

今年の米国 MAM の話題と日本の原発事故

谷 克彦

2011 年の米国 MAM(Mathematics Awareness Month)のテーマは、“複雑系の解明”であった。複雑系の概念は、1980 年後半に、サンタフェ研究所(ロス・アラモス研究所のスタッフが設立した)から生まれた。

複雑系は、生体細胞、昆虫コロニー、生態系、化学反応、ハリケーン、気候変動などの自然の対象物から、送電網、輸送ネットワーク、WWW のような人間の発明物、そして、経済活動、感染症の拡大、文化の相互作用などの社会現象に至るまで、身の回りのいたるところで目にする。複雑系は互いに相互作用する要素から成る巨大系で、系全体としてとらえる必要がありその性質は量り知れない。今日のアフリカ上空の蝶の羽ばたきが、遠い未来に竜巻を起こす原因の一つになり得る世界だ。複雑系の背後にある数学の解明が、今年の米国 MAM のテーマである。

複雑系の理解は、限界ぎりぎり稼働している社会インフラの管理や、その信頼性向上に有用である。複雑系に突然生じる“ふるまい”を解析すると、望ましい傾向を伸ばし、望ましくない傾向を抑制することもできるようになる。

2003 年の米国の大停電を目にしても、日本では自信過剰ともいえるコメントが聞かれた。1989 年のサンフランシスコ地震でベイ・ブリッジが落ちたときも、1994 年のロサンゼルス地震で多くの高速道路が崩壊したときも、「日本の道路は耐震性がある。関東大震災級の地震に襲われても、このような災害にはならない」と胸を張った。しかし、翌 1995 年に、阪神・淡路大震災が襲い、安全神話は一瞬にして崩れ去った。1986 年のチェルノブイリの原発事故も他山の石としなかった。いわく、「日本の原発は黒鉛炉ではない。炉は格納容器に入っており、多重防護で絶対安全」云々。貞観地震(869 年)を始めとする三陸沖に押し寄せた過去の巨大地震・津波の警告にも、耳を貸さなかった。これらは皆、複雑系で起きたことである。

そして今、日本では、地震・津波、原子力発電所事故と、とんでもない事態が続いている。米国の MAM のテーマは、あたかも日本の今日を予見していたかのように、実にタイムリーな数学である。

日本の現状を念頭に、今年の米国 MAM のエッセイ(注 1)を味わってみよう。

注 1 2011 年 MAM のホームページに集積されたエッセイは次のようである[1]。

- ・伝染病拡大における住民の相互作用
- ・大惨事の経済インパクト
- ・複雑系としての生体組織
- ・事故のなだれ：送電網で起こる巨大停電の極端な性質
- ・インフラ構造のインパクト

1. トランス・サイエンスとしての数学月間[2]

1.1 科学技術のシビリアン・コントロール

運転中の原子力発電所の安全装置が、すべて同時に故障した場合(同時多発事故)、深刻な事故が生じる。このような事態が生じる確率は非常に低い、起こる可能性はある。その確率を安全と見るか危険と見るかの判断は、トランス・サイエンス(科学を超える領域)の課題である。我々が“どのような社会に生きることを望んでいるか”に基づき判断すべき課題である[3]。

原子力は、制御不確かな技術であり、科学では安全の保証はできない。不幸にして、3月11日に巨大地震を引き金にして、福島原子力発電所の事故が起きてしまった。巨大地震の警告、計画年数を延長した旧型(GE製, MarkI)、稼働条件を緩和してMOX稼働を許可(2010, 9)した行政、御用学者、批判を封じたマスコミの罪は重い。

システムが巨大化し、その科学的解明が未だ不十分、あるいは検証不可能で、安全やリスクの検討に確率論が関与する領域は、複雑系と重なる。アルヴィン・ワインバーグ(米国の核物理学者、オークリッジ研究所長)は、このような純科学的に答えることのできない問題の領域を、トランス・サイエンスの領域(1972)と呼んだ[3]。あるいは、ポスト・ノーマル・サイエンス [ラヴェッツ(1999)] と呼ばれることもある。

数学月間活動も、数学を紹介する啓蒙型の活動だけでなく、どのような数学や研究を望むか皆で考える双方向型の活動が必要であろう。

私は、トランス・サイエンス活動の原点を、宮沢賢治の羅須地人協会に見出す。賢治は「農民芸術概論」の中で、「宗教は疲れて近代科学に置換され然も科学は冷たく暗い」と述べ、「我々に必要な科学(数学も)を、われわれのものに」と実践活動を始める。

賢治の羅須地人協会活動の投影を、高木仁三郎の原子力資料情報室(1973~)活動に見る[4]。高木仁三郎は以下のように語っている[5]：

「環境というものは実験室と違って、ものが生きている場だ。草が生え、鳥が舞い、私たちが呼吸をし生活をしている。プロの科学者の立場でなく、一個の生命の立場から物が見えてきた」

通常稼働の原子力発電でも、毎日、莫大な量の高レベル放射性廃棄物(半減期が何万年という核種もある)が生まれ続けている。そして、その最終処理場の見通しはない。トイレのないマンションと比喻される所以である。

施設の排気ダクトや排水から、放射性物質を全く漏らさないことは不可能で、現に、正常稼働時の原発や燃料再処理施設では、周囲に放射性物質の漏れが観測されている(注2)。さらに、処理場や貯蔵プールからの放射性物質の流失は、米国でも多数事例があり、地下水の汚染が起こったら、生命を育てているこの豊かな大地・海洋は取り返しのつかないダメージを受ける。

しかし、今回の原発事故(レベル7)は、それどころでない。とんでもない量の汚染になってしまった。炉心溶融や格納容器の破損が起き、環境に出た放射性物質は、大気の大循環に乗り地球中に拡散した。海洋汚染の拡散や、食物連鎖による汚染濃縮も起こるだろう。再生可能な太陽エネルギーの範囲で生きようとする

