

ロシアにおける地表汚染データの Levy Flight による解析

筑波大学 正会員 羽田野 祐子
筑波大学 学生会員 ○波田 幸宏

1. 目的

1986 年 4 月 26 日未明、旧ソ連・ウクライナ共和国にあるチェルノブイリ原子力発電所 4 号炉にて大きな爆発事故が起こった。原子炉の炉心が大気へ開放状態となり、しかも事故終息まで数日要したため、原子炉内の放射性物質が多量に、そして非常に広範囲に環境へ放出された史上最悪の事故であった。

事故の翌日、原発付近のプリピャチ市内の住民にはラジオにより避難勧告が出された。しかし事故から 1 週間も経った後、プリピャチ市以外の原発周辺 30km 圏内の住民にも強制避難勧告が出された。だが、実際は原発周辺だけでなく、200km 以上も離れたところでも高濃度汚染地域が広がっていた。[6]

現在、大気汚染や地表汚染に関して拡大予測のモデル式は多く存在する。しかし、どのモデル式も完璧に長期広域の汚染拡大を予測しきれていないわけではない。ゆえに、事故等が発生してから早急に、より正確な長期広域拡大予測のできるモデルが必要とされている。そこで注目しているのがフラクタルである。フラクタルとはあるパターンが与えられたとして、そのパターンの一部を拡大して見ても、もとのパターンと区別がつかないもののことである。このフラクタルという言葉は、数学者マンデルブロ (Mandelbrot) が、1975 年に新しく作った言葉である。フラクタルの例は自然界に多く存在する。例えばリアス式海岸や積乱雲、カリフラワー、微粒子のブラウン運動の軌跡などがそうである。ゆえに、事故等で解放された汚染物質の挙動にもフラクタルな性質があるのではないかと考えた。

今回、研究の目的は地表汚染の拡大の様子がフラクタルの一つである Levy Flight によりフィティングできるかを確認することである。

2. Random Work と Levy Flight

Random Work はイギリスの統計数学者 K.ピアソン (Pearson,K.) が 1905 年に提案したものでブラウン運動そのものである。つまり、ある 1 点から出発した粒子 (または人や物) が距離 a だけまっすぐ進み、そこで全くデタラメに向きを変えて再び a だけまっすぐ進む運動のことである。

一方、Levy Flight とは、距離 r の分布が Levy 分布で与えられるような Random Work のことをいう。確立密度を $P(r)$ 、フラクタル次元を D (フラクタルな図形を特徴づける最も重要なパラメータ) とすると、距離

r は次式で表せる。

$$P(r) = r^{-\frac{1}{D}} \dots (1)$$

式(1)は Levy 分布の密度関数を近似したものである。

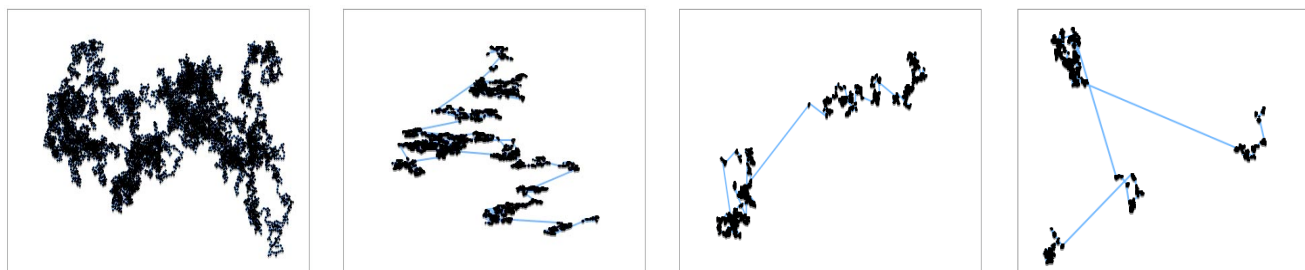


図 1: 左から Random Work、 $D=1.75$ 、 $D=1.5$ 、 $D=1.3$ の Levy Flight (すべて 1 個の粒子を 10000 ステップ動かした後の軌跡である)

