Paper

カオス系としての原子力発電プラント

Nuclear Power Plant as Chaos Systems

Ichizo Aoki
Greenwood Office
E-mail:iaoki@gakushikai.jp

青木　一三
グリーンウッド事務所

Abstract
Nuclear plant is a complex system and often shows chaotic behavior. Simple nonlinear equation such as logistic model also shows chaotic behavior. It is also known that distibution of Chaotic behavir falls in Power Law Distribution. From those analogy, it is easity anticipated that historical record of nuclear accident might show Power Law Distribution. This paper cleary shows that such anticipation is true.

目　　次

1. 緒言
2. カオス系とべき乗分布
3. 原発事故確率はべき乗分布となる
4. 確率論的リスクアセスメント(PRA、PSA)の問題
6. 結言

1．緒　言

2011 年 3 月 30 日、ドイツの自然科学、人文科学、社会科学の学者 500 余人がメルケ ル首相あての連名公開状「福島原発事故を受けてドイツは脱原発を急ぐべき」に署名した。この公開書簡の筆頭署名者は、フラウンホーファ太陽エネルギーシステム研究所の所長 アイケ・ウェーバー博士(Eicke R. Weber)である。以下その一部を望月訳でご紹介する。

我々は、学問がドイツにおける原子力論争において余りにも長い間、沈黙を守りすぎたのではないかと心配します。とにかく、脱原発の完了までの間に何事も起こらないことを祈るのみです。今や、我々が声を出して、「安全な原発」というものは過去にも未来にも物理的・技術的な理由からありえないと明白に声明する時が来ました。

すでに 1957 年のウィンズケール, 1969 年のルーセンズ, 1979 年のスリーマイル島 , 1986 年のチェルノブイリならびに深刻事故の一歩手前だった 2006 年のフォルスマルクが、残存リスクが過去においては約 10 年毎に現実となったことを示しています。先進的な高度技術の国、日本における現在の状況により、この悲劇的な数列にさらに一つの深刻事故が追加されようとしています。複雑な技術の支配不可能の状態は、科学と技術が未熟だから起こるのではなく、それは、原理的な、自然科学的の問題です。

物理学のカオス理論によると、複雑システムにおいては非常に小さな変化が非常に大きな作用を持ちえます。別の言葉で言い換えるならば、我々は自然科学的な理由から、我々の原発が本当のところ、どれだけ安全かを知ることは決してできません。というのは、我々は、その安全性を計算することができないからです。複雑な技術的システムに関する予測不可能性は、入手できる操業パラメータの量に起因するのではありません。なぜならば、システム全体は原理的に、いくらその個々の構成要素を分析しても、理解し尽くすことができないからです。まさにこのために、我々は、技術的なシステムがなぜ、そしていつ、機能しなくなるかを原理的に知ることができないのです。我々は、ここでまさ

に、人間の能力の基本的な限界に直面するのです。数百万人の人間にとっての危険を意味する原発の場合には、このことは、これ以上、容認することはできません。

このような破滅的な事故のリスクを我慢する必要はまったくありません。我々は今日、水、風、太陽、バイオエネルギーそして地熱で十分な量の電力を発電できるので、2020 年まであるいはそれよりも早く、それによってドイツのそしてヨーロッパの原発の電力を代替できるのです。省エネ技術と再生可能エネルギーのエネルギー的ならびに技術的な可能性は、化石と原子力のエネルギーの可能性を上回るものであり、同時に、環境に調和しており、経済的であり、社会に受け 容れられるものであります。・・・

オークリッジ国立研究所のアルビン・ワインバーグ（Alvin M. Weinberg）博士は 1991 年のカレントコンテンツで「大規模な非線形方程式で記述できるシステムの時間経過の展開について、ポアンカレがシステムの究極的挙動は初期値の小さな揺らぎに大きく依存していることを示した最初の人だ。カオスとはポアンカレ的不安定さを明白に表現する言葉だ。ブルックスは数学はこのような状況を分析するには無力だと言っている」と書いた。[1)]