村を押しつぶし、農業・漁業、生態系を長い年月にわたって変貌させてしまう。賢治が、「日照りのときは涙を流し／寒さの夏はおろおろ歩き」したように、原発事故を見て、科学者たちもおろおろ歩くべきである。

注2 青森県六ヶ所村には、約3000トンの使用済み核燃料が、全国の原発から送られ一時貯蔵されている。800トン/年の核燃料の再処理を行うことになる[6]。

稼働しているセラフィールド(英)、ラアーグ(仏)の再処理工場の例を見ると、アイリッシュ海や周辺地区の汚染が進み、小児白血病などの多発が報告されている。高レベルの放射性廃棄物は、ガラス固化体にすれば小さくなるが、膨大な低レベル放射性廃棄物を発生させる。その上、再処理工場稼働による空・海への日常的な放射能の垂れ流しは、原発1年分を1日で放出するといわれる。

古典数学は、決定論の世界で、正確な解答を得ることができた。しかし、複雑系は、確率的で不確実、数学者もトランス・サイエンスに無縁ではいられない。真のモデルなど存在せず、演繹できる真理のない世界では、現象やデータに基づいてモデルは構築すべきもの[7]、そして、それは真理とは限らないサイバー世界である。計算された数値は一人歩きし、数学で答が得られない問題の答えにすり替えて利用されたりする。例えば、私たちの感じるリスクは、個人で制御できないもの・選択の余地のないものは高いスコアになるべきだ。スコアの解釈が合わないと感じることは多い。被曝由来のガンによる寿命短縮が0.2日などの数字は、没個性で冷たく思える。特性や個性を指定した詳細な解析が望まれる。確率は小さくても、影響を受けて癌になる人は必ずいるのである。

双方向コミュニケーションの先進国——英国

1990年代、遺伝子組み換え農作物をめぐる論争は、純粋に科学的な問題だけでなく、多国籍企業の種子が、自国の農業を変える懸念が背景にある。

BSEでは、政府および専門家が、人間へのBSE感染は可能性は低く、食べても安全だというキャンペーンを繰り返したあげく、1996年に撤回せざるを得なくなった。かくして、政府や科学者への信頼は崩壊し、科学技術への敵意まで生まれた。セラフィールド核燃料再処理施設の問題もある。英国上院の科学と技術特別委員会は、いち早くこの事態を認識し、「科学と社会」報告書(2002)を出している。英国でも、さまざまな組織に残っている秘密主義が障害であるようだ[3]。

1.2 トランス・サイエンスとしての数学月間

御用学者やタレントが提灯持ちとなり、原発推進のキャンペーンがTVをはじめとするメディアで長年張られていたことを思い出すだろう。民間も国もふんだんに広報費を使い、原発の安全神話を刷り込み、原発が止まると生活も経済も成り立たないと脅迫した。そして、これを科学的に批判する意見は、マスコミからは全て無視されてきた(注3)。今回の事故後も、意図的にバイアスのかかった報道がなされたのも事実だが、それに輪をかけて、記者やコメントータの科学音

痴はひどかった。平素から知ったかぶり広報機関にすぎなかったのが、とうとう馬脚を露呈した。

数学や科学、あるいは論理を軽んじる社会に正義が成り立つわけがない。今こそ、科学・数学のリテラシーがメディアの記者たちに求められる。数学月間の意義もそこにある。ちなみに、米・英はじめ海外メディアでは、偏見のない科学的な報道が行われている。

注3 高レベル核廃棄物(ガラス固化体)の地下処分や核燃料サイクル推進の宣伝、地球温暖化の切札が原子力発電であるかのような宣伝が盛んであった。

楯状地のフィンランドでは、地下500mに埋めて10万年間閉じ込めようという計画が進んでいるが、日本国内にはそのような安定な地層はない。どこの国の原発も危険だが、悪いことには、日本の原発は「地震つき原発」である[8]。

使用済み核燃料といえども崩壊熱を出し、長期間冷やし続ける必要がある。これを連日、我々は目にしているのではない。通常稼働時においても、原発は、電力に転化するエネルギーの2倍の熱エネルギーを海に捨て、地球の熱汚染を進めている。温室効果ガスの比ではない。

環境で観測される放射線は、風で運ばれて来た放射性物質から出ている。「一国の胃の集団検診で受けるX線の線量が4mSvで、20mSvは、その5回分に過ぎない」などのコメントばかりだ。X線(光と同じ)照射は、スイッチOFFと同時に消えるが、放射線を出している環境中の放射性物質は消えたりしないし、体内に取り込まれれば、体内で放射線を出し続ける。人間の肺は呼吸によりフィルターが汚染(環境の10倍程度)される集塵器のようなもの、内部被曝は環境の10倍に達する[9]。その上、食物を通じた放射性物質の摂取は、原子力災害後の長期にわたり、その結果、体内に蓄積される放射性物質による内部被曝は、環境の放射線量をはるかに凌駕し深刻である。放射線と放射性物質を混同させるような説明は許しがたい。3月19日に福島県のアドバイザーに招聘された、被曝医療の教授などは、御用学者の最たるものだ。

被曝による寿命短縮に簡単に触れる。問題とする集団の人口 P 人、被曝由来のガン死人数/年 D 、平均寿命 L とし、寿命短縮を $S = L \cdot \left(\frac{D}{P}\right)$ で算定する。

ここで用いる係数 D/P は、広島・長崎の疫学データから推定されたものであるのだが、国際放射線防護委員会(ICRP)とJ.W. Gofmanや、ドイツ放射線防護協会の算定値とでは、5倍程度の開きがある。さらに、現実には、内部被曝も考慮すべきだし、ガン種類、発症・死亡の期間、個体年齢(子供のリスクはおとなの10倍)なども考慮し行き届いた統計分析が必要である。

