

汚染物質の乱流拡散について

吉田 恭

筑波大学数理物質科学研究科

2011年3月17日、2011年3月30日追加

1 はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により福島第一原子力発電所事故が起き、そのため汚染物質（放射性物質）が周囲に拡散されることが懸念されている。汚染物質は、風の主流（平均流）によって運ばれて、風の乱れ（乱流）が主な原因で拡散される。そこで乱流拡散の効果がどれくらい見積ってみることにした。概念的な理解が目的で、簡便のために様々な仮定をしているので、大まかな見積りであることに十分注意されたい。実用（実際の避難措置）に関しては、様々な要素を経験則を含め定量的、総合的に判断できる専門家の意見を参考にされたい。

2 乱流拡散の範囲

ここで重要な概念は2粒子拡散である。初期に近接していた2つの粒子が時間 t 後にどれだけ離れているか、ということである。Richardson 則によれば、2つの粒子の距離の平均値 $\Delta(t)$ は、

$$\Delta(t) = C^{1/2} \epsilon^{1/2} t^{3/2} \quad (1)$$

で与えられる。ここで ϵ は単位時間、単位質量当たりのエネルギー散逸率、 C は無次元の定数である。大まかにエネルギー散逸率 ϵ は乱流の強度を表していると思ってよい。Brown運動などの場合は粒子の速度に時間、空間相関が無く $\Delta(t) \sim t^{1/2}$ となるが、乱流場では相関があるので(1)のように $\Delta(t) \sim t^{3/2}$ となる。

一様な平均流の速度を U とすると、物質は時間 t 後には流出源から風下 Ut の地点を中心に直径 $\Delta(t)$ の円領域に広がっている、と大まかに見てよい。濃度は $1/\Delta^2(t)$ に比例して薄まる。ただし、ここでは鉛直方向の拡散、物質が重力の影響で途中での地面に落ちて吸収される効果などは無視している。勿論、円の中心部の方が濃度は濃いし、円の外で濃度0ということはなくある程度は拡散している。風下に距離 x での物質の濃度 ρ は大体

$$\rho \propto \frac{1}{\Delta^2\left(\frac{x}{U}\right)} \sim \frac{U^3}{\epsilon x^3} \quad (2)$$

と見積られる。距離 x が離れているほど密度 ρ は下がる。 ϵ が大きい（乱流が強い）と密度 ρ は下がるが、平均流の速度 U が大きいと密度 ρ は上がる。

3 簡単な見積り

ここで、やや強い風として $U \sim 10$ [m/s]、大気乱流の測定 [1] から $\epsilon \sim 0.08$ [m²/s³]、定数 C は実験や理論で $0.5 \sim 5$ とばらつきがあるが [2]、 $C \sim 1$ として拡散領域を見積ってみる。その結果が図1である。この円

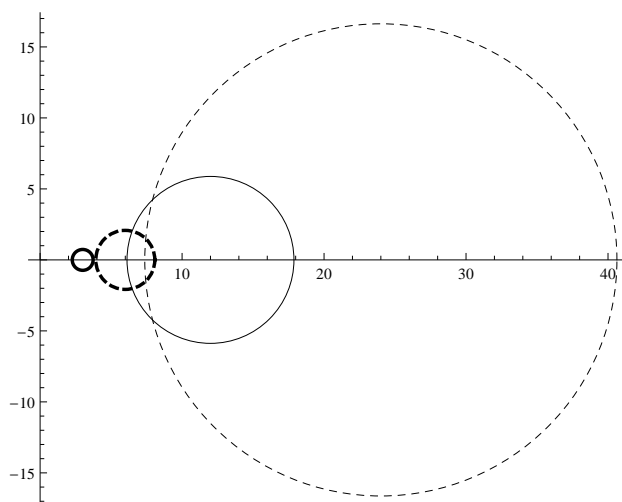


図 1: 物質の乱流拡散による拡がりかた。平均流風速 $U = 10[\text{m/s}]$ 、エネルギー散逸率 $\epsilon = 0.08[\text{m}^2/\text{s}^3]$ 、定数 $C = 1$ の場合。流出源は原点。風向きは横軸正の方向、目盛は km。円の直径は平均拡散距離 $\Delta(t)$ 。太線 (5 分後)、太点線 (10 分後)、細線 (20 分後)、細点線 (40 分後)。濃度は大体円の面積に逆比例。無論、円の中で密度は一様ではなく中心の方が濃くて円の外でもある程度の密度はある。