キーワード チェルノブイリ, Random Work, Levy Flight, 地表汚染, 拡大予測

連絡先 〒305-5873 茨城県つくば市天王台 1-1-1 筑波大学システム情報工学研究科リスク工学専攻 TEL 029-853-8207

E-mail: e0411353@edu.esys.tsukuba.ac.jp

3. Levy Flight シミュレーションにおける粒子解析

10000 個の粒子を 1000 ステップ動かし、各ステップでの粒子の挙動を調べた。

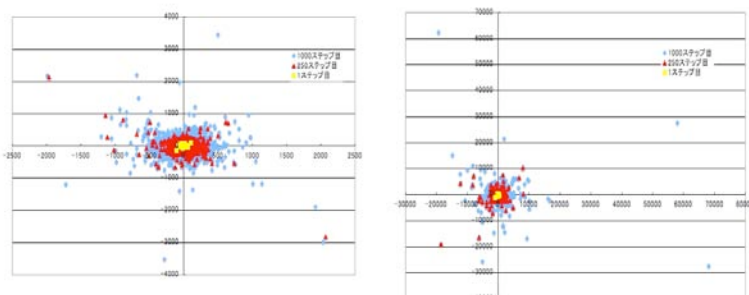


図 2 : Random Walk (左) と D=1.5 の Levy Flight (右) の拡散の様子

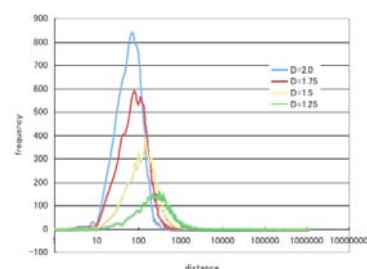


図 3 : 粒子数と移動距離の関係

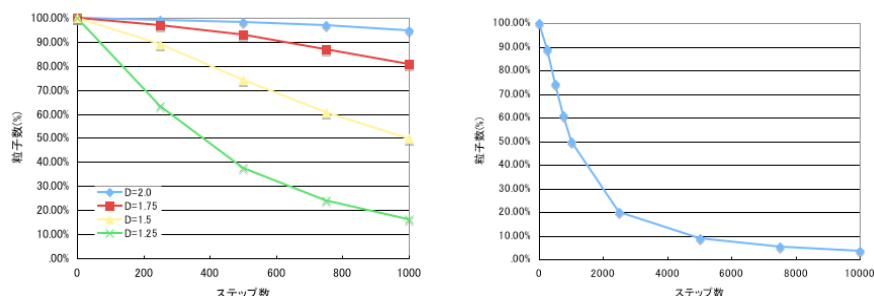


図 4 : 解放源付近における粒子変化 (右図は 10000 ステップまで拡張したもので D=1.5)

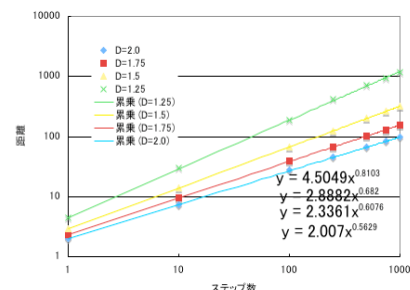


図 5 : ステップ数と平均移動距離

図 2 は Random Walk と D=1.5 の Levy Flight における 1 ステップ目 (黄)、250 ステップ目 (赤)、1000 ステップ目 (青) の粒子の拡散の様子である。原点を全粒子の解放源、つまり運動のスタート地点とした。図 1 より、1 個の粒子の挙動は全く違うのに、図 2 を見ると、拡散の様子は原点を中心にほぼ同心円状に広がりよく似ている。しかし、軸のレンジに注目すると、Random Walk に比べて、D=1.5 の Levy Flight は拡散のスケールが 100 倍以上になっていることが分かる。また、どちらの場合も円状の拡散とは別に遠くに飛散している粒子がいくつか見られた。

図 3 は縦軸に粒子の個数を、横軸は対数軸で粒子の移動距離をとったものである。Levy 分布に非常に類似した分布となった。

図 4 は解放源付近における残留粒子の個数変化を表している。1000 ステップ後、解放源付近には D=2.0 のとき 90%以上の粒子が残留しているが、D=1.5 のときは約 50%、D=1.25 のときは 20%以下しか残留していない。右図は D=1.5 のときのみ 10000 ステップまで拡張して、データをとったものである。2500 ステップ目を超えたあたりから粒子の残留率は 20%をきり、10000 ステップ後は 5%も満たなかった。