発癌はDNA鎖が切断され、それが誤復元されるときに生じるので、確率的現象である。低線量被曝であっても発癌確率は総被曝線量に比例し、安全閾値は存在しない。被曝規制値は法律のためのもので科学的結論ではない。都合により規制値を緩和し、「規制値は遵守されているから安全だ」と行政は言い張る。安全ではないがそれを許容するかどうかは個人の問題。科学ではなくトランス・サイエンスの領域である。「安全だ」と片棒を担ぐことで、科学の信頼を落としてはならない。

2. 原発は複雑系

2.1 リスク評価の方法

原子炉は、小さい事故が起こっても、これを発展拡大させない対策(多重防護)があると謳っていた。放射性物質を環境に放出した場合のみを“事故”といい、小事故や機械の故障は“事象”と違って区別し、事故は起きていないと言い張るのが常であった。原発が安全保護システムの塊であるのは本当である：曰く、多重性、独立性、フェイル・セーフ、試験可能性、云々。しかしながら、今回の事故で見ると、はじめの数時間で、これらの防御はすべて突破された。その後、命がけの対処もむなしく、放射能は漏れ続けている。「対処が悪いとか、早く終結させろ」とか騒いでも、それは無理というものだ。そもそも原子力はそういう性質のものである。一般に、フェイル・セーフとは、制御できなくなると、自然に安全側に停止することである。しかし、原発でいうフェイル・セーフは、「電磁弁を、通常時は電流を流し励磁しておき、電源喪失すれば、電流が止まり励磁が解除される」といった類のものである。火事が燃え尽きて消えるように、原子炉が冷えるならば、本当のフェイル・セーフであるが、あまりにも大きい崩壊熱と、あまりにも長い放射能の半減期は、人類の尺度と合わない[10,11]。

もし実験をしたことがあれば、放射能を完全に閉じ込めておくなど不可能なことは自明だ。その上、通常稼働時でも被曝という差別労働なしに原発維持はできない。このような覚悟なしに、原子力技術を社会に導入すべきではない。

ここで、原発の安全性算定(確率論的安全評価)はどのようにしてなされるか、簡単に見ておこう[12,13]。

Chart 1 は、今回起った冷却材喪失事故の場合のイベント・ツリーを示す。圧力容器、格納容器の温度、圧力、水位計の一部のデータから、事故ストーリーの検証が行われた。地震の最初の一揺れにより、再循環配管等が損傷し、冷却材喪失が起こった可能性が指摘されている[14]。地震を感じて制御棒の挿入も行われ、原子炉停止には成功した。続いて、ECCSによる注水、再循環は、津波による電源喪失で失敗している。その結果、余熱除去は失敗、炉心は損傷し、水素爆発やメルトダウンに至っている。

Chart 2 は、フォールト・ツリーというもの、事故の確率算定に使う。ECCS 喪失は、事象 a と b が同次に起こったときに起こり、ECCS 喪失確率は、事象 a, b の確率の積になる。次に、事象 a が起こるのは、 c, d, e のどれかが起こ

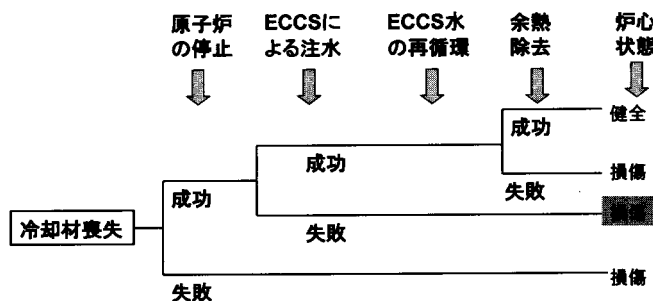


Chart 1 イベント・ツリーの例

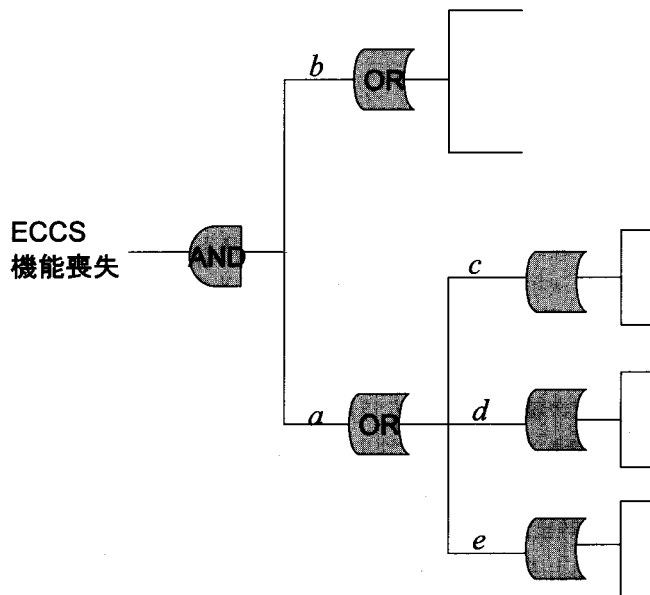


Chart 2 フォールト・ツリーの例

ったときとすると、 a の確率は、 c, d, e の確率の和になる。こうして、ECCS 喪失確率は、最終的に部品の故障確率から計算されて、 10^{-5} などという数字が得られるのだ。しかし、いかに詳細なフォールト・ツリーであろうと複雑系に対し完全ではあり得ない。予測できないものが原因たり得るのが複雑系である。

