この時ベントを行えば公衆への影響を最小限に抑えることができる」というような判断材料を提供することもできるでしょう（これは天気予報をどの程度信用できるか、と同じレベルの信頼性で信頼できると思います）。

そもそも SPEEDI は緊急時に対策本部や助言組織へ情報提供することを目的としていますから、これらの情報提供を行うことがその本来の姿だと言えます。

●SPEEDI によるシミュレーションはどのようにして検証するのですか？

移流拡散シミュレーションの精度を調べるためには、大気環境中に実際にトレーサー・ガスを放出しこれを捕集分析して混合比分布を得る大気拡散実験を実施して、この実験結果をシミュレーション結果と比較する方法がとられます。

海岸立地・複雑地形を対象としている SPEEDI に関しては、その開発と平行して 1980 年代前半に東海村と筑波山周辺で、工業的に使われている SF₆（六弗化硫黄）という無害なガスをトレーサーとして利用した拡散実験を実施し、計算結果との比較がなされました。この比較実験では海岸付近で発達する内部境界層により生じる燻し現象（fumigation）や、風向変化によるプルームの屈曲など大気境界層の諸現象が 3 次元モデルで表現できるようになったことが示されました。

1986 年のチェルノブイリ原子炉事故を契機に、世界的に放射能拡散シミュレーションへの要求が高まり、IAEA/WMO/CEC の主導により ATMES (Atmospheric Transport Model Evaluation Study) と呼ばれるチェルノブイリ事故を例題とした国際的なモデル検証実験が行われ、世界版に拡張された SPEEDI (WSPEEDI) もこれに参加しました。さまざまな指標を用いてモデル性能が評価されましたが、いずれの指標においても WSPEEDI は非常に高いパフォーマンスを示した、と評価されています。

また ATMES に引き続き、ETEX (European Tracer Experiment) という長距離拡散実験が実施されました。パーフルオロカーボンと呼ばれる人体に無害な物質をトレーサーとして用い、ヨーロッパの広い範囲で捕集が行われました。この実験と平行してブラインド・テストによる長距離拡散モデル相互評価が実施され、世界版 SPEEDI はここでも良好なパフォーマンスを示した、と評価されています。

でも、「高いパフォーマンス」あるいは「良好なパフォーマンス」という評価には注意が必要です。

●では、具体的にどの程度の精度を持っているのですか？

大気予測モデルで、結果が良く一致している、と評される場合の意味は、実験とシミュレー

シジョンとが何桁も一致するような物理実験や工学試験とは本質的に違うことに注意してください。

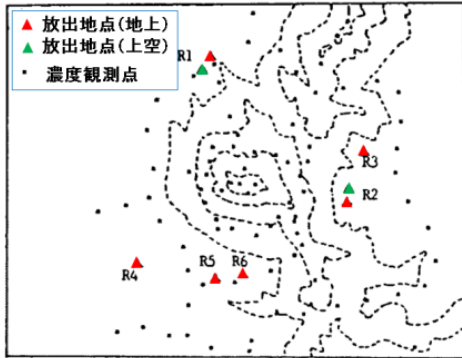
第一章、第二章に説明しましたように、物質の移流拡散を予測することは、そのカオス的性質上、観測と計算との完全なる一致は本来あり得ません。専門家は、この程度の空間分解能のモデルならこの程度の一致を見るだろうという予測の下に、数値計算のパフォーマンスを評価しています。

実際、大気拡散実験とシミュレーション結果の比較図を見ると、「エッこれで合っているといえるの？」と思う人が少なからずいるのではないのでしょうか。たとえ、物質拡散分布全体のパターンがよく似ている場合でも、観測値と計算値を散布図で比較するとバラバラに見える場合がほとんどです。

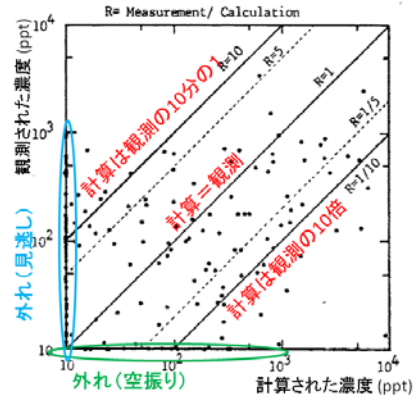
先に述べた ATMES や ETEX では、FCT2 とか FCT5 とかいう指標が使われました。これらの指標は、混合比の観測値と計算値を両対数で散布図にプロットし、プロットが 2 倍と 1/2 倍の間に入った割合、または 5 倍と 1/5 倍の間に入った割合を示します。図 3-1 に、筑波山周辺での拡散実験結果を例題とした初期の SPEEDI による検証結果、図 3-2 に WSPEEDI（世界版 SPEEDI の改良版）でチェルノブイリ事故を再計算した結果の例を示します。移流拡散モデルの精度とはおよそこの程度のもので、地点によっては 1 桁以上値が異なったり、あるいはトレーサーの到達を完全に外したりしています。

このような指標を用いた表現を行った場合、移流に係わる風速場の予測あるいは再現精度が大きく影響しています。一様な風が吹いているような単純なながれ場中での正規分布型の理想的な拡散を想定した場合を考えてみましょう。風向が 5 度異なっただけで、分布図では等値線の向きは 5 度ずれるだけで、全体的にはよく合っているように見えますが、散布図上のプロットは大きくばらついてしまいます。低気圧や地形の影響で風速場が一様でない場合（渦やよどみ点がある場合）はカオス的性質がより明瞭に現れてばらつきがもっと大きくなることは言うまでもありません。

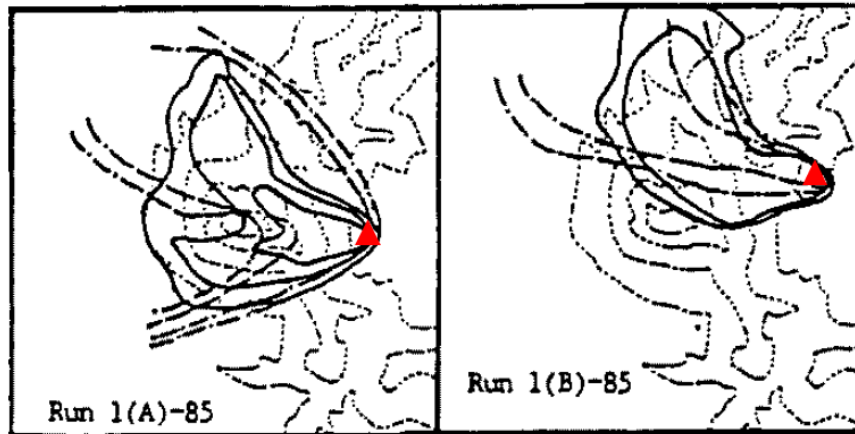
ではそのような予測をどうとらえたらいいのか、次章で説明したいと思います。



ガスの放出点と観測点の配置図



観測された濃度と計算された濃度の関係



計算されたガス分布のパターン(実線が濃度の等高線)と
観測されたガス分布のパターン(一点鎖線が濃度の等高線)の比較

図 3-1 筑波山周辺で行った SPEEDI の検証観測

Chino, M., Ishikawa H: Experimental Verification Study for System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information System: SPEEDI, (II) Simulation of field tracer experiment at isolated mountain, J. Nucl. Sci. and Technol., Vol. 25, 805-815 (1988).

**Improvement of Worldwide Version of System for Prediction
of Environmental Emergency Dose Information (WSPEEDI), (I)**
New Combination of Models, Atmospheric Dynamic Model MM5
and Particle Random Walk Model GEARN-new

Hiroaki TERADA*, Akiko FURUNO and Masamichi CHINO

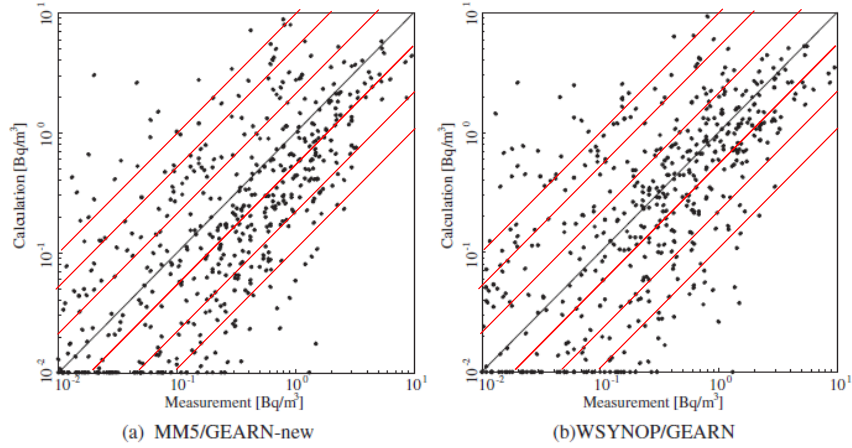


Fig. 6 Scatter diagrams of measured versus calculated surface air concentrations of ^{137}Cs for calculation results (a) by MM5/GEARN-new and (b) by WSYNOP/GEARN

Table 1 Comparison of model performances

| Models | Factor 2 | Factor 5 | Factor 10 | <i>R</i> |
|---------------|----------|----------|-----------|----------|
| MM5/GEARN-new | 32.2% | 69.6% | 84.6% | 0.638 |
| WSYNOP/GEARN | 39.5% | 68.8% | 82.6% | 0.630 |

R: Correlation of logarithm of concentration

図3-2 チェルノブイリを例題としたWSPEEDIの精度評価結果. 横軸が実測値, 縦軸が計算値.
評価地点は, 放出点から数百 km~2000 km 離れたヨーロッパの諸都市.