原発の黎明期の 1974 年に米国の NRC は確率的リスク分析（PRA）という手法を採用したラスムッセン報告書を出した。[2)] 米国に追従する日本の大学・政府・業界が一体化した原子力村はこの PRA を確率的安全分析（PSA）と言い換え、 信頼性を安全性と混同したロジックを展開して安全神話を構築し、安全対策も講ぜず、住民を故郷から追い出すという悲劇的損害を福島県にもたらした。PRA とは構成する要素の故障確率を想定し、これを事前に想定するフォールトツリーに従い、ブール代数でシステム確率を合成する。要素の故障確率が正規分布であるから、合成される総合確率も正規分布といってよい。これが日本の安全神話を裏から支えた似非理論だということは MIT のナンシー・レビソン教授が指摘していることである。3)

2. カオス系とべき乗分布

1838 年にベルギーの数学者ピエール・フェルフルスト（Pierre Verhulst)によって考案された非常に簡単な微分方程式で表現されるロジスティックモデルは 2 次関数であり、放物線を描くので、非線形である。非線形方程式はポアンカレの指摘の通り、カオス現象を示すことがわかっている。これを例にとって説明しよう。ロジスティックモデルの微分形は

$$df/dt = r_0 f (1-f)$$

時間を離散的にすると下式のような差分方程式になる。

$$f_{t+1} = r_0 f_t (1-f_t) + f_t$$

この式は下図のように f_0=0.01 r_0=1.9 のとき、収れんする。

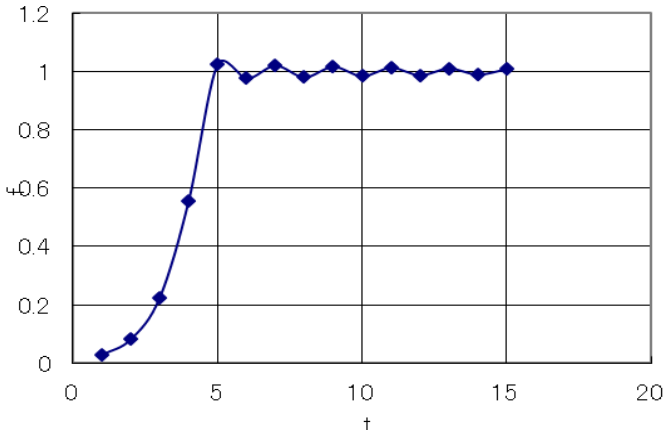

図-1 収斂

しかし f_0=0.01 r_0=3 の時はカオス状態になる。

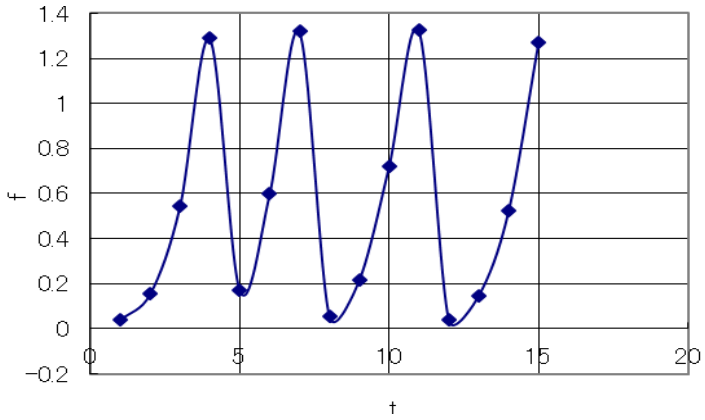

図-2 カオス

さて 50>t>16 のカオス状態をプロットすると図-3 のようになる。これをポアンカレ写像という。0<f_0< 1 の時において 1<r_0<1.9 で収束する。ところが 1.9<r_0<2.4 で 2 点リミットサイクルに分岐、2.4<r_0<3 で 4 点、8 点、16 点リミットサイクルに順次分岐する。