の大きさは目安であり、2 ~ 3 倍のずれは気にしない大らかなものである。また先述のとおり、円の中心部の方が濃度は濃く、円の外で濃度 0 ということはなくある程度は拡散している。

4 考察

汚染物質がある程度の時間出続けることと風速がかなり速いことを考えると、何分後に汚染物質に触れるかはあまり重要ではない。むしろ汚染物質に触れる濃度の方が重要であろう。それはどの大きさの円に最初に触れるかで大体決まる。風下より風上の方が安全なのは図を見てのとおり。ただし、図には示されていないが、さらに時間がたてば風上にも物質は拡散される。現実的には平均流の風向は時間変化するので、流出源の近くはどの方向にいても危険だろう。

一般に、(2) から乱流拡散が効かないと特定の方向 (風下) に狙い撃ちで高密度で長距離に届くことになる。例えば、風が人がいない海に向いていると決まっているなら乱流拡散が効かない方が望ましい。しかし、風がどちらを向くか分からないときは、乱流拡散が効いて全方向の傷み分けということの方がいいだろう。

再三のことながら、ここでは、(1) が使える条件を満しているか、 C, ϵ, U の見積りは妥当か、鉛直方向について、汚染物質が重くて風に乗らないで地面に落ちる場合、など様々考慮していない要素があり、あくまでも概念的な大まかな見積りであることに留意してほしい。また、流出源からどれだけの量の物質が流出しているのか、どれだけ薄まれば安全か、などの定量的情報が無いと、避難などの実用上有益な情報にはならない。更に、拡散された汚染物質 (放射性物質) がそこから放射線を出すなどは、また別の話である。

5 空中の放射線量測定データとの比較

前節までを書いた後、全国各地時々刻々の空中放射線量の測定データが得られている。文部科学省 [3]、宮城県 [4] で公表されているデータおよびそれらをまとめたサイト [5] を用いて、横軸に測定点の福島第一原子力発電所からの距離 x 、縦軸に測定点での空中放射線量として両軸対数プロットしたのが、図 2 である。放射線