第四章 観測と予測： 気象の場合と放射線の場合

●コンピュータで予測計算した結果が現実世界の様子とどれくらい合っているのか、違っているのか、気になるところです。数値天気予報ではどうやって検証するのですか？

すでに第二章でも述べられていますが、数値計算によってよりよい予測をするためには、現在（初期）の状況をできるだけ正確に知る必要があります。数値天気予報の場合は、そのためにさまざまな観測手段を用いて気象要素（温度、風、気圧など）が調べられています。そのような観測システムとして、みなさんになじみの深いものとアメダスがあります。アメダスは日本国内約 1300 カ所に気象庁が展開している無人の気象観測装置です。ただしこれだけでは地表付近の情報しか得られないため、さらに上空の大気情報を得る目的で、コンパクトな気象観測機器をゴム気球に取り付けて飛ばし、測定データを電波で地上に送信するラジオゾンデという観測もあります。日本国内では 16 カ所で行われています。海洋上ではブイや船舶での観測があり、また民間航空機による上空の観測もあります。さらに、グローバルな情報としては、国際機関（WMO）を介し各国気象官署でデータがお互いに利用できるようなされている他、人工衛星の観測から得られる気温や風の情報も利用されています。

こういった多種多様の現況データは、厳しいデータ品質管理を経て予報の際の初期値作成に使われると同時に、それまでに予報した結果がどの程度当たっていたかどうかの検証のためにも用いられます。当たり外れを計測する数値的な指標がいろいろ考案されて、日々の予報成績が評価され、予報が外れる原因の調査に供されています。また、乱流拡散係数などいくつかの経験則に関わるパラメータ値の調整にも使われており、最終的にはモデルの改良につながっていきます。毎日の全球での過去何十年にもわたる観測データが蓄積されており、より良い数値天気予報モデルの開発に活用されています。

●それでは、放射性物質の拡散予測の場合はどうやって検証するのですか？

気象予報データをもとに単に拡散予測をするだけならば、放射性物質の放出源が特定されているので、そこで、何時、何が、どれだけ出るか、が分かれば、計算はできます。もっとも、放出時の放射性物質の高度分布を知ることが正確な予測には必須（第二章）ですが、それは観測するにしても推定するにしても容易なことではありません。一方、その拡散予測結果がどこまで正しいかどうかを検証するためには、拡散していく領域での面的な放射線観測が必要です。第三章では SPEEDI によるシミュレーションの検証について説明しましたが、我が国においても東海村と筑波山周辺で、無害なガスをトレーサーとしたフィールド実験が行われました。でも 100 km 四方に及ぶ広がりでのフィールド実験はそう頻繁にできることはありません。

日常的な観測では、残念ながらアメダスほどの観測点は存在していません。天気予報以外の理由で設置されている様々な気象観測データを活用することも原理的には可能ですが、アメダスのようにデータの質を確認されたデータであることを保証することは容易ではありません。



むしろ今回の福島原子力発電所事故が初めての本格的な実質的検証事例となるのでしょうか。発生以来特別に放射線量の詳細観測が多くの地点で続けられ、データが集められて、近隣地域の分布マップが作成されています（たとえば図 4-1）。これらは貴重な現況データであり、事故状況の全体像を把握し計画的避難区域等の設定など役立つことが多いでしょう。また、今の拡散予測モデルによる予測がどこまで正確だったのかを検証するのに利用できます。さ

らに、観測データを蓄積しておけば、今後、大気中の拡散に関する経験的パラメータを調整して、拡散予測モデルを精緻化するためにも活用できます。

●となると、天気予報計算のように検証されていない放射性物質の拡散予測計算は、現状では一般の人々には全然役に立たない情報なのでしょうか？

いえ、天気予報とまではいかないまでも、現状を表わしている観測データ（現況観測データ）と組み合わせて、活用することができる、そういうレベルには放射性物質の拡散予測計算もあると思います。

予測現況観測データを気象災害予測に活用している具体的な事例として、降水ナウキャストがあります。夏に積乱雲が発達する時など、気象庁では気象レーダーやアメダスで観測した雨量分布に基づいて、1時間先までの雨量をきめ細かく予報しています。強雨の詳細な現状把握が、都市型の洪水を防ぐための迅速な防災活動に役立てられているのです。気象庁では、降水のほかに雷や竜巻発生確度のナウキャストを行っています。

(http://www.jma.go.jp/jma/kishou/nowcast/kurashi/kotan_nowcast.html)

今回の事故の場合、放射線モニタリングに基づく現状把握が気象のナウキャストに相当しているでしょう。福島原子力発電所周辺域の放射線量測定マップや積算線量推定マップが公表されました（「政府関係からの重要なお知らせ」サイト <http://eq.sakura.ne.jp/> などからたどれます）。しかし、原子力発電所からの大気中への放射性物質放出が収まった現在の放射線量は地表面に沈着した放射性物質からの放射線（グランドシャイン）であり、大気中の放射能によるものではありません。大気中への放射能放出直後に線量率の増減が計測されるなら、これを用いてナウキャストができるでしょう。一方、公表されている放射線量の実観測と様々なモデル計算によって得られた地表面沈着量を比較すればモデル予測の不確実性を一般の人々にも感覚的に補ってもらえることができ、誤った判断をすることも防げるでしょう。

いずれにせよ、観測網の展開による現況の掌握がもっとも重要なことであるわけです。

●放射線現状把握と気象ナウキャスト、放射性物質の拡散予測と数値天気予報というふうに、今回の放射性物質の拡散に関わる問題を気象災害の防止軽減をめざす天気予報と対比させると、その認識を深めることができますね。

そうですね。身近な天気予報を例にとれば、情報の正確さ不正確さ、厳密には正確とはいえない情報の取り扱い、など、今回の事故に関しての情報をめぐる状況を認識するのが容易に

なるかもしれません。そういう気持ちで、観測や予測で扱う情報についてもう少し考えてみましょう。

たとえば、明日の天気予報といったときにみなさんはどういう情報が欲しいと思いますか？ 多くのおそらく、自分の家のその場所で温度を正確に予測して欲しいということまでは思っていないで、自分の住む市やあるいは県くらいの空間的な広がりを許容しながら、明日は暖かいのか寒いのか、また晴れるのか雨が降りそうなのかといった情報を知りたいと思っているのではないのでしょうか。これはまさに、アメダスの観測点が約 20 km 間隔で設置され 100 km くらいの空間スケールもつ現象を把握しようとしていることと対応しているといえます。実際、気温や風は一般にはアメダス観測点の間隔くらいの空間スケールではそう大きく変化することはありません。例外は、前線が通過する頃に気温や風が急変することがあるくらいです。

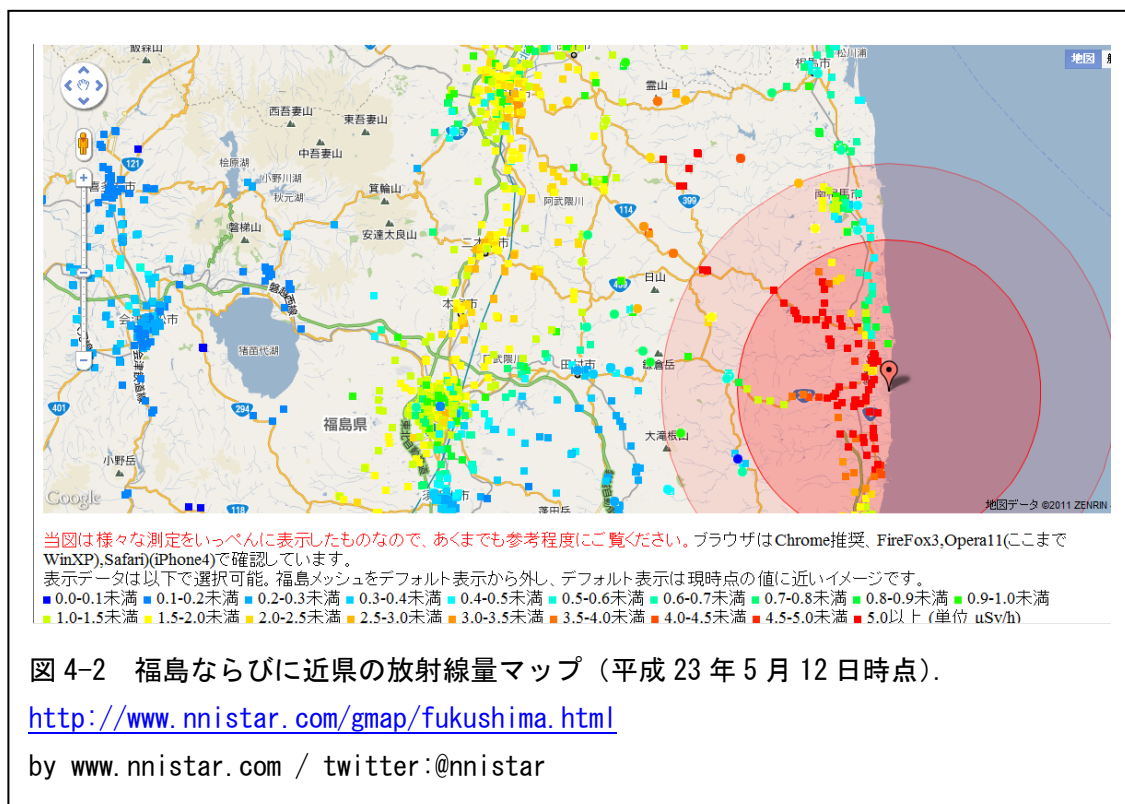
いっぽう雨についての予報はもっと難しくなります。広く雨雲に覆われていても、ある場所では雨が降っているのに、そこから比較的近い場所でも降っていないということがあります。激しい降水を伴う積乱雲では、その降水の境を 1 km もない空間解像度で認識できることもあります。しかし、個々の積乱雲がいつどこで出現するのかをちゃんと予測することは、限りなく困難（ほとんど不可能）です。これはぐらぐら煮立つ鍋のお湯で次にどこから気泡ができるかを予測するのに似ているのでしょうか。あるいは、第一章の線香の煙の例で、次の強い渦巻きがいつどこに現れるかを予測することと同様の困難さでしょうか。