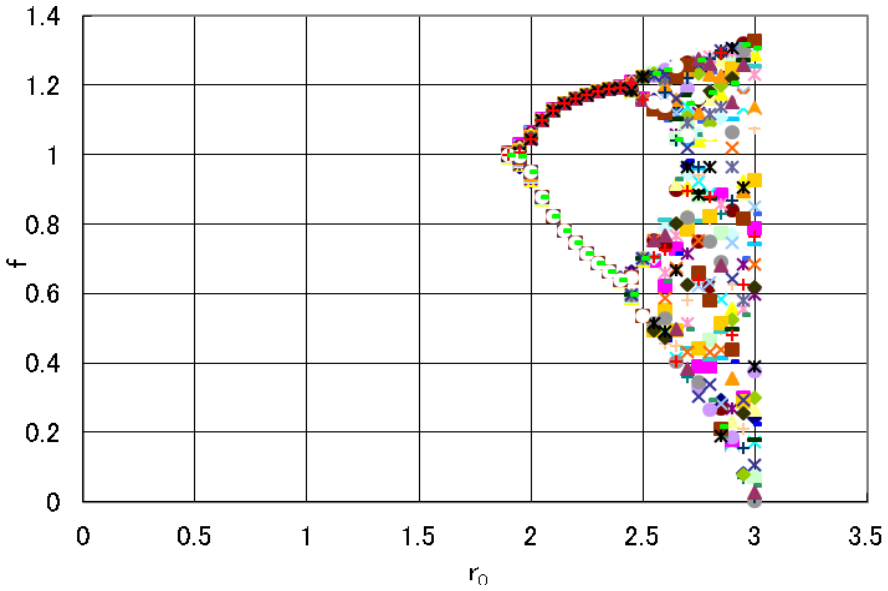

図-3 ポアンカレ写像

このように複雑な挙動を示す現象をカオスという。予測できないとは、決してランダムということではない。その振る舞いは決定論的法則に従うものの、積分法による解が得られないため、その未来（および過去）の振る舞いを知るには数値解析を用いざるを得ない。しかし、初期値鋭敏性ゆえに、ある時点における無限の精度の情報が必要であるうえ（コンピューターでは無限桁を扱えないため必然的に発生する)、数値解析の過程での誤差によっても、得られる値と真の値とのずれが大きくなる。そのため、予測が事実上不可能という意味(ローレンツのバタフライ効果)

さてr_0=3 で 50>t>16のカオス状態で fとfの平均値f_{av}との偏差$f-f_{av}$の正の値のみの対数$\log(f-f_{av})$を縦軸に、-log f を横軸にプロットすると図-4 のようにほぼ直線となる。

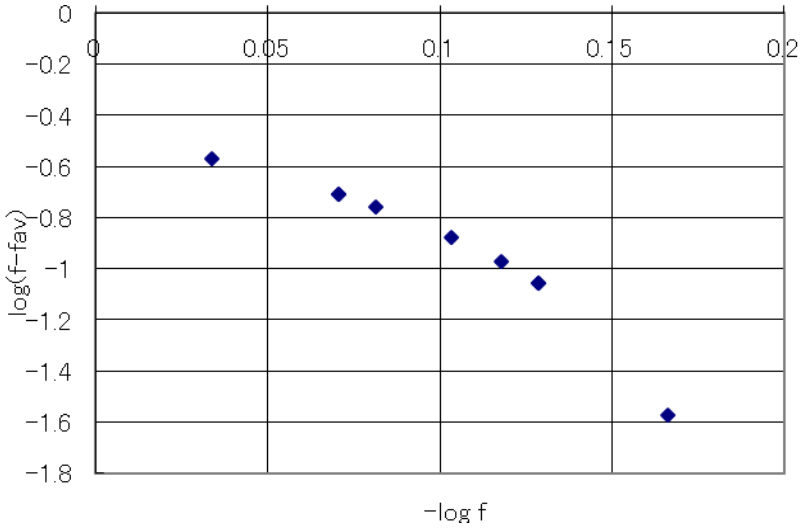

図-4 ロジスティック式のべき乗分布

このようにロジスティック写像の r_0 の偏差はべき乗分布を示す。すなわちカオス系または複雑システムはべき乗分布になるということを示す。

このように簡単なロジスティック方程式ですらパラメーターによってはカオスに陥る。ましてや原発も含むプロセスプラントは当然非線形となる。制御系がセンサーも情報処理も弁などのアクチュエーターもすべて電動でかつ自律分散システムとして設計されていないため、強烈な非線形系である。したがって制御棒を含む制御システムとホウ酸注入系が失われれば、チェルノブイリの経験のように核分裂も停止できない事態の再現となり、崩壊熱除去系の制御システムがだめになればスリーマイルや福島の再現となる。このことが物理経済学でいうミクロ・マクロ・リンクすなわち数学的には高次方程式という非線形方程式で記述されるわけでこれを世界 440 基の現在までの運転相当年分（14,000 炉運転年）運転すればカオス現象が必ず出現し、べき乗分布が得られるはず。では実際にはどうなのだろうか？