図 5 はステップ数と各次元の粒子の平均移動距離を両対数軸にプロットしたものである。このグラフからもフラクタル次元が小さいほど粒子はより遠くへ移動、つまり拡散していることが分かった。平均移動距離を比較した場合、1000 ステップ目で D=1.25 のときの粒子は、D=2.0 に比べて 10 倍以上遠くへ拡散している。また、D=1.5 のときの粒子は D=2.0 に比べて約 5 倍遠くへ拡散していることが分かる。ここで、累乗近似式の指数に注目してほしい。図 6 のように、フラクタル次元が大きくな

表 1 : $\alpha=1/D$ と近似式の指数との比較

フラクタル次元 D	$\alpha=1/D$	近似式の指数
2	0.5	0.5629
1.75	0.571428571	0.6076
1.5	0.666666667	0.682
1.25	0.8	0.8103

るほど誤差は広がっているが $D=1.25$ と $D=1.5$ のとき、 α と近似式の指数はほぼ一致した。ちなみに、他にも何回か試行を繰り返したが毎回同じような関係が得られた。 $D=2.0$ で誤差が大きい原因を考察してみる。

Levy Flight においてフラクタル次元が 2 というパターンは特別な場合である。実は、このパターンは Random Walk そのものである。今回、3 章以降のシミュレーションは全て Levy Flight のプログラムによるもので、もちろん $D=2$ の場合も同様である。つまり、Levy Flight のプログラム上でフラクタル次元というパラメータを 2 としても、Random Walk は正確に再現できていないということが分かった。そのため、 $D=2$ のときのみ、Random walk のプログラムでシミュレーションした結果を示す（表 2、図 7）。以上の結果から、図 5 より、移動距離を r 、ステップ数を時間 t と考えると、

$$r \propto t^{\frac{1}{D}} \dots (2)$$

という関係が推測できる。

Levy Flight に従う粒子の挙動についてまとめると、少なくとも次のことがいえる。

- ◆ フラクタル次元が小さいほど、粒子はより遠くへ拡散する
- ◆ 拡散の様子は同心円状だが、群を離れて遙か遠くに飛散する粒子もいくつか確認できた
- ◆ 粒子の移動距離 r とその位置における粒子の個数 N の関係は、Levy 分布に非常によく似た分布になる
- ◆ 解放源付近の粒子の残留数は単調減少である
- ◆ 移動距離 r は、式(2)に従う時間依存性をもつことが推測される

4. チェルノブイリにおける地表汚染の濃度分布との比較

実際に Levy Flight のフィティングの対象として、IAEA より 1989 年に発表されたチェルノブイリにおけるセシウム 137 の濃度分布図[5]と、日本原子力研究所により 2003 年に出版されたチェルノブイリ原子力発電所における観測データ[4]を使用する。

まず、汚染領域のフラクタル性を確認するため、ボックスカウント法という手法により汚染領域のフラクタル次元を測定した。ボックスカウント法とはあるパターンを格子幅 δ の格子に区分けし、パターンが少しでも含まれる格子の個数 N を数えていく測定法で、フラクタル次元 D は、

$$N \propto \delta^D \quad \therefore D = -\frac{\log N}{\log \delta} \dots (3)$$

と表すことができる。

1 章でも述べたように、フラクタルなパターンは、その一部を拡大しても元のパターンと同じ性質をもっているという特徴がある。そのため、汚染領域全体(37kBq/m² 以上)と、事故の起こった原子炉 30km 圏内かつ高濃度汚染領域(1480kBq/m² 以上)のフラクタル次元を比較することでフラクタル性を確認しようと思う。同時に、事故直後の汚染分布が原子炉付近の高濃度汚染領域に似た分布と仮定すると、汚染物質拡散の時間変化もフラクタル性をもつといえる。今回、測定対象である IAEA より 1989 年に発表されたチェルノブイリに