このように現象のランダムさが卓越する状況では、確率的な手法に基づいて予報を行うことがあります。雨の場合には降水確率という言い方で予報がなされています。実際には温度の予測もばらつく可能性はあるわけですが、それはせいぜい予報値に対して 1 度高いか低いかという話なので、みなさんが欲しい情報としては特に取り立てて用いられません。このように、降水という大気現象が温度やながれの場の構造よりもずっと小さな空間スケールで起こりうる現象であるために、その正確な予測は難しく確率的にのみ意味を持つ予報情報として提供されているわけです。また、降水の場合は、ある地域で見て 1 mm でも降るか降らないかということと同時に、それがどの程度空間を埋め尽くすように降るのかということも問題になってきます。

●私たちが知りたい気象情報には、それぞれに関連する現象の空間スケールがあり、大きな空間スケールの目で見ると、空間スケールの小さな現象はランダムさが卓越する確率的な過程になるのですね。第一章では、分子拡散のスケール（1 mm 程度）から地球のスケール（10000 km 程度）までを一度に扱えるコンピュータは無いことを知りましたが、天気予報に使う数値モデルはどうなっているのでしょうか？

数値天気予報では、必要とする情報にあわせていくつもの数値天気予報モデルを使い分けています。台風や温帯低気圧、高気圧の動きや消長を予報するには、地球全体を覆うモデルで5～10 日程先まで計算します。計算機的能力には限りがあり、悠長に計算を続けていけば予報になりませんので、この種の数値予報モデルの空間水平解像度は 20 km 程に設定されています。一方、集中豪雨などのキメ細かな防災気象情報を出すためには、日本周辺域に限定して 5 km の高い解像度で表現できるモデルを用いて、1 日余り先までの予報を 3 時間毎に繰り返しています。これよりもさらに小規模で短寿命の局地的大雨や雷などの予報は、現況観測データに基づくナウキャストによって行われています。

つまり、それぞれのニーズに対応した大気現象があるので、それぞれの現象の予報に適した手法や数値予報モデルを使って、日々の天気予報が行われているのです。今回の放射性物質の拡散予測についても、必要とする情報が何であるか、そのために適した予測あるいは現況把握の手段は何であるか、数値予測モデルを使うならばどのような領域・解像度のモデルがふさわしいか、などを天気予報の数値モデルと同様に考えていかなければなりません。



●では、放射線分布の現況観測から考えるのでよいですか？ 100 km 四方あるいはもっと広い範囲でくまなく観測することは大変そうですが、どのような観測データ、分布マップがありますか？

図 4-1 は多くの地点での現地観測から描いた放射線量の分布図です。実際の観測地点ごとのプロット（図 4-2）と比べると空間分布がなめらかに表現されています。観測点分布には粗密があるのですが、数 km 離れただけで何倍も測定値が異なるところがあります。原子炉建屋の周囲では数十 m 離れただけで大きく線量値が異なっているはずですが、放射性物質が飛散し、地表面近くの大気の複雑なながれで移流拡散され、降雨により地面に沈着したと考えられるので、ズームインしていくとどんどん微細な構造が見えてくると想像されます。たとえば、遠くからぼんやり見えていた線香の煙に近づいて観察すると、細かな濃淡の分布が激しく時間変動しているところまで見えるように、図 4-1 のマップはそのようなばらつきを平滑化して数 km 以上の空間スケールの分布状況を示しているといえましょう。

このような平滑化の手続きを多階層現象の粗視化と呼ぶことがあります。広い領域の包括的な状態の把握には有効ですが、極大値の分布は見えなくなっていますので、利用目的によっては注意が必要です。逆に、ズームアウトしてもっと広い範囲の状況をより短時間で把握しようとする、飛行機などの機動的な手段を駆使した観測となります（図 4-3）。飛行機観測の空間解像度は地上観測よりも粗いですから、おのずと粗視化した描画となっています。

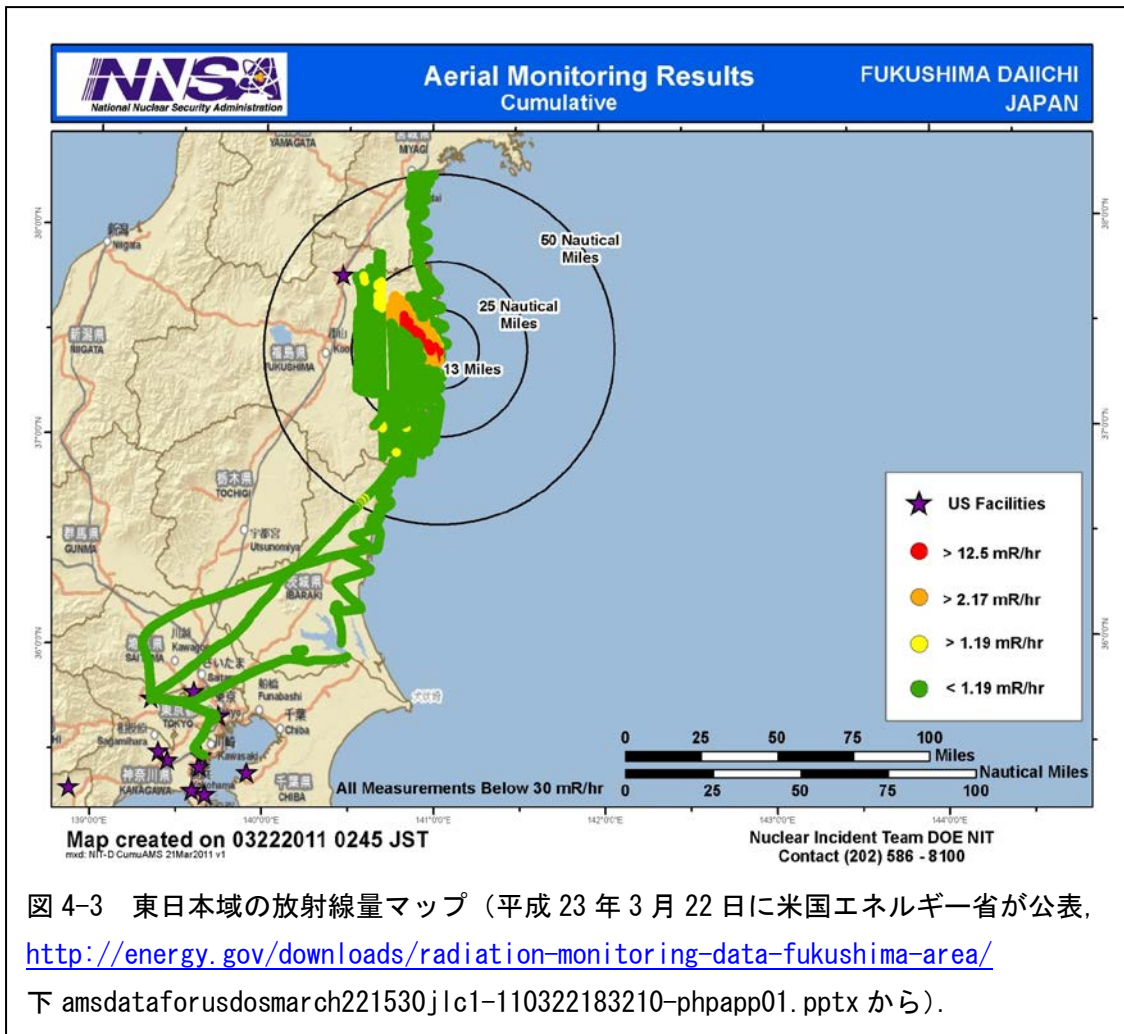


図 4-3 東日本域の放射線量マップ（平成 23 年 3 月 22 日に米国エネルギー省が公表，<http://energy.gov/downloads/radiation-monitoring-data-fukushima-area/> 下 amsdataforusdosmarch221530jlc1-110322183210-phapp01.pptx から）。

● 図 4-3 のように東日本の範囲で見ると、図 4-1、図 4-2 のように福島県の範囲で見ると、描かれている分布の空間解像度が 1 桁以上違うのですね？ 同様に、拡散予測の数値計算でも、興味の対象の空間スケールによって使う予測モデルの種類も違ってくるのでしょうか？ きっと、天気予報に使う数値モデルが目的によっていくつかあったように。

はい。発生源から数十 km 以内の短時間の移流拡散に焦点を当てた拡散予測モデルが第三章で説明した SPEEDI です。一方、気象庁は国際原子力機関（IAEA）の要請により全球モデルを用いた地球規模での放射性物質の拡散予測を行っていました。また、これらの中間の空間スケールを対象とするモデルに、WSPEEDI-II（SPEEDI-MP）があります。これらは我が国の関係各機関で何十年も継続して開発整備されてきた数値予測モデルであり、それぞれに一番完成度の高い放射線量予測モデルと言えます。順に見ていくことにしましょう。

● では、小規模短時間の移流拡散予測をおこなう SPEEDI の結果から解説してくれますか？

事故発生直後から、SPEEDI を用いた予測計算が1時間毎に3時間先まで（最初の頃は1時間先まで）行われています。ただし、放出源の情報が得られていないので、「単位量放出」を仮定した予測です。すなわち、1時間あたり1ベクレルの放出が1時間続いたと仮定して、放射性希ガスによる地上でのガンマ線量率（空気吸収線量率）と、大気中の放射性物質濃度の分布を予測計算しています。原理的には、実際の放出量がわかれば、その割合を予測結果に掛け算してこれらの実際の値を求めることができます。当然ながら、放出量がゼロならば結果の値もゼロです。