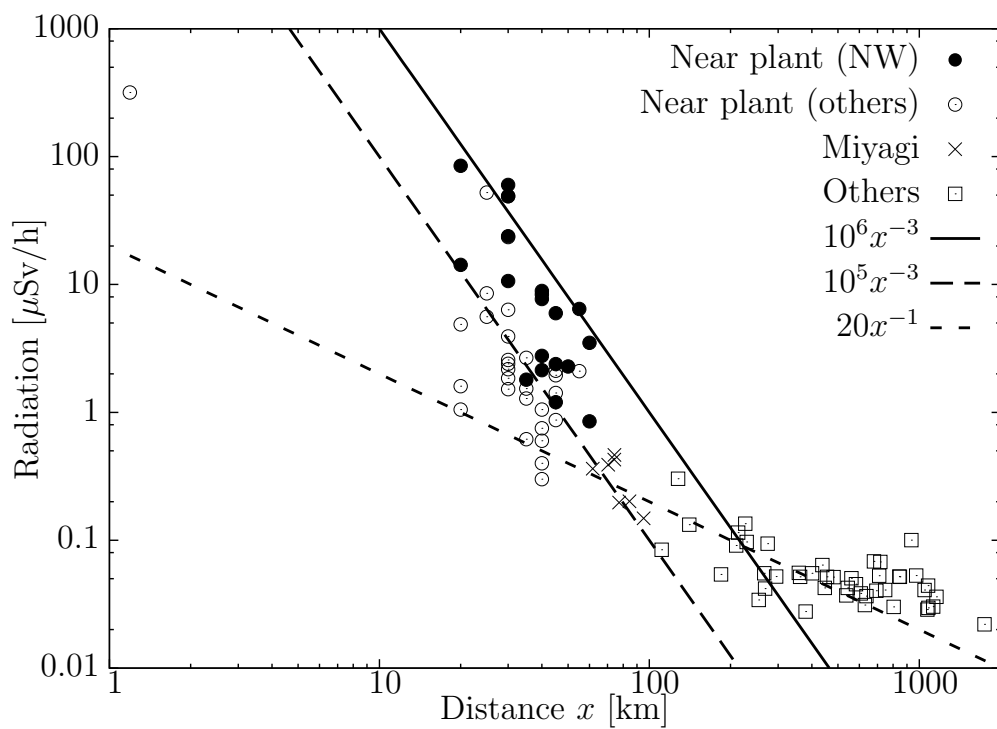


図 2: 福島第一原子力発電所からの距離と空中放射線量の関係。横軸は測定点の原発からの距離 x 、縦軸は測定点での空中放射線量で両軸対数プロット。放射線量は、3月22～28日各日の最大値を平均したもの。●は原発付近で原発から北西にある測定点、○は原発付近のそれ以外の方角にある測定点、×は宮城県内の測定点、□はそれ以外の全国の測定点。実線と破線は(2)と整合する傾き $\propto x^{-3}$ 。点線は全方向一様に拡散した場合の傾き $\propto x^{-1}$ 。

量は、3月22日から28日までの1週間で各日の最大値を平均したものである。ここで測定される放射線の多くは、継続的に原発から流出されて測定点を過ぎ去る放射性物質から出ているというより、ある時（おそらく15日の夜）に大量流失され落下してそこに滞っているものから出ていると考えるべきであろう [6]。つまり、過去の拡散の履歴を重みつきで積算した記録と考えられる。

図2より、距離20～100kmあたりの範囲で(2)の x^{-3} 則に近い傾向が見られる。この傾向に従う測定点は放射性物質が多く拡散されたときに風下であった、という解釈がありうる。また原発の特に北西方向に放射線量が多い地域があり、こちらは風速 U が大きいときに風下であったと考えられるかも知れない。さて、100[km]以遠になると、 $0.1[\mu\text{Sv/h}]$ オーダーの通常背景放射線が効いてくるので、原発由来の影響は見えにくくなる。それでも、500～1000[km]あたりの範囲で x^{-1} に比例しているように見えなくもない。これは、もはや一様流の方向に関係なく（水平方向で）等方的に拡散したときに現れる巾則（円周の長さに反比例）である。

背景放射線の影響もあって原発由来の放射線が見えにくくなる100[km]あたりの領域について、ホウレン草中の放射性物質 ^{137}Cs の濃度を計ったデータがある [7]。この測定なら背景の影響はより抑えられると期待される（どれくらいかは知らない）。このデータでも距離が30～200[km]あたりの範囲で x^{-3} の巾則が見えている。これは、放射性物質の空中とホウレン草中での濃度が比例関係にあると仮定すると、(2)と整合する。

結果的に、200～300[km]あたりまでの放射性物質の水平方向の空中拡散は、Richardson 則の極めて簡単なモデルを第0次近似として良さそうである。もっと細かいモデルに関しては、一様流の時間的・空間的变化、鉛直方向の流れの変化、気象条件、地面での吸収、地面からの巻き上がりなど色々加味しなくてはならないだろう。

参考文献

- [1] Y. Tsuji, Phys. Fluids, **16** L43 (2004).
- [2] T. Ishihara and Y. Kaneda, Phys. Fluids, **14** 69 (2002).
- [3] 都道府県別環境放射能水準調査結果、福島第1及び第2原子力発電所周辺のモニタリングカーを用いた固定測定点における空間線量率の測定結果, http://www.mext.go.jp/a_menu/saigaijohou/index.htm .
- [4] 宮城県内の環境モニタリング情報, <http://www.pref.miyagi.jp/gentai/Press/soudan/soudan00.htm> .
- [5] 全国の放射能濃度一覧, <http://atmc.jp/> .
- [6] R. Hayano, <http://plixi.com/p/87752170> .
- [7] R. Hayano, <http://plixi.com/p/87149538> .