2.2 日本の大惨事

3月11日、午後2時46分、三陸沖を震源とする地震が発生した。

東京では、長い初期微動に続いてゆっくりした振幅の大きい横揺れがあった。私の部屋でも物が落下し、地震慣れしている私たちでも、身の危険を感じる揺れだった。長く続く初期微動。震源は遠そうだが、こんなに揺れるからには、震源地の被害はさぞ大きかろう。瞬間、「福島原発は大丈夫か？」と脳裏をよぎった。それは、私たちの反対にもかかわらず、福島県は審査条件を緩和し、昨年9月から福島第一原発(3号炉)で、プルサーマル稼動を開始していたからだ(注4)。

注4 プルサーマルとは、プルトニウムと熱中性子(熱エネルギー程度のエネルギーの小さい中性子)が語源の造語。プルトニウム239とウラン238(いわゆる燃えないウラン)の混合酸化物(MOX燃料)を、通常の軽水炉で運転することである。

通常の軽水炉の燃料は、3%程度のウラン235と97%のウラン238よりなる。ウラン235の1つの原子が、中性子1つを取り込むと、核分裂(2つの原子核に分裂)し、かつ中性子2つと莫大なエネルギー(200 MeV程度)を放出する。このエネルギーを利用するのが原子力発電である。ウラン235が取り込むのは熱中性子であるが、核分裂で放出される中性子はエネルギーの大きい(MeV程度)高速中性子である。したがって、核分裂の連鎖反応を起こさせるには、高速中性子を減速させる減速材が必要で、軽水炉の減速材は水を使っている。原子炉を運転すると、ウラン235が消費され、使用済み燃料棒中には、種々の核分裂生成物や、プルトニウム239を主成分とするさまざまなプルトニウム同位体と、いわゆる燃えないウラン238などが溜まって行く。この使用済み燃料棒を再処理して、プルトニウム239を抽出し、ウラン238と混合酸化物にしてMOX燃料

を作る。プルサーマルのメリットを強いて挙げれば、使用済み燃料を再度使うことである。しかし燃料再処理工場は非常に危険であり、放射毒性廃棄物が減るところか、さらに多くの放射性廃棄物が生まれることになる。核燃料リサイクル、高速増殖炉構想は大変危険である。

プルトニウム 239 は、 α 線を出して崩壊(半減期 24,360年)する。 α 線は空気中ですぐ減衰する(紙1枚で止まる)ので、外部被曝は怖くないが、プルトニウムのチリを肺に取り込めば、放出されるエネルギーのすべてが、付着した周囲の細胞に吸収されるので、ピン・ポイントでダメージを与え、発癌のリスクが高い。

まもなく、三陸沖に大地震があったことが報道される。津波の警報もだされた。原発は地震を感じて自動停止(制御棒が挿入された)したと伝えられ、ひとまず良かったと安心する。津波は三陸一帯を襲い多くの集落を押し流し2万人近い犠牲者を生んだことは周知である。

さて、停止ということで、すっかり安心し、津波被害に注目が集まっていた頃、原発では恐ろしい事故が進展していたのである。

私は、原子炉利用や放射性管理区域での実験に従事したが、実験施設では厳重な管理が行われ、個人の被曝線量モニターもする。そして、大概の放射線業務従事者がそうであるように、私も線量計に検出されるほどの被曝をしたことは一度もない。それに比べて、今日の福島県下の小学校では20 mSv/年を超える土壌の上で授業が行われるとは信じられないことだ。

3. 複雑系とべき乗則*)

3.1 事故のなだれが大規模停電を導いた

2003年8月14日、午後1時42分、米国中西部の独立システム送電網オペレータの1人が、ルイビルガスと電気オペレータに向かって、「おい、どうした?」^[1]と問いかけた。その2時間半後には、北東合衆国から南東カナダにかけて、5千万人の人々が送電網からの電力を失った(Fig.1)。

3年後の2006年11月4日、夜の9:30に、ドイツの送電網オペレータが、クルーズ・ボート“ノルウェーの真珠号”の安全通行を許すために、Ems川をよぎる1対の配電線の接続を切り、それから半時間以内に、1千5百万人のヨーロッパ人が暗やみに座ることになる(訳注1)。

米国中西部で起きた比較的日常的些細な問題や、ドイツにおけるクルーズ・ボートを通過させたことが、世界の最も技術的に進歩した社会を支える電気基盤を、完全に麻痺させる事故の引き金になるのは、どうしてだろうか? 電気エネルギーが、現代社会のほとんどの様相で重要であるに鑑み、この事故のなだれを理解するのは非常に重要である。

送電網が複雑系であることは、誰もが認めるだろう。その部分部分を見たので

*) 3章は、2011年MAMのエッセイ[1]の翻訳である。

エッセイの翻訳・転載を快諾された、James M. Crowley (Executive Director, SIAM), Mike Breen (AMS Public Awareness Office), および、著者代表の Paul Hines (University of Vermont) 各氏に感謝する。

原著エッセイには20あまりの引用文献がある。文中に引用箇所だけは示すことにしたが、煩雑になるので文献リストは割愛した。

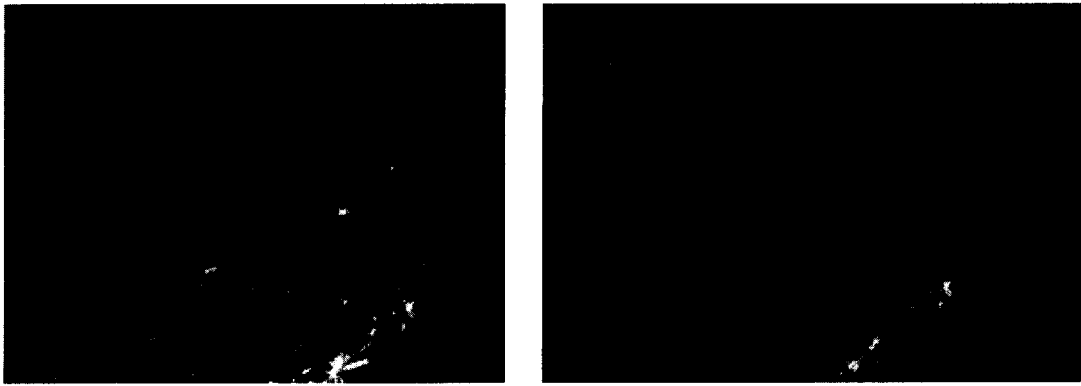


Fig.1 大規模停電前後の衛星写真. 左が停電前, 右が停電後. この停電で5千万人が電力を失った.