図4-4は、一例としてヨウ素の大気中濃度分布図を3月15日11時から2時間毎に4枚だけ取りだして並べたものです。この日は二つの低気圧が発達しながら日本域を通過中で（図4-5）、地表付近でも風向風速が時々刻々と変化していました。それに応じて、推定された放射性物質の流される方向や到達距離、拡がり方も時々刻々と変化しているのがわかります。

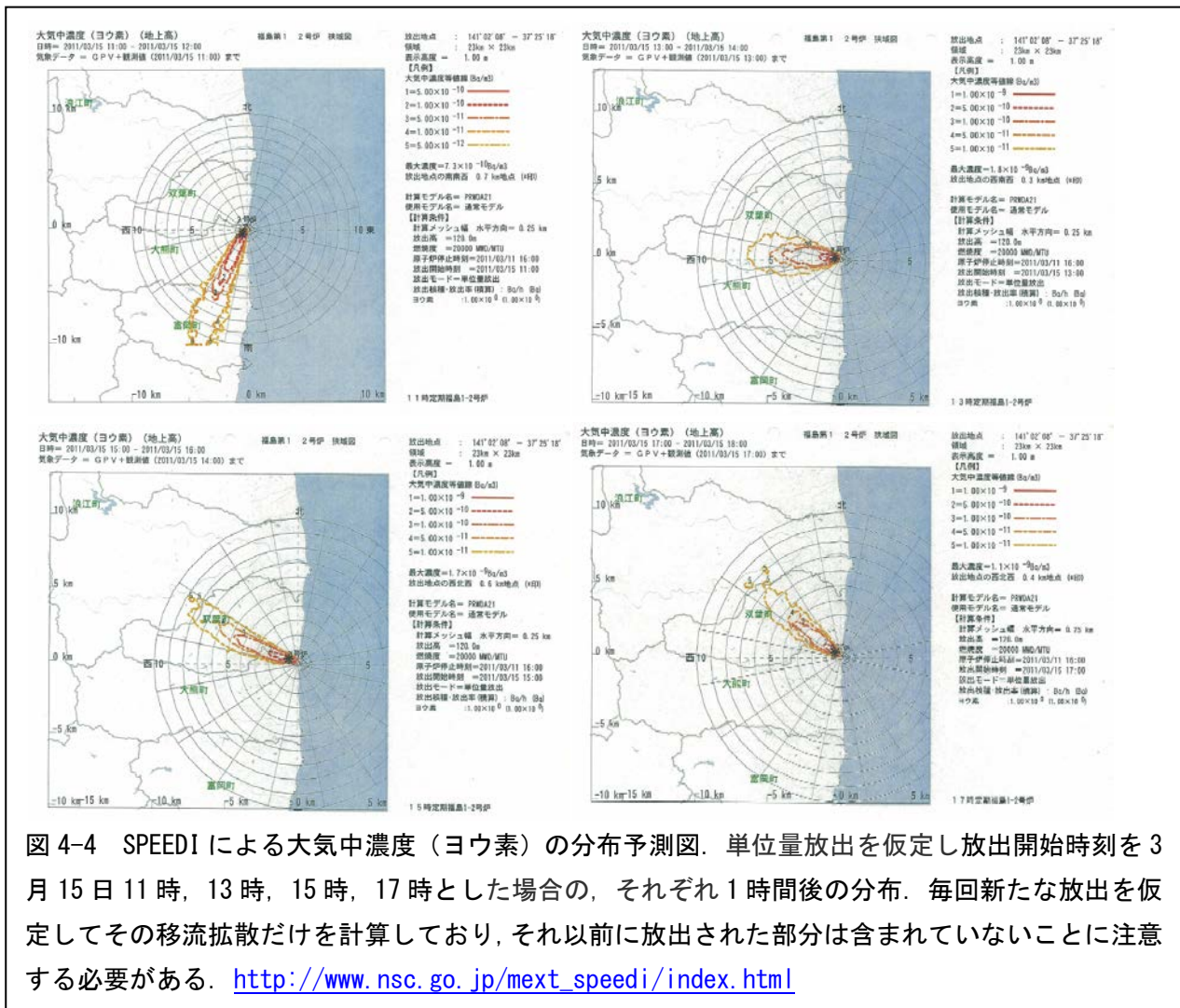


図4-4 SPEEDIによる大気中濃度（ヨウ素）の分布予測図。単位量放出を仮定し放出開始時刻を3月15日11時、13時、15時、17時とした場合の、それぞれ1時間後の分布。毎回新たな放出を仮定してその移流拡散だけを計算しており、それ以前に放出された部分は含まれていないことに注意する必要がある。 http://www.nsc.go.jp/mext_speedi/index.html

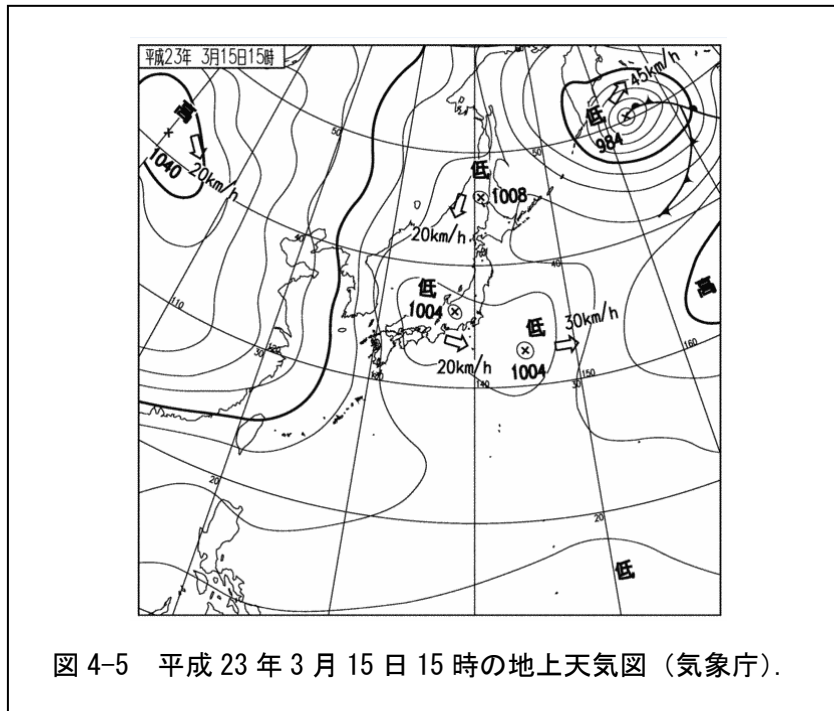


図 4-5 平成 23 年 3 月 15 日 15 時の地上天気図 (気象庁).

●でも、他の日のいつの時刻でも、似た傾向の図が並んでいますね。当然ながら、流される方向や到達距離、拡がり方はそれぞれ違うのですが・・・？

そうですね。1 時間後の影響範囲は、放出源付近の風速が 1 m/s なら 3.6 km 下流に、10 m/s なら 36 km 下流にまで到達する、という単純な計算で大枠はよさそうです。また、放出源の近くほど、そこを流されていく放射性物質の積算量が多くなるので、放射線量も高くなっています。一方、風下への拡がり方はこのモデルで解像できていないスケールの乱流の状態に依存しますので、日照や地表付近の風速分布、地表面の起伏や土地利用状況などに複雑に依存していると思われます。

SPEEDI では、気象庁が予報した 20 km 水平格子の 3 次元の気象場をもとに、さらに細かな地形情報を与えて 500 m の空間解像度で風や降水を予測します (第三章)。そして、それらの気象予測情報を元に放射性物質を流し、放射線量の予測を行っています。その際にモデル内部で気象場予測の空間解像度を 1 桁あげているのですが、より詳細な気象観測データは追加されていないことにも注意が必要です。すなわち、そのような空間スケールのながれ場予測には、より大きな不確かさが含まれることになります。

予報時間が長くなると、放射性物質が流されていく距離も長くなりますし、物質を流す気象場自体がどんどん時間変化していきます。そうすると、物質の移流拡散は、放出源付近の気

象要素だけでは想像もできなくなります。

●より大きな時間・空間規模を扱う次の階層のモデルが WSPEEDI-II でした。今回も東日本域を視野に入れた移流拡散予測の計算が行われたのでしょうか？

はい。図 4-6 は WSPEEDI-II による放射性物質拡散予測結果の実例です。連続した単位量放出を仮定し 12 時間後の分布を予測したもので、放出開始時刻を 3 月 15 日 1 時（左）および 16 時（右）とした結果です。二つの低気圧がちょうど東日本域を通過中で、図 4-4 で示したように 15 日正午頃に放出源付近の風向が北北東から南東へと変化しました。この時間帯を挟んで放射性物質が流れていく方向が逆転し、到達先も関東・東海地方から東北地方へと変化しています。

東京都新宿区では 3 月 15 日 4-5 時に $0.147 \mu\text{Gy/h}$ 、10-11 時には $0.809 \mu\text{Gy/h}$ の線量が観測されましたが、定性的には放射性物質が図 4-6 左のように流されてきて、それによる主として上空からのガンマ線（スカイシャイン）が観測されたと考えることができます。もっとも、そのタイミングはどうであったか、量的にどれだけあったか、他の地点では観測