3. 原発事故確率はべき乗分布となる

カオス理論によれば原発は非線形方程式で記述されるような複雑なシステムだから事故はべき乗分布になると予想される。べき乗分布は別名ワイブール（Weibul）分布、パレート分布、ゼータ分布、ジップ分布、ファットテールとも呼ばれるものである。そこで過去の原発事故の確率密度と電力単位出力当たりの放出放射能量を両対数目盛りにプロットしてみたら下図の赤色のプロットが得られた。電力出力当たりの放射能放出量（キューリー）の対数を横軸に確率密度（運転炉年に 1 回の頻度）の対数を縦軸にしたべき分布の確率密度関数は

$$p(x)=Cx^{-\alpha-1}$$

式で表せ、青色の右下がりの直線になる。x は電力出力当たりの放出放射能量で単位はキューリー。p(x)は確率で運転開始から事故までの中間年における全世界の累積炉運転・年である。 α はスケーリング指数（scaling exponent）とよばれる。最小二乗法で求めると α=0.31 となる。べき乗分布に平均値は存在せず、スケール・フリー（スケール不変性）である。とはいえ崩壊熱事故の場合は放出される放射能の最大値は炉内にあった核分裂物質量を超えることはない。ただ核分裂暴走事故の場合は最大値は装填した 4%のウラン 235 全量に相当する核分裂物質に等しくなることは否定できない。福島級の事故確率は 1 回/2,100 炉・運転年にということになる。日本の 50 基を再稼働させ 40 年の寿命いっぱい運転させれば平均残余運転可能年は 20 年となり、1,000 炉運転年残っていることになるから、福島級事故は 0.5 回発生の可能性ありということになる。