は, 送電網を完全に理解することはできない. ここで定義する送電網とは, 物理的基盤, 人間個人, 組織のすべてを含み, 電気の生産, 分配, 消費の連携が行われる場所で, 他の複雑系に共通の多くの特性を有する. 国際金融のシステムのように, 送電網は, 何百万という物理的なハードウェア/ソフトウェアと行為者(人間)によって稼働される. インターネットと同じように, 送電網はしばしば偶然(ランダム)事故と悪意ある攻撃の両方にあう. ハリケーンが形成されるときに相互作用する気象域のように, 要素間, および, 要素と社会との間に強い非線形の関係が存在する. 電力システムは, 時折, 甚大で高価な事故を起こす.

訳注1 独立システム・オペレータとは, 一つの州(時には複数の州)の電力システムの制御・監視を行う組織.

日本でも, 2006年8月に大規模停電が起きている.

2006年8月14日, 午前7時38分(日本時間), 旧江戸川を航行中のクレーン船がアームを高圧線に接触させ, これを切断した. アーム長33mのクレーン船が, 現場に到着後すぐに浚渫作業にかかれるように, 曳航中にアームを上げたため, 旧江戸川上の高さ16mの位置にある高圧線を破損したためである.

3.2 リスクとべき乗則

リスクとは, 「損傷や喪失の機会」へ晒されることである^[2]. イベント X があるとしよう(イベントでは何か悪いことが起こる). X にともなうリスクを $R(X)$ と書く. $R(X)$ は悪いイベントが起こる確率 $Pr(X)$ と, そのイベントのコスト $c(X)$ で定義する. X のリスクは,

$$R(X) = Pr(X) \cdot c(X) \quad (1)$$

例えば, ジムが架空の商品会社で, 50ドルで株を購入したとする. 株が急落し, ジムがすべての金を失うイベントを X とし, 株の急落は, 10回に1回としよう. 株購入に伴うリスクは,

$$R(X) = \left(\frac{1}{10}\right) \$50 = \$5$$

多くの場合, イベント X の重大度は変化できる. 例えば, ジムは, 10回に1度はすべての金を失い, 10回に1度は半分だけ失い, 10回に1度は1/4だけ失い,

10 回に 1 度は、何も失わないと仮定する。送電網の場合の重大度の尺度は、停電で影響を受ける人口あるいは停電で断ち切られた電力需要総量とする。正確に 52,189 人あるいは 1000 MW の停止の停電確率は無視しうるほど小さく(それほど意味がない)、特定の範囲内に入るイベントに伴うリスクが問題になる。例えば、ジムが半分以上の金を失うときのリスクを見出したいとする。全リスクを見出すには、個別リスクを加算する： R_1, P_1, c_1 と R_2, P_2, c_2 を、リスク R (半分喪失, 全額喪失), 確率 P (この場合は、各イベントはすべて $1/10$)、コスト c (\$25, \$50) とするから、全リスク R_{total} は

$$R_{total} = R_1 + R_2 = P_1 c_1 + P_2 c_2 = \frac{1}{10}(\$25) + \frac{1}{10}(\$50) = \$7.50$$

一般に、全リスクは N 個のイベントの和である。

$$R_{total} = \sum_{n=1}^N Pr(X_n) \cdot c(X_n)$$

イベント・サイズが、連続空間のいたるところで定義されるなら、確率質量関数 $Pr(X)$ は確率密度関数 $p(x)$ で置き換えられ、和は積分で置き換える。

起こりうる悪いことの連続領域の S_1 と S_2 間のイベント・サイズで、リスク期待値は：

$$R(S_1, S_2) = \int_{S_1}^{S_2} p(x) \cdot c(x) dx \tag{2}$$

確率密度関数 $p(x)$ とコスト関数 $c(x)$ を既知とすれば、式(2)によりリスク評価ができる。もう少しリスクを理解するために、製造会社を考察しよう。会社が工場を所有しており、毎日百万個の商品を製造するとする。典型的には、工場では毎日 50 個の欠陥商品が製造される。しかしながら、欠陥商品の個数は、日々変化する。欠陥商品の製造に、なんらの統計的關係がないとき、いろいろな個数の欠陥商品がでる確率を記述するのは Poisson 分布という統計モデルである。Poisson 分布は、与えられた日に、 x 個の欠陥商品を製造する確率を教える：

$$Pr(x) = \frac{50^x e^{-50}}{x!} \tag{3}$$

この分布の形を Fig. 2 に示すが、50 にピークをもつゆがんだ釣鐘型である。

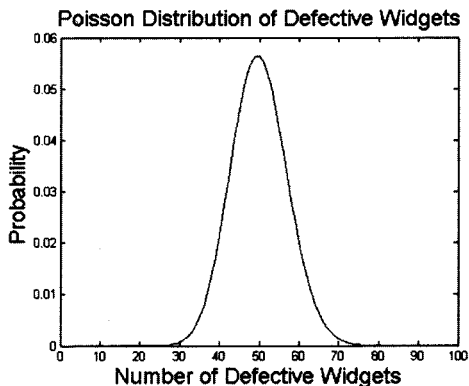


Fig. 2 ポアソン分布は種々の個数の欠陥商品がでる確率を示す。曲線は 50 個でピークを持つベルのような形である。

商品会社は、欠陥商品ごとに \$100 失うとする。\$x\$ 欠陥商品を製造するとコストは

$$c(x) = \$100 \cdot x \tag{4}$$

100 以上の欠陥商品を製造するような悪い日のリスクを知りたいければ、式(3)、(4)をリスク式に入れ、欠陥商品個数が 100 から 1,000,000 であるリスクを合計する。

$$R(\text{bad day}) = \sum_{x=100}^{1,000,000} \left(\frac{50^x e^{-50}}{x!} \right) (\$100 \cdot x) \tag{5}$$