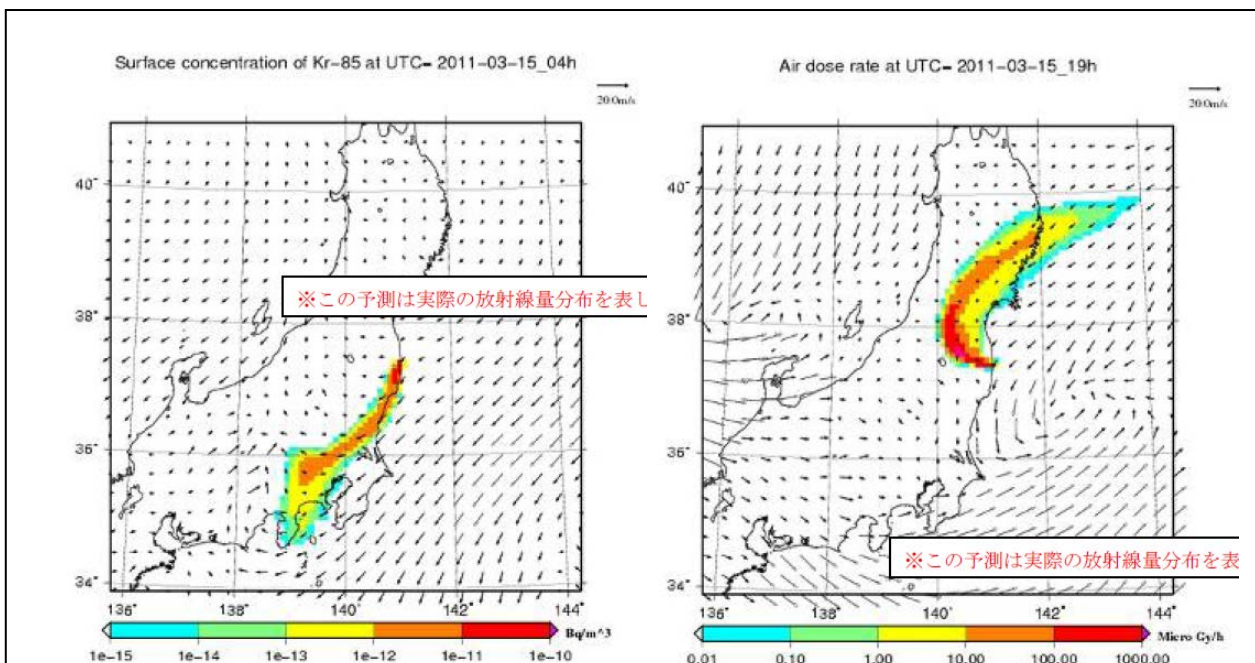


図 4-6 WSPEEDI-II による放射性物質拡散予測結果。単位量放出を仮定し放出開始時刻を 3 月 15 日 1 時（左）、16 時（右）とした場合の、それぞれ 12 時間後の分布。12 時間連続した放出を仮定。『※この予測は実際の放射線量分布を表しているものではありません。』

http://www.mext.go.jp/component/a_menu/other/detail/_icsFiles/afieldfile/2011/05/06/1305748_0315_06_1.pdf

http://www.mext.go.jp/component/a_menu/other/detail/_icsFiles/afieldfile/2011/05/06/1305748_0315_07_1.pdf

値との比較はどうであったか、等々、この予測モデルの詳細な性能検証が必要です。そして、そのような検証結果が、今後のこのモデルを用いた予測の信頼度を評価するうえで重要なこととなります。

●拡散予測モデルを改良し予測精度を高めるためには、いま観測され蓄積されている放射線データが貴重なのですね？これから SPEEDI モデルが活躍するような事態は決して望みませんが、冷静に次の起こりうる事態に備えることも大事だと思います。では最後に、大規模長期間の拡散予測の結果について教えてください。

はい。IAEA の要請をうけて、気象庁ははじめ世界のいくつかの気象予報機関では全球モデルを用いた地球規模での放射性物質の拡散予測を行っています。

(http://www.jma.go.jp/jma/kokusai/kokusai_eer.html)

図 4-7 は気象庁の WEB ページに公表されている予測結果の一例です。これらの計算結果は、IAEA が仮定した単位量放出の条件に基づいて計算されたものであり、実際に観測された放射線量等は反映されていません。また、計算の空間解像度は 100 km 四方と、避難活動等の判断にとって極めて粗い分解能で行われているものであり、このような結果は国内の対策には参考になりません。

数日のうちに放射性物質がどのように流され、拡散していくのか、まさに、IAEA が国際的

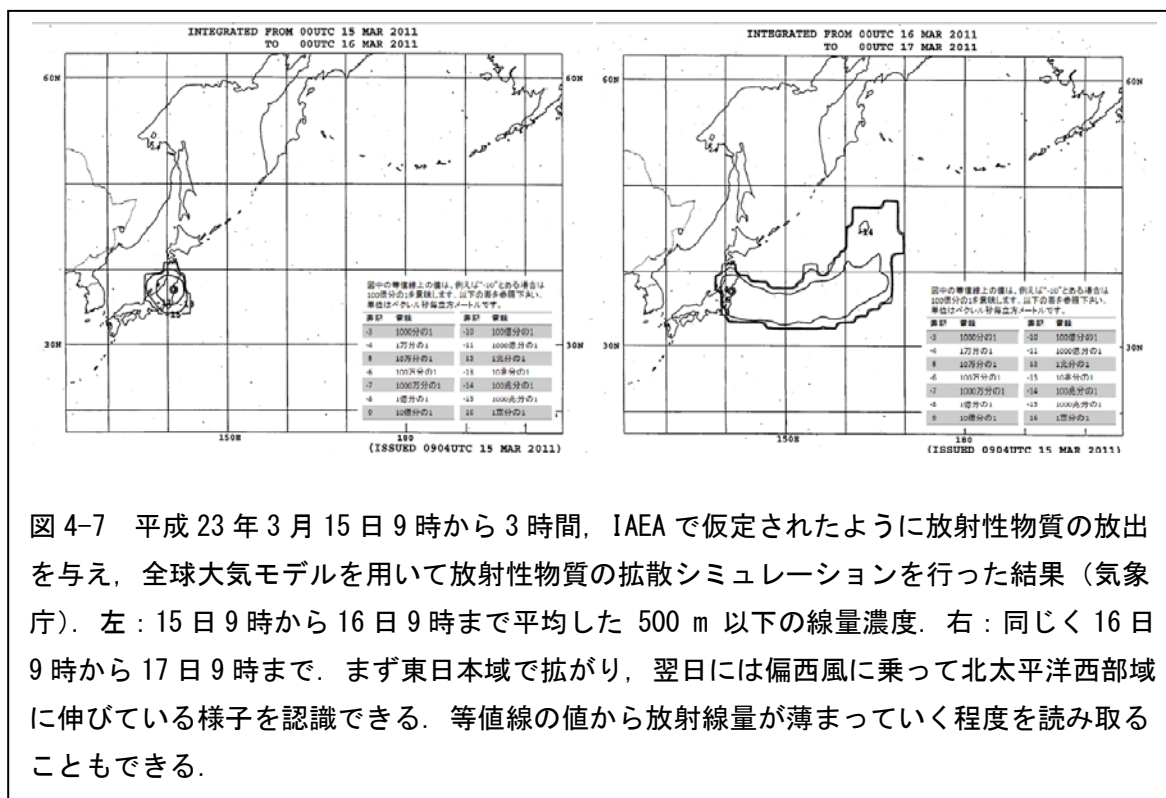


図 4-7 平成 23 年 3 月 15 日 9 時から 3 時間、IAEA で仮定されたように放射性物質の放出を与え、全球大気モデルを用いて放射性物質の拡散シミュレーションを行った結果（気象庁）。左：15 日 9 時から 16 日 9 時までで平均した 500 m 以下の線量濃度。右：同じく 16 日 9 時から 17 日 9 時まで。まず東日本域で拡がり、翌日には偏西風に乗って北太平洋西部域に伸びている様子を認識できる。等値線の値から放射線量が薄まっていく程度を読み取ることもできる。

な影響についての参考にするための資料といえるでしょう。このような空間スケールで関連する大気現象としては、温帯低気圧や高気圧の配置やそれと関連するジェット気流の蛇行などがあります。太平洋に流れ出た物質がアラスカのほうに向かうのか、カナダあたりあるいはハワイのほうに向かうのか、といった程度のおおまかな傾向が知りたいときには有効な情報となるかもしれません（3月15日ごろの温帯低気圧の通過によって汚染物質が対流圏中・上層に巻き上げられ全球に運ばれたであろうことを示す速報的研究論文は、日本の研究者によるものなら、たとえば、

http://www.jstage.jst.go.jp/article/sola/7/0/7_101/_article).