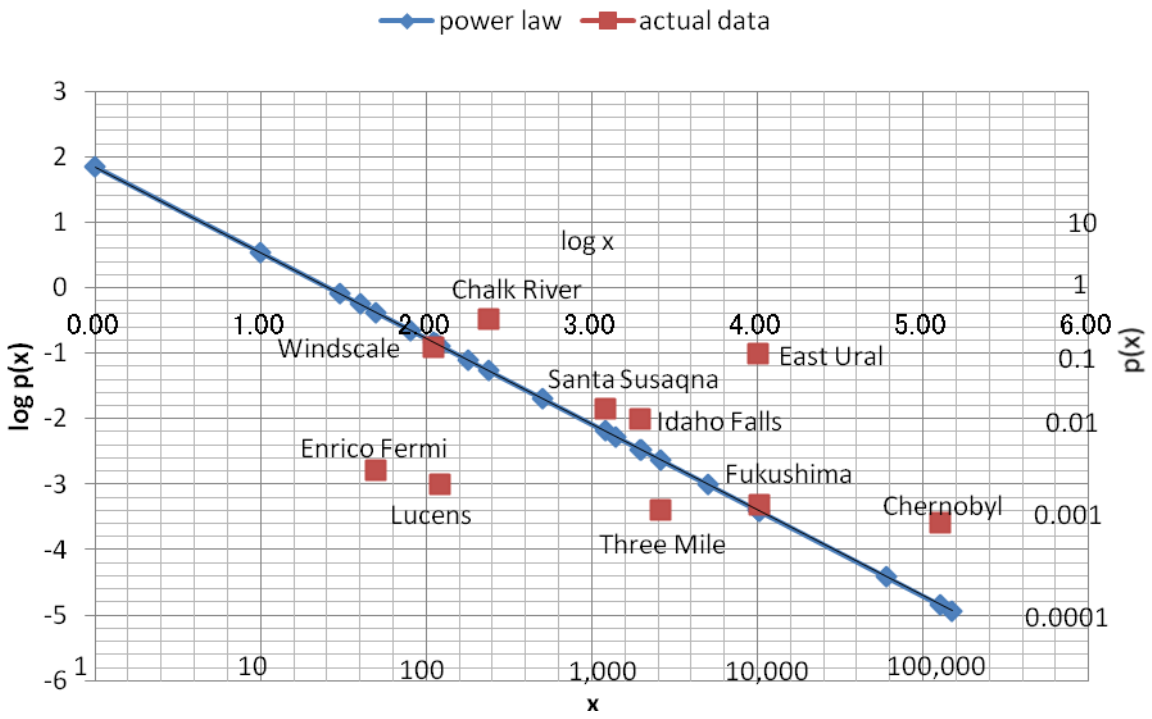

図-5 原発事故のべき乗分布

4. 確率論的リスクアセスメント(PRA、PSA)の問題

原発の事故確率は隕石に当たる程度の 50 億分の 1 だという数値は 1974 年のラスムッセン報告書で使われた FT 分析によって計算されたものである。システムの信頼性を要素の信頼性からブール代数を使って合成するものである。これを確率論的リスク分析（PRA）という。 PRA は要素の信頼性として通常ガウス分布またはポアッソン分布で整理された確率を採用する。システムは多重化すると信頼性が増すという原理を利用して目的の信頼性を確保するために多重化を行う。

M. V. ラマナが"ブレティン・オブ・アトミック・サイエンティスト“で従来の確率論的アプローチはまちがっているとし、シビアアクシデントの確率について「実際のシビアアクシデントの確率は 1/1,400 炉・運転年と高い。MIT 報告のように、もし稼働中の原子炉の数が現在の 440 基から 1,000 基に増加するシナリオでの炉心損傷は 1.4 年に 1 回ということになる。いずれにせよ我々の

持っている経験はかぎられており、確実なことはいえない」としている。M. V. ラマナはさらに続けて「理論的に言って、確率論的リスク分析は問題を多く抱えている。MIT のナンシー・レビソンとその共同研究者達は確率論的リスク分析に使われる事故時のイベントの鎖は複雑系の事故のような間接的な、非線形でフィードバックのあるような関係をうまく記述できない。加えるに人間行動が既知、非知の失敗モードに与える影響をモデル化できない。更に 1978 年にリスク分析検討グループが NRC に提出した報告書に数学的な意味でイベント・トリー、フォールト・トリーを構築することは不可能としている」と指摘している。

FT 解析こそ原発の事故確率は隕石に当たる程度の 50 億分の 1 だというまやかしの数値を出すトリックであったことがわかる。[4)]

しかるに日本では PSA を確率論的セーフティー・アセスメント（PSA）と言い換えて、信頼性を安全性の代用にした。 PSA はシステムの安全性＝信頼性が社会にとって受容できる信頼性になるようにシステムが事故時辿ると推定されるルート、すなわちイベントツリーを想定し、多重化で目的の信頼性＝安全性は隕石に当たる程度の事故確率だと住民に説得したのである。

5. 結 言

日本国政府が再スタートの条件としているストレステストは基本的にこの PRA の手法はそのままにして材料の破壊確率に Weibul 分布（べき分布）を使い。津波の高さはベキ分布を入れるという程度のことである。ドイツの科学者や近代カオス理論の考えに立てばこれらの要素の確率にべき乗分布を採用したところでブール代数で確率を合成した結果がべき乗分布になることはない。事故時、燃料棒鞘管、圧力容器、格納容器、建屋を壊してシステムから放出される核分裂物質量を推算する非線形方程式を構築し、原発構成要素の故障確率を定義し、制御ロジックと制御機器駆動電源の作動原理を記述し、これに初期値を与えて 440 炉・40 年=17,600 炉・運転年に渡って数値実験して挙動を見るということをしなければ本当のところはわからないであろう。その数値実験の一つとして物理経済学で使われているエージェントベースモデリングがある。このような手法を使わないストレステストは安全神話の線上にあるといって言い過ぎではないだろう。

参考文献

[1] Alvin M. Weinberg “Current Contents” ISI(Institute for Scientific Information) 1991
[2] “The Reactor Safety Study” An Assessment of Accident Risks in Commercial Nuclear Plant（WASH-1400 NUREG-75/014）
[3] Nancy G. Levison “Safeware: System Safety and Computers” 1995
[4] M. V. RAMANA “Beyond our imagination: Fukushima and the problem of assessing risk "Bulletin of the Atomic Scientists April 21, 2011