この総和を計算すると、現実的には、悪い日のリスクは \$0 となる。70~90 個の欠陥がある穏やかな悪日でさえ、全リスク期待値 \$10 足らずである。比較のため、欠陥商品が 40~60 の通常日のリスクは、だいたい \$4,300 である。

これなら、工場リスク低減の努力は、通常の損失を小さくするようにすべきで、最悪日の心配には及ばない。

送電網の大規模停電の統計的特性を調べると、大変異なるストーリーを見る。大規模停電で電力サービスを失った米とカナダの顧客数を考慮し、大規模停電を 50,000 以上の顧客を遮断したものと定義する。1984-2006 年の期間には、^[3,4]によれば、この種の停電は、1 億 6 千万人の顧客を遮断。これは 1 日当たりになると、平均 19,000 人の顧客を遮断した。

もし、式(5)でしたと同じ統計的仮定、すなわちイベントは、 $\lambda = 19,000$ の Poisson 分布(訳注 2)で記述されるとすると、50,000 人以上の大規模停電のリスクは、ほとんどゼロになる。これは明らかに仮定がおかしい。なぜなら、大規模停電は、日常状態のうちに現実に起こり、実に高コストであった。大規模停電に関しては、標準の統計的仮定が使えないということだ。

訳注 2 Poisson(ポアソン)分布は、 $p(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!}$

それは何故だろう。Fig. 3 に、北米で 1984-2006 年に起きた大規模停電を示した。横軸は停電の大きさ \$S\$、縦軸はランダムに選んだ停電が \$S\$ 以上である確率である。この図は、すべての停電を 1 つの帽子に入れ、ランダムにその 1 つを引き当てるとき、それが何であるかを示すものだ。対数スケールを用いたのは、サイズの大きいイベントで小さい実現確率のものも示すためである。

もし、釣鐘カーブ(Gaussian あるいは Poisson 分布)あるいは Weibull 分布(図参照)のような指数統計を用いるなら、非常に大規模な停電の確率を著しく過小評価することになる。実際、約 1000 MW 以上では、データは、べき乗則確率分布によく合う。それは、つぎの形式の累積確率分布関数である：

$$Pr(X \geq x) = \left(\frac{x}{x_{\min}} \right)^{-\alpha} \tag{6}$$

ここで、\$X\$ はランダムに選んだ停電で、 x_{\min} は最小値である。(6)に対する確率密度関数は：

$$p(x) = \frac{\alpha x_{\min}^{\alpha}}{x^{\alpha+1}} \tag{7}$$

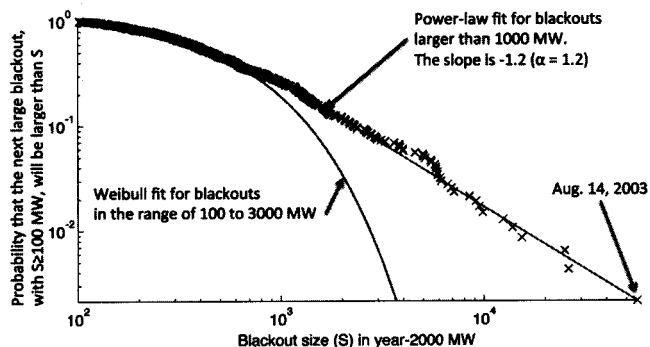


Fig. 3 S([MW]メガワット)以上の大規模停電の確率. 数字は人口増加と電力需要の増加でスケール合わせしている. [4]の数字を採用した. べき乗則は初めて[5]で発表された.

べき乗則確率関数は、とりわけリスクの考察で、奇妙な性質を持っている。なぜそうなのかを理解することは、非常に重要である。我々の工場に戻ってみよう。毎日の欠陥品の個数が、Poisson分布でなく、べき乗則分布に従うと仮定してみよう。コストでは欠陥品当たり \$100 はかわらない(式(4))。工場は製造を続け、平均で日に 50 個の欠陥品が出る ($\alpha = 0.82$ の指数のべき乗則)。欠陥品は連続変数でモデル化され、工場は、日に少なくとも 1 つは欠陥品製造とする ($x_{\min} = 1$)。このとき、100 個以上の欠陥品製造のリスクは、式(2)から計算できる。 $S_1 = 10^2, S_2 = 10^6$ を用いる。

$$R(\text{bad day 2}) = \$100 \int_{S_1}^{S_2} x \cdot p(x) \quad (8)$$

$$= \$100 \int_{S_1}^{S_2} x \cdot \left(\frac{\alpha}{x^{\alpha+1}} \right) dx \quad (9)$$

$$= \$100 \int_{S_1}^{S_2} x^{-\alpha} dx \quad (10)$$

$$= \$100 \frac{\alpha}{-\alpha+1} [x^{-\alpha+1}]_{100}^{1,000,000} \quad (11)$$

$$= \$100 \frac{\alpha}{1-\alpha} (S_2^{1-\alpha} - S_1^{1-\alpha}) \quad (12)$$

$$= \$100 \frac{0.82}{0.18} (10^{6 \cdot 0.18} - 100^{0.18}) \quad (13)$$

$$\cong \$4,400$$

前の統計で \$0.00 であった悪日のリスクは、\$4,000 以上になった。工場が 1000 個以上の欠陥製品を製造する大悪日の確率は、\$3,900 をわずかに下回る程度である。べき乗則確率関数は、リスクの大部分が、めったに起きぬ大きな損失に関連付けられている。これに対して、Poisson 分布では、リスク大部分が、小さな損失によって引き起こされる。もし、工場がべき乗則工場であれば、そのリスク管理への取り組みは、1~100 個の欠陥品を製造する通常日ではなく、何千個もの欠陥品を製造する一見ありそうもない日に焦点を当てるべきだ。