●今回、ヨーロッパのほうで似たような拡散予測のアニメーションがインターネットに公開され、日本でも大きな話題になったようですが、それらは有効な情報でしょうか？

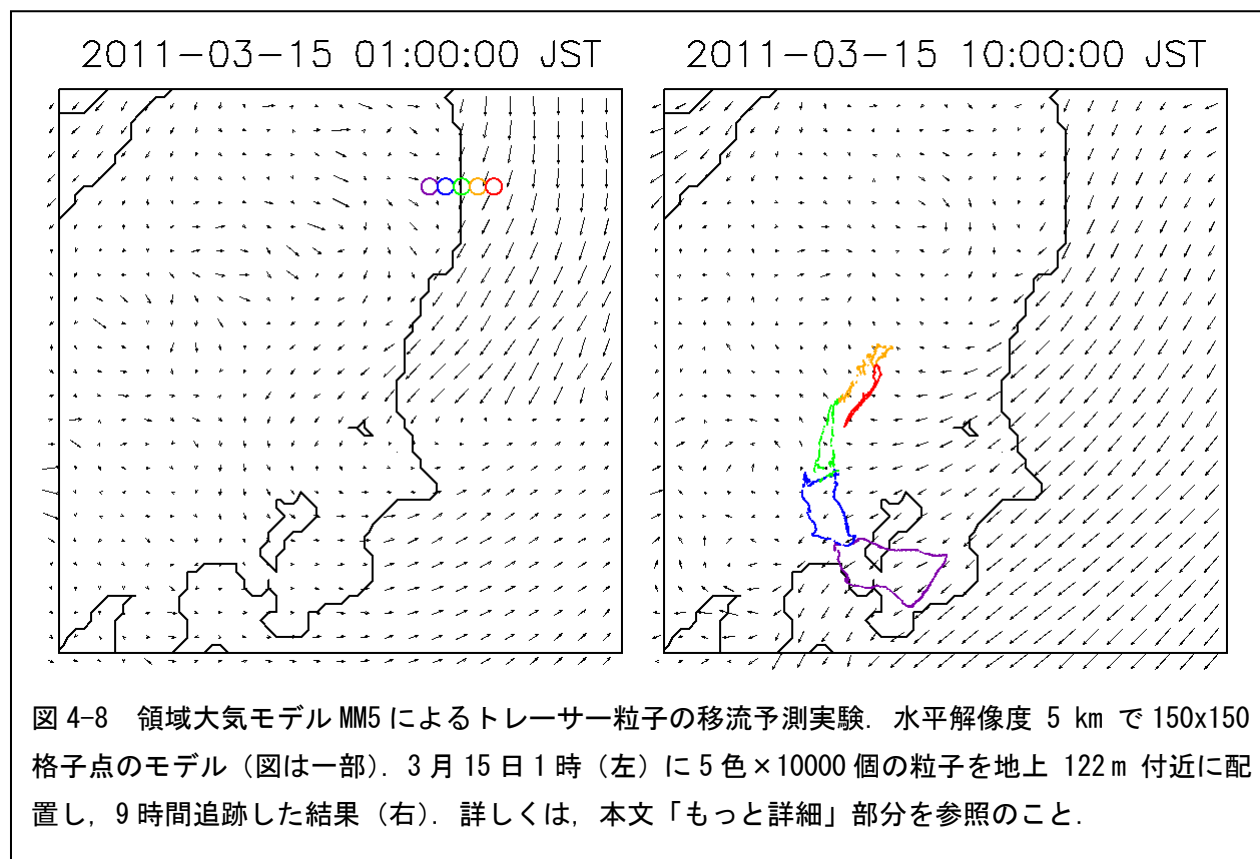
ノルウエー大気研究所 (<http://transport.nilu.no/products/fukushima>) やオーストリア気象地球物理中央研究所 (<http://www.zamg.ac.at/wetter/fukushima/>) で計算し公開してきた拡散予測の分布図やアニメーションですね（平成23年5月12日現在、ノルウエー大気研究所の予測は休止中です）。地図投影法や色付けが図4-7と違うので異なる印象をもつかもかもしれませんが、基本的に気象庁の拡散予測と同様の空間解像度をもつ全球モデルを使っているので、やはり日本での避難活動等の判断には参考になりません。また、単位量放出の仮定も他の拡散予測結果と同じです。

●最後の質問です。3月の爆発時には SPEEDI や WSPEEDI-II の拡散予測結果は公表されませんでした。今後、もしも放射性物質が大放出されたならば、これらの数値モデルによる予測結果が出てくるかも知れません。そのような時には、私たちはどう対応すればよいのでしょうか？

まず、考える対象の時間空間スケールに応じて、それに適した拡散予測モデルの情報を使うことが大事です。短時間で近距離域の対応には SPEEDI による予測を、半日一日程度で数百 km 範囲の対応には WSPEEDI-II の予測をということになります。既にお話したように、気象庁の全球拡散予測は国内の対策用ではありません。

短時間で近距離の予測については、放出源に関するリアルタイム情報が一番大切であり、大気中の拡散予測は第二義的であると考えます。このような場合には即時対応・対策が全てですから、SPEEDI で凝った予測をしようが同心円的に[風速]×[時間]で広がっていくと思おうが、大差はないでしょう。とりあえずは同心円的に危険を想定しているのが確かであり、暗算でもできる[風速]×[時間]の計算はより有効といえましょう。比較的静かな境界層条件のもと、時間的に定常な一般風が吹いている場合には、その風下方向に物質が広がっていく

ことが計算されるはずですが、その傾向の気象条件依存性・モデルにおける再現可能性はあまりよく検証されていません。実際に観測される放射線強度は、降水の有無とその状況に強く依存するでしょう。数値計算の結果は、現状の短時間気象予測のそれと



同様ナウキャストの考え方で利用する必要があります。福島的事例がそうであったように、放射線量観測を組み合わせ検証を進めつつ数値計算の結果は利用しなければなりません。

半日一日程度で数百 km 範囲の対応はどうかによいでしょう。WSPEEDI-II による移流拡散予測が速やかに公表されれば、数時間から半日程度の準備期間が確保できて、対応・対策をとることができます。では、WSPEEDI-II のようなメソスケールの拡散予測は、普通どの程度の確かさがあるのでしょうか。これも既にお話ししましたように、この予測モデルの詳細な性能検証が十分に行われてきたわけではなく、どれくらい信頼できるのか、どの程度の不確かさを含むのか、正直に言って良くわかりません。予測モデルの信頼性もほとんど公表されていません。

普通の領域大気モデルを用いて粒子運動のカオスがどの程度の不確かさをもたらすのか、具体的にお見せしておきましょう。図 4-8 は水平解像度が 5 km の領域モデルを用い、多数の

疑似粒子（トレーサー粒子）群を追跡した実験結果です。再現したながれ場は全く共通ですが、粒子群の初期位置がちょっと違ったら、その違いがどう拡大していくかを可視化しました。9時間後には、色付けした粒子群間の平均距離が5倍から20倍程度に拡大しており、紫の粒子群は千葉あたりですが、赤や橙の粒子群は栃木か埼玉あたりに達しています。これは位置に対する乱流拡散の効果を含めない計算の結果で、実際は初期配置がもっと近くてもこのような拡がりになると予想されます。発生源あたりで粒子群が、南にいか西に行くかというほどの違いは生まれないでしょうが、半日後に千葉に行くか東京に行くか程度の曖昧さは十分に生まれそうです。

問題をさらに難しくするのは降水のタイミングでしょう。図4-1や図4-3で知られているように放射線量は福島原発の北西方向に強い沈着が残された訳ですが、図4-4のSPEEDIによる計算結果では放射性物質が移流されたであろう方向は低気圧の通過とともに時計回りにぐるりと回転しており、あらゆる方向に沈着する可能性があったことは注意しておくべきでしょう。北西方向に強い沈着が見られたのは降水によるもので（山澤・平尾，2011：福島第一原発の大気を介した環境影響，日本原子力学会誌7月号，479-483；あるいは，日本原子力研究開発機構からの発表 <http://www.jaea.go.jp/02/press2011/p11061302/> 参照），地表面への放射性物質の強い沈着が降水にともなって起こることによります。放射性物質放出の初期値の不確定性，放射性物質の移流の不確実性に加え，その時刻位置での降水予測の不確実性がさらに加わるわけです。

結局、「そのような時には、どう対応すればよいのでしょうか？」に対する、我々の最終的な答えは「よくわかりません」でしかありません（少なくとも雨は危険そうですね）。不確かさを含む予測を基に緊急時にどう対応するかは大変難しい問題です。これまで述べてきた流体力学的な予測の限界による提言の困難さに加え、「安全」を確保するためには、放射性物質の拡散移流と沈着のことばかりでなく、交通や治安など多くの社会的要因も考えなくてはならないでしょう。福島原発事故に際し、諸外国がそれぞれの自国民に対して発した避難勧告は、状況認識の困難さや予測の不確実性を考慮し、かつ同時に、さまざまな社会的束縛を考えないで済む場合のもっともな解でありました。社会的にそのような退出が困難な生活者がどのように対応するのが個々やあるいは社会にとってベストなのか、そのような問に明快な答があるのかどうか、我々にも分かりません。

■ 気象と放射線の観測・予測についてもっと詳しいことが知りたい方のために

● 多種多様の気象データが数値天気予報に使われているそうですが、人のほとんど住んでいない地域や海上の観測はどうでしょうか？ 観測点の粗密はどうなっているのでしょうか？

図 4-9 は、気象庁の 1 週間予報である日ある時の初期値作成用に入力された観測データの全球分布図で、(a) 地上気象観測、(b) ブイによる海洋気象観測、(c) ラジオゾンデによる高層気象観測、(d) 航空機による非定時観測、(e) 静止気象衛星による上層風観測、(f) 極軌道衛星による温度・水蒸気観測、の観測点分布を示しています。地上気象観測は約 3 万点、ラジオゾンデ観測は約 650 点ですが、それらの観測点のほとんどが陸上にあり、地域による粗密も著しいです。ここ 10 年ほどで海洋中の自動ブイ（約 9000 点）や民間航空機による上層気象観測（約 7000 点）のデータが活用されるようになり、観測密度の粗密差を改善しています。しかし、何とんでも人工衛星からの観測点数が一番多く、地域差もほとんどありません。衛星観測データだけで何百万という数になり、全球の 1 週間予報にとって一番重要な観測情報となっています。

たとえば、ヨーロッパ中期予報センターでは、全球の 10 日予報の計算をする際に用いたデータとしてどんな観測データがあって、その観測点はどのように分布しているのかを毎日ホームページ上に公開しています：

<http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/monitoring/coverage/dcover/>