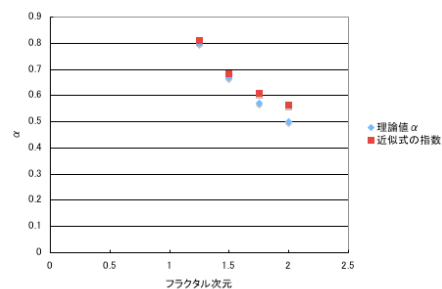


図 6: $\alpha=1/D$ と近似式の指数との比較

表 2: $D=2$ を Random Walk で動かした場合

フラクタル次元	$\alpha=1/D$	指数
2	0.5	0.4823
1.75	0.571428571	0.6058
1.5	0.666666667	0.6925
1.25	0.8	0.7931

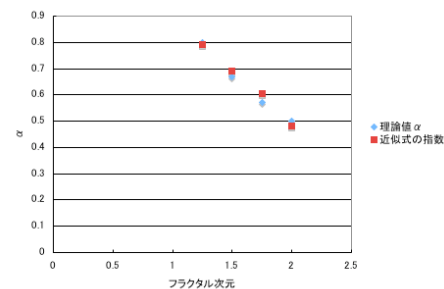


図 7: $D=2$ を Random Walk で動かした場合

におけるセシウム 137 の地表濃度分布図は容量が大きすぎるため割愛する。

図 9 がボックスカウント法による格子幅 δ と、汚染領域の含まれる格子の個数 N の関係である。両対数軸にプロットしてある。式(3)より、汚染領域全体のフラクタル次元は $D=1.5159$ 、30km 圏内高濃度汚染領域のフラクタル次元は $D=1.5382$ であり、非常に近い値となった。したがって、汚染領域（汚染分布図）はフラクタル性をもち、仮定が正しければ、汚染物質の拡散現象の時間変化もフラクタル性をもつといえる。

5. 今後の課題

今後の課題として、一つは実際の汚染物質の濃度分布やデータの解析をより深く追求することである。一つの時系列の地表汚染濃度分布図だけでは、拡大の動きを確認できないため、異なる時系列の濃度分布図との比較が必要とされる。また、日本原子力研究所により 2003 年に出版されたチェルノブイリ原子力発電所における観測データ[4]の解析がまだ途中のため、その解析も発表会当日までに成果が出せるよう考えている。

参考文献

- [1]フラクタル幾何学 Kenneth Falconer/著
- [2]フラクタルの物理(1)基礎編 松下 貢/著
- [3]フラクタル科学 高安 秀樹/著
- [4]ENVIRONMENTAL MONITORING DATA AROUND THE CHERNOBYL NUCLEAR POWER PLANT USED IN THE COOPERATIVE RESEARCH PROJECT BETWEEN JAERI AND CHESCIR January 2003 日本原子力研究所/出版
- [5]International Atomic Energy Agency(IAEA): <http://www.iaea.org/>
- [6]原子力百科事典 ATOMICA: <http://www.atomin.gr.jp/atomica/index.html>

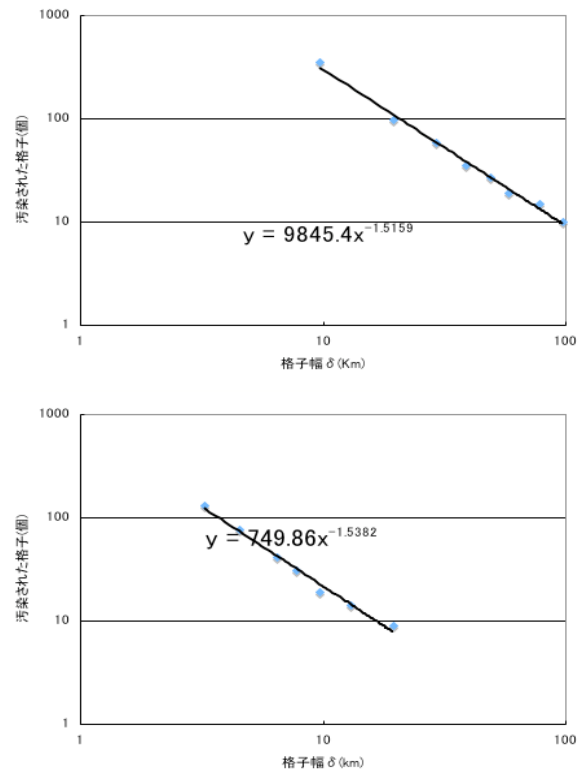


図 9: カウントボックス法による δ と N の関係
(上: 汚染領域全体、下: 30km 圏内高濃度汚染領域)