さらにべき乗則工場の奇妙な性質を説明するために、工場が特定の日に製造で

きる欠陥品の数に上限はないと仮定しよう(原文注)。1日あたりの欠陥品の平均数は50個で変わらないならば、無限べき乗則工場に対するべき乗則指数は $\alpha = 1.02$ となる。この場合、1から1000個の欠陥品を製造するリスクは、1,151日に一度だけであるといっても、\$700よりも小さい。1,000,000個以上の欠陥品を製造するリスクは、式(6)が、このサイズの事故は3,000年ごとに一度だけ発生することを教えているのだが、約\$3,800である！リスクの分布に、べき乗則が存在しているときは、大変まれだが重大な結果を生むイベントに注意を払うことが特に重要になる。これらの考察から、送電網における停電サイズがべき乗則に従うという事実が非常に重要なことがわかる。

Fig.3の停電サイズのデータを、式(6)にフィットさせて、指数 $\alpha = 1.2$ を得る。これは、もし最悪事故のサイズに限界がなければ(欠陥品の数が限定されないべき乗則工場)、系のリスクが無限になる臨界指数 $\alpha = 1$ にきわめて近い。

原文注 大惨事のサイズ上限がないと仮定するのが理にかなうのは、たいへんまれなケースではある。しかし、気候変化、国際金融システムでの衝突などのように、考える最大の惨事が非常に大きいケースが若干ある。

訳注4 巨大地震、原発事故などは、このような例である。

なぜリスクが無限になるのか考えるために、悪日のリスクを与える式(12)を考察しよう。べき乗指数 $\alpha > 1$ である限り、 S_2 が無限に増加すれば、項 $S_2^{-\alpha}$ はゼロに近づく。もし、 $\alpha < 1$ なら、2~3百万個の欠陥品のリスクは1~2百万個の欠陥品のリスクを超え；3~4百万個のリスクは2~3百万個のリスクを超える。すべての事故サイズを考慮に入れると、このパターンは、リスク無限大をもたらす。実際のシステムのサイズは有限であるため、現実には実際のシステムが無限大のリスクを持つことはない。最悪の停電でも、接続された電源網のサイズよりも大きくはならない。米国では、この最悪のケースは、およそ550,000 MW(東北アメリカ網のピーク負荷)で、これは、2003年8月の停電の大きさの約10倍である。多くの場合、停電のサイズは、サイズのべき乗則に従い、イベント・サイズが最悪のケースに近づくほど、指数関数の尾を曳く(釣鐘型カーブに似る)。

3.3 べき乗則を説明する

この時点で、“なぜ停電はべき乗則の確率分布を持っているのか？”という基本的な疑問を持つだろう。研究者の間では、いくつかの論争トピックが残されているが、根本的な原因は、ある悪日にいくつか事故が起きると、たくさんの事故が起きる機会が増加するということである。Poisson分布なら、個々の事故が統計的に独立である(つまり、事故の間に系統的な関係がない)ので、種々のサイズの事故機会の評価ができる。事故間の相関は、大きな事故を増加させる。これには、2つの潜在的原因がある。第一は、事故の共通原因である。巨大ハリケーン、氷の嵐、地震は、多数のコンポーネントに損傷を与えるため、非常に大きな停電を惹き起こす。ハリケーンによる被害は、べき乗則に従い^[6]、少なくとも、いくつかの場所では、停電の統計は天候や気候の統計に対応するように見える^[7]。

しかしながら、天候が原因のすべてではない。自然災害を停電データから取り除いたときに、べき乗則が残る^[8]。小さいイベントと大きなイベント間の相関の第二の理由は、事故のなだれである。送電網中のコンポーネントは過剰ストレスになると、自動的に自分自身を送電網から切断する傾向がある。例えば、発電機の自動制御システムが、発電機に速過ぎる回転をさせれば、発電機は停止するだろう。伝送線に過大な電流を流せば、電線は加熱し、金属導体は膨張し、撓む。もし、基礎の植生(例えば、樹木)が近すぎると、電線の電流は樹木とアーク放電を起こし、送電線回路のブレーカが落ちるだろう。この場合、そのコンポーネントにかかっていた負荷は、ネットワークの残りを介して直ちに再分配される。再分配された負荷は別のコンポーネントを事故に導くかも知れない。この過程は、急速に繰り返され、大規模な停電が起こる。2003年8月14日の北米、2006年11月4日の欧州のイベントは、この事故のなだれの典型例だ。

事故のなだれが大規模停電を惹き起こすことは明らかになったが、事故のなだれは、停電サイズにおけるべき乗則確率分布を形成するのにならざるも必要というわけではない。有力な仮説は([9]参照)、コスト削減のため効率的に電気インフラを使うことと、事故時のインフラのアップ・グレードの両者の相克にあり、これは大規模な事故なだれにつながる自己組織化過程を起こすというものだ。系の現実の複雑さは、単なる電気系の物理ではなく、事故なだれの物理と送電網オペレータの人為判断との相互作用から来る自己組織化であることだ。人為の介在しない、地震、森林火災、地すべり^[10]のような他の複雑系においても、自己組織化は、べき乗則の事故分布を生じる。