最初のページでは地上観測点の数と位置が表示されていますが、ページの左上にタブがあって、そのほかのさまざまなデータ源について見ることができます。こういった多種多様の現況データは、数値天気予報の際には初期値の作成に有効に使われると同時に、その予報がどの程度当たっていたかどうかを検証するためにも用いられています。

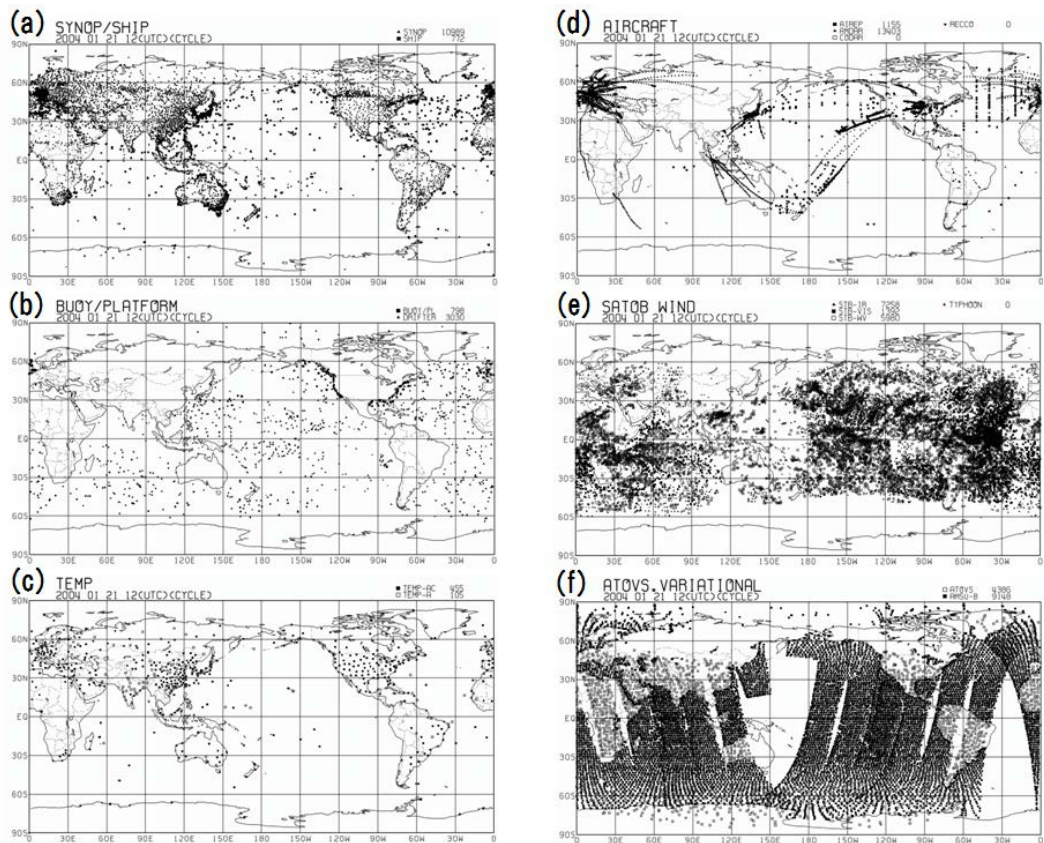


図 4-9 一度の全球解析に入力されたデータの分布図 (2004 年 1 月 21 日 12UTC ; 余田, 2004). (a) 陸上および船舶での地上気象観測, (b) 固定ブイ・漂流ブイによる海洋気象観測, (c) ラジオゾンデによる高層気象観測, (d) 航空機による非定時観測, (e) 静止気象衛星による上層風観測, (f) NOAA 極軌道衛星による温度・水蒸気の鉛直プロファイル観測. (注: ちょっと古い, 運輸多目的衛星が打ち上げ失敗して「ひまわり」がない頃.)

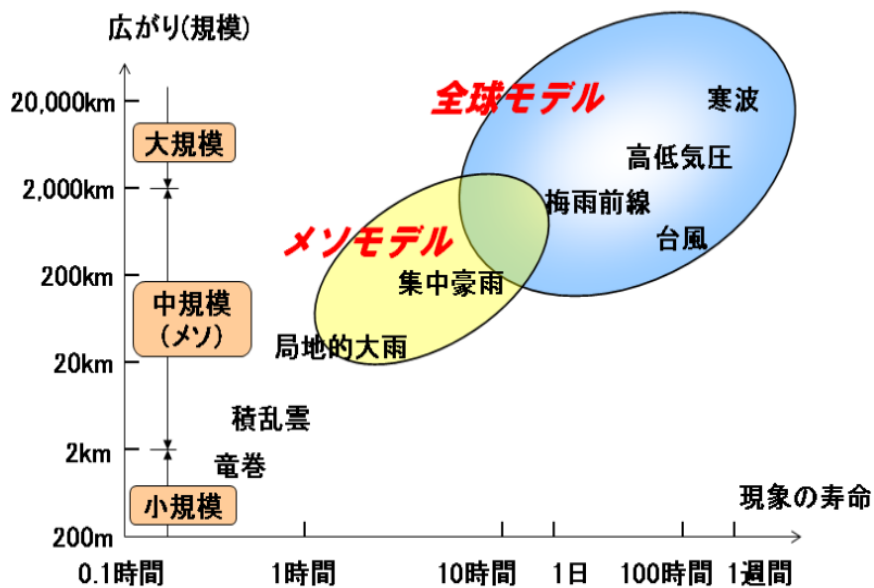


図 4-10 メソモデル・全球モデルが対象とする大気現象の水平及び時間スケール (気象庁, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-4.html>)

●日本域のアメダス観測網による時々刻々の詳細気象データから地球全体を覆う衛星観測データまで、多種多様の観測データが数値天気予報に用いられているのですね。皆さんが欲しい情報に合わせて、数値天気予報モデルも使い分けているとのことですが、具体的にはどのようなモデルがあるのでしょうか？

現在、気象庁が使っている主な数値天気予報モデルの概要を抜粋すると次の表になります。

| 予報モデルの種類 | モデルを用いて発表する予報 | 予報領域と水平解像度 | 予報期間 | 実行回数 |
|-----------|----------------------|-------------|--------|---------|
| メソモデル | 防災気象情報 | 日本周辺 5 km | ～33 時間 | 1 日 8 回 |
| 全球モデル | 府県天気予報, 台風予報, 週間天気予報 | 地球全体 20 km | ～9 日間 | 1 日 4 回 |
| 1 か月予報モデル | 異常天候早期警戒情報, 1 か月予報 | 地球全体 110 km | ～1 か月 | 週 2 回 |

<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-4.html> の資料より抜粋

ほかにも、台風用、1週間用、3か月・暖寒候期用のアンサンブル全球予報モデルがあります。図 4-10 は全球モデルおよびメソモデルが対象とする大気現象の時間空間スケールを示したもので、全球モデルは大規模で長寿命の大気現象（寒波、高低気圧、梅雨前線など）の消長を予報し、メソモデルは中規模で比較的短い寿命の現象（集中豪雨など）を予報します。小規模で短寿命の現象（局地的大雨など）の予報は、ナウキャストの領分です。このように、特徴的な時間空間スケールをもつ大気現象が階層性をもち連結しているため、それぞれの階層に合わせて予測手段を用意しています。

ここで、アンサンブル予報とは、大気運動のもつカオス的性質を考慮して予測の不確実性を制御する予測手段の一つで、観測から推定した初期値にわずかなゆらぎを加えて何十例の数値予報を繰り返します。その結果のアンサンブル平均をとることで、個々の予測例の誤差どうしが打ち消しあって、平均的な大気の状態がより正確に求められることを期しています。また、各予測例のばらつき度合いから、予測の信頼性を事前に評価することもできます。

●確かに、図 4-10 をみると、大気現象には階層性があり、それぞれの現象は代表的な時間空間スケールをもっているということがよくわかります。現象の空間スケールが大きくなるにつれて、観測するのも大変になってきますね。地球全体を対象とする天気予報の場合には、人工衛星からの観測が一番重要であるということもわかりました。

放射線観測でも、図 4-2 の福島県の観測点ごとのプロットと図 4-3 のさらに広範囲の

飛行機観測とを見比べると、相当に違った印象を持ちます。やはり、放射線の空間分布も階層性をもつ構造があるのでしょうか？ そのような階層構造をもつ対象を観測するとき、あるいはその観測データを見るときに注意すべきことは何でしょうか？

福島県域で実際に観測された放射線量を地点ごとにプロットしたのが図 4-2 でした。このプロットでは数 km 規模の分布のムラが認識できますが、ズームインしていくとどうなっていたか想像してみましよう。放射性物質が大気の複雑なながれに流されつつ、特に地表付近では乱流特有の入子状の渦構造でどんどん微細な分布ムラを作りながら浮遊していたことでしょう。空間スケールはともかく線香の煙のイメージに近いでしょうか。そして、それらが降雨により地面に沈着するときにも、降水の空間ムラもあったでしょうし、地表面の状態によって土壤に染み込んだり、水路に流れたり、・・・と、複雑な分布パターンが形成され、変化変遷していると想像されます。

このような放射性物質の空間的な拮がりに対して、相対的にまばらな観測では、その分布の正確な把握はできません。対象とする領域での本来の情報の量（それを把握するのに必要な情報の量）に対して、観測して得た情報の量が少ない時には、サンプリングによる誤差を考慮する必要があります。数値予測モデルでは格子点毎に与える値がその周囲の代表値平均値と考えましたが、現実世界の観測の場合には、たまたま測定をした点が周囲の領域を代表しているという根拠はどこにもありません。

気象観測の例をあげますと、数千 km の空間的拮がりをもつ低気圧や高気圧の配置を知るには 100 km 四方に 1 点程度の観測（およそ我が国の高層気象観測網の観測点密度）でも何とかできるでしょうが、その観測網で幅が 100 km もない前線の構造や動きを捉えることは難しく、さらに小さく短寿命の積乱雲内の運動状態の観測は不可能です。それぞれの対象にふさわしい観測機器を用いて、ふさわしい観測体制をとることが必要です。もっとも、沈着した後の放射性物質の場合、それらが時間とともにあまり動かない、空間分布パターンがほとんど変化しないので、その点だけは一般の気象観測に比べて容易なところといえましよう。

一方、十分な空間密度で観測値があり、必要とされる空間解像度で平均値が求められるならば、細かなばらつきを平滑化してその空間スケール以上の分布だけに注目できます。図 4-2 のような素データから図 4-1 のような滑らかマップを作ることは、ある特定の空間スケール以上の現象だけに注目することであり、この平滑化の手続きを多階層現象の粗視化と呼ぶことがあります。図 4-3 のような飛行機観測の場合には、高速で移動しながら継続して観測すること自体が、平滑化の一方法になっているともいえます。

しかし、つねに平均値がその領域を代表する値であるべきかどうか、は問題の性質にも依存します。安全側の予防措置原則によるならば、今回の放射線分布の場合には、格子間領域ごとの平均値よりも最大値の分布（つまり2次元分布の包絡面）のほうが重要でしょう。

●大気現象でも放射線分布でも、空間的に階層構造がある状況では、具体的にどのような対象を扱うかを決め、それに合った粗視化を行って観測データを見ることが大切なのです。それはちょうど、その対象の予測モデルを作るときには、それにふさわしい空間解像度を選ぶのと似ている気がします。

ところで、これまでずっと観測データは正しいと仮定して、その空間代表性を中心的に考えてきましたが、観測データが持つ不確かさもあるのですよね。測定した値そのものも正確さ、あるいは信頼度についてはどのように考えればよいのでしょうか？

はい。気象観測に限らず、あらゆる測定にはその測定に伴う誤差が含まれます。測定値の正確さについて考えてみましょう。精密度（精度）と正確度（確度）という、2つの確かさがあります。

●「精密度」と「正確度」とは何か似た単語ですが、当然違う概念なのです。どんな計測機器で測った値にも誤差があるということは物理学実験で学びました。そういえば、インフルエンザにかかった時に同じ体温計で何度か測り直すと、読み取った体温の値が毎回少しずつばらついていくのを思い出しました。

精密度（精度）とは、その複数回の測定値の間での互いのばらつきの程度の尺度のことで、このばらつきの程度をランダム誤差といいます。これに対して、正確度（確度）とは、その値が「真の値」にどれだけ近い値であることを示す尺度で、その大きさを系統誤差といいます。

図4-2の放射線量マップのもとになった一つ一つの測定には、用いられた測器や測り方によって、これらの誤差を含んでいます。気象観測の場合には、災害の防止に利用することを目的とするならば、観測方法を統一して一定の正確度を担保するために、「検定」に合格した気象測器を使用することが法律で義務付けられています。かつては桜の開花も気象庁が指定した標本木の観察をもとに開花宣言が出されるのみでしたが、近年はインターネットや携帯電話を活用した一般参加型の桜開花の「観測」が日本列島を覆うようになりました。多くの人が主体的に参加し季節感を共有するとき、少々の「観測誤差」は問題にはなりません。桜前線の情報は、例え不確実な観測誤差（ある日すっかり見忘れたとか）を含んでいても災害の防止とは無縁でしょうから。

しかし、今回の放射線量の広域観測はどうでしょうか。公表されるデータは国民の安全・安心に直結するものですから、両方の誤差を抑えた観測が大事でしょう。資格をもつ測定技術者が整備された測器を用いて、それぞれの測定誤差に対する配慮を十分に行って線量測定を行うことが基本です。素人が簡易型線量計で測った誤差の多い測定値を公表することは、どこまで意味のあることでしょうか。日なたでアルコール温度計を用いて測った「気温」をもとに、もう 50℃を越えましたと報告するのは、混乱を招くだけで単純に良くないことだと思います。

●これまで観測値の空間代表性や測定誤差など、現況観測データの不正確さに関わるお話が中心でした。一方、毎日の天気予報でも当たったり外れたり、予測が完璧なわけはありません。予測の不正確さ、信頼度については、どう考えればよいのでしょうか？

はい。実際、比較的予測がよく当たるときと予測がなかなか難しいときがあります。たとえば、気象庁の出している天気予報でも週間天気予報のページを見ると、「信頼度」という欄があって、A：確度が高い予報、B：確度がやや高い予報、C：確度がやや低い予報という情報が付加されています。夏にすっぽりと太平洋の高気圧に覆われる時期とか、明瞭な寒冷前線が西から近づいてくるときとか、予測が比較的よく当たる時期もあれば、ちょうど川のながれの淀みのように変化の様子を捉えにくく、予測がなかなか当たらない時期もあります。

このような天気予報の当たり外れは、実は大気運動のカオス的な振舞いに密接に関連しています。気象学の分野では、過去 50 年以上にわたりその時代その時代の最先端コンピュータを駆使して数値天気予報の技術を開発し実用化してきましたが、その歴史の中で、エドワード・ロレンツ博士によるカオスの発見（1963 年）や 1990 年代に進展したカオス的な振る舞いの理解に基づくアンサンブル予報の開始など、予測の不確実性の問題に挑み続けてきました。上の週間天気予報の信頼度も、実は、カオス的な性質の理解を深めることによって不確実性を伴う予測の情報価値を高める手法の一つなのです。

●カオスですか。第一章では、乱流には、ある時刻のちょっとした違いが時間と共に急速に大きくなって後の時刻の様子が全く変わってしまう、という性質があることを知りました。そのような不安定な運動をカオスと呼んだのですよね？

大規模な大気運動のカオスは、乱流ほど速やかに予測が不可能になるわけではなく、全球予報では予測限界が来るまでに 1 週間前後の時間的余裕があります。そのタイミングの遅い早いを前もって推定し、週間天気予報の信頼度 A~C を付けているのです。

ある時刻のちょっとした違いが時間と共に急速に大きくなる、という具体例ですが、実は、

図 4-8 で既に示していたのです。それは、水平解像度が 5 km の領域モデルで多数のトレーサー粒子群を追跡した実験結果です。

粒子群を配置した時刻は 3 月 15 日 1 時で、放出源に最も近い格子点を中心に半径 5 km の円周上に等間隔に 10000 個の粒子を地上 122 m 付近に配置しました（図 4-8 左の緑粒子）。そこから西に 10 km, 20 km, 東に 10 km, 20 km 地点を中心として、同様に半径 5 km の円周上に紫, 青, 橙, 赤の 10000 個ずつの粒子を配置しました。そして、時々刻々変化するながれに流されていく 50000 個の粒子群を追跡し、9 時間後の位置を示したのが図 4-8 右です。ここでは簡単のために格子間隔以下の乱流による拡散の効果はゼロとしています。初期に 10 km ずつ離れていた粒子群間の平均距離が 5 倍から 20 倍程度に拡大しており、紫の粒子群は千葉あたりですが、赤や橙の粒子群は栃木か埼玉あたりです。また、個々の色の粒子群は水平に拡がって（この高度域の空気塊は鉛直には縮みながら）おり、その度合いも初期位置に依存しています。

再現したながれ場は全く同一なのですが、粒子群の初期位置がちょっと違っているだけで、その違いが時間とともに指数関数的に拡大しており、粒子運動自体がカオスの基本的性質もっています。

●混乱してきました。週間予報の A~C は、気象場がちょっと違うとその差がどうなるか、という例で、簡単には現実大気の時間変化とモデル予測の時間変化がどんどんずれていくのですね。それに対して、図 4-8 の粒子群は、ながれ場は同一だから、各粒子の運動則は同じでも、初期にちょっと違うところにおけば、どんどん違うところに流れていくのですね？

説明が下手で申し訳ありません。第一章でも述べた「二重のカオス」の性質を示したかったのです。図 4-8 の矢印で書いたながれ場自体、ちょっとだけ初期値を変えて予測計算をすると、その差がどんどん拡大していきます。それぞれのながれで粒子群を追跡すると、図 4-8 の状況よりもさらに離れていくのが二重の意味です。

●ながれ場のカオスと粒子運動のカオスの違いは、徐々にわかってきました。放射性物質の拡散が粒子運動のカオスであるのはよいとして、何かこれまでの手法や考え方が役立つようなことはあるのでしょうか？ 現実の福島に立ち戻ってなにか言えますか？

そうですね。放射性物質の拡散予測の難しさについてはそうだとし、情報が欲しい側の立場からいうと、自分の住む町、極端な話自分の家の建っているところに高濃度の放射性物質が運ばれてくるのかこないのかが知りたいわけです。だけど、それは現代の科学によっても

予測には限界がある.

しかし, 降水確率のように, 雨が降る場所の不確定性を承知した上で, 確率的にその存在量を表現できる可能性はあります. 今後, 放射性物質の拡散予測に当たっては, 確率的な不確定性を含んだ形での予測の表現方法が必要になってくるものと思われます. ながれ場のカオスの問題に対して, アンサンブル予報で不確実性を伴う予測の情報価値を引き出そうとしたように, 粒子運動のカオスにも何かそのような手法が考えられないかと思います.

履歴

| | |
|------------|---|
| 2010/09/11 | 公開版 |
| 2010/09/14 | 字句訂正 |
| 2010/09/15 | 字句訂正 |
| 2010/09/17 | 字句訂正 |
| 2010/09/21 | 図 2-1 キャプション訂正（「30 時間一定量の物質を放出」ではなく「瞬間に放出」でした）、字句訂正 |