3.4 その他の複雑系における事故のなだれ

事故なだれは、多くの複雑系に共通な性質であり、非線形のシステム——局所的攪乱の拡散などがある。非線形性のために、アフリカの西海岸沖の地球大気のみならず、北大西洋のハリケーン^[11,12]の経路と強度に大きな変化をもたらす。生態系への新しい種の導入は、最終的に大規模な環境破壊につながる生態系の変化を惹き起こしかねない。また、インターネットのミーム、ウイルス・メディア、および他の社会現象は、FacebookやTwitterのようなソーシャル・ネットワークを介して、世界中に急速に拡がった。

もちろん、どのような拡散現象でも、原因やソースを識別するのは、かなり困難だ。乾いた森に落ちたマッチは、近くの木に火をつけ、最終的に大規模な森林火災を起こす。マッチが原因であったと正しい結論を出すかもしれないが、火花があるうがなからうが、森林が燃えやすい状態だった事実を見逃すかもしれない(訳注4)。これは、多くのネットワーク現象に共通の特性であり、接続のトポロジーが現象を支配する主要因である^[13]。

伝統的に、科学者たちはこのような複雑系の将来行動の確率的予測を行うために、数理モデルを使用している。数値予報や気候予測は、自由度数十億の物理系を積分し、エコロジストや疫学者は、沈静化のシナリオの可能性を評価するのに微分方程式および行為者ベースのモデルを使い、高度なコンピュータ・シミュレーションをする。これらのモデリング努力は、最も関連性の高い結合点(節点)の影響を積極的に偽装するなら、非常に困難になる。テロリスト・ネットワークは

その例である^[14]。

近い将来、大規模なネットワーク・システム(天候や送電網など)のシミュレーションに、リアルタイム観測データの信じられないほどの量が得られるようになる。科学者たちは、データとコンピューター・シミュレーションを結合させ、数学モデルを改良し、複雑な現象の理解を向上させる^[15]。たとえば、文化、影響力と感染(例、幸福)などを研究している社会学者は、調査や実験にあまり頼らず、多くの観察や、私たちの集団の相互作用の記述をし、我々がどう行動するか
の理論を示唆するデータが出せるようになる^[16-19]。

3.5 我々の停電リスクの改良

送電網でも、少ないデータから豊富なデータ環境へ移りつつある。過去には、数少ないセンサーが、送電網の最も重要な箇所だけに置かれ、ネットワークの動作状態の評価にぎりぎりのデータを、1分ごとに提供していた。時折、センサーが誤ったデータを提供したり、コンピューター・システムが故障して、この状態評価プロセスは事故を起こした。状態評価の事故は、2003年8月14日の停電の一つの要因であった^[20]。劇的な変化は現在進行中である。高電圧のレベルには、何百個ものセンサー(同期した位相測定ユニットと呼ばれる)が、毎秒30回ほどの詳細測定を大量に提供できるようにインストールされている。低電圧のレベル(あなたの自宅と近所の変電所の間)に関しては、送電網オペレータは最近に至るまで、ほとんど情報を持たなかった。

嵐が、自宅近くの電力線を損傷した場合は、あなたが彼らに電話するまで、電気事業者が知るすべはほとんどなかった。今、多くの電気事業者は、各家庭に、5~15分ごとに、詳細な測定を報告してくるメータをインストールしている。

この新しい“スマート・グリッド”技術は、停電の頻度を低下させる。また、風力や太陽光などの再生可能で断続的な電源をサポートすることもできる。

しかし、スマート・グリッドは、人間と送電網の物理的なインフラの複雑な相互作用による意図しない結果をもたらすことがある。スマートグリッドは、途方もなく高価で、オペレータとコンピューター・システムを生データで圧倒し、新しいプライバシー、セキュリティ、信頼性のリスクを生むであろう。

大量なデータを、電力消費者とシステム・オペレータの双方に有用な情報に変えることが、重要な課題である。停電の統計的な性質から、停電のリスク低減を求める方法は、毎日の小さな停電をだけでなく、めったに起こらないが、非常に大規模で莫大なコストの停電も考慮する必要があり、注意深い考察が必要ながわかる。この複雑さのため、将来の電気エネルギー・インフラを作るのに必要な新しい数学的手法は、データを豊富にするだけでなく、真にインテリジェントなものであることが要求される。

訳注 4 一つの要因だけでなく複数の要因がからんでいるのが複雑系事故の特徴である。津波対策だけで済むものではない。

炉心センサーも壊れて、水位、温度、圧力の信頼できる情報なしで手探りの対処に至っている。

●引用文献

- [1] Paul D. H. Hines, Benjamin O'Hara, Eduardo Cotilla-Sanchez, and Christopher M. Danforth, "Cascading Failures : Extreme Properties of Large Blackouts in the Electric Grid", <http://www.mathaware.org/mam/2011/>
- [2] 谷克彦, RIMS 研究集会(2011, 2, 7-10) 講究録
- [3] 小林傳司, 『トランス・サイエンスの時代』, NTT 出版, 2007
- [4] 谷克彦, 北海道新聞, 書評, 1995, 5月28日
- [5] 高木仁三郎, 『宮沢賢治をめぐる冒険』, 社会思想社, 1995
- [6] <http://www.enecho.meti.go.jp/rw/index.html>, 資源エネルギー庁
- [7] 北川源四郎, RIMS 研究集会(2011, 2, 7-10) 予稿
- [8] 石橋克彦, 参議院行政監視委員会(2011, 5, 23)資料
- [9] 小出裕章, 終焉に向かう原子力(2011, 4, 29) 講演
- [10] 後藤政志, 原子力資料情報室(CNIC) 講演, <http://www.cnic.jp/>
- [11] 現代技術史研究会, 『21世紀の全技術』, 藤原書店, 2010
- [12] 村主進, 『原子力発電のはなし』, 日刊工業新聞社, 1997
- [13] 瀬尾健, 『原発事故』, 風媒社, 1995
- [14] 田中三彦, 原子力資料情報室(CNIC) 講演, <http://www.cnic.jp/>

(たに・かつひこ / 数学月間の会 SGK 世話人)

