原発の確率論的安全評価とマクロ合理的期待理論

山崎　好裕（福岡大学）

はじめに

原子力発電所の安全管理においても、経済学における不確実性への扱いにおいても、確率的な判断を導入した処理が常識的なものになって久しい。ともにアメリカにおける研究の実用化が元になっているのだが、その開始の時期というのが驚くほどぴったり重なる。本報告の第一の目的は、そうした時期的な同一性が偶然のものではなく、決定論的判断から確率的判断への移行という時代背景があったことを示すことにある。そして、そこには、当時のシカゴ大学において経済学者グループと統計学者グループを繋ぐ位置にあり、また、統計的意思決定理論の実用化に努力したサヴェッジ（Leonard Jimmie Savage）の影響力があったことを示唆する。

サヴェッジは主観確率論の公理化を果たし、それに基づく統計理論を展開してベイジアン統計学の基礎を築いたことで知られるが、その営みはラムジー（Frank Plumpton Ramsey）を介して、ケインズ確率論の論理的不完全さを克服する試みであったと読むこともできる。ケインズ確率論はやはり論理的な整合性が取れていないように思われるのだが、それが不確実性の深遠に根ざした思索を含むものであることは確かである。そこで、ケインズ確率論を比較基準としながら、現代の確率的意思決定論におけるあり得る問題点を照射することが、本報告の 2 つ目の目的である。

原子力の平和利用と確率的安全評価

原子力の発電への利用では 1960 年代になると軽水炉の開発が進み、その経済性にも見通しが立つようになって、現代に繋がる軽水炉時代が到来した。しかし、1960 年代半ばまでの軽水炉の安全像は、頑丈な格納容器に原子炉を収容することにより、どんな事故でも放射性物質をこの中に閉じ込めておけるから公衆や環境を危険にさらすことはないという、実に素朴なものであった。だが、実際は、軽水炉の配管等が損傷すると高温高圧の冷却材が失われ、炉心の冷却ができなくなる危険性があったのである。

1960 年代後半になると、軽水炉で冷却材が喪失して炉心が溶融すると、この溶融物が格納容器を破壊してしまう可能性がアメリカで初めて指摘された。いわゆるチャイナ・シンドロームの問題であり、格納容器万能主義の全面的な改定を迫る問題提起であった。LOCA（冷却材喪失事故）が発生した場合には炉心を冷却することが必要であることが認識され、原子炉の安全研究計画が作成されることになった。ECCS（非常用炉心冷却系）という用語が登場したのはこのときであった。

こんななか 1970 年代前半には、原子力損害賠償保険の料率を適正に定める目的で、原子

力発電所の総合的なリスクを解析的に評価する最初の試みが、MIT 教授のラスムセン（Norman Rasmussen）と当時の AEC 研究局次長であったレヴィン（Saul Levin）によって行われた。この研究の報告書がいわゆるラスムセン報告（WASH-1400）で、1974 年に報告書の原案が公開されて意見を公募し 1975 年に最終版が公表された。この研究によって、原発のような巨大で複雑なプラントのリスクの解析的・定量的な評価が可能であること、軽水炉プラントのリスクの大部分は設計の範囲を超えた事故によるものであること、大破断 LOCA よりも小破断 LOCA やその他のトランジエントの方が全体のリスクへの寄与が大きいことが示されたとされる。

しかし、そうした技術的な内容をひとまず措けば、それまでは決定論的なかたちで行われていた原発の安全評価が確率論的なものに取って代わるきっかけとなったことが、この報告がもたらした最も大きな変化である。原発という巨大なシステムを相手にしながらラスムセン報告が成功した理由としてあげられるのが、事故の状態同定を行うためのイベントツリーとフォールトツリーなどを用いた分岐確率推定の工夫であった。イベントツリーは事故シーケンスを並べて、その後の処理が設計通りに行われるかどうかを Yes, No で分岐させて作る。そして、膨大なシーケンスのうち結果が同じものを束ねて数を大幅に減らしていくのである。その上で事故の詳細を And, Or で結びつけながら、部品の故障、人的なミス、自然災害といった最終原因まで遡っていく。これら単純事象の確率が求められれば、掛け合わせによってそれぞれの事故シーケンスの確率を求めることができるのである。

基本的には過去の同一事例から得られたデータに基づいて頻度確率を求めていくのだが、そうしたデータが得られない場合は専門家の経験に基づく主観確率が使われている。問題はこの確率への信頼性ということになろう。論理確率概念に基づくケインズ確率論でも、確率は合理的な推定によっていかなる場合でも求められるとされている。しかし、ケインズ確率概念の特異性の筆頭としてあげられるのは、非数値的な確率をも許容することである。ケインズは 0 と 1 の間に多次元的な確率の展開があり得るとする。そして、多くの非数値的な確率と数値的な確率の間で、大小が比較可能な場合もあれば不可能な場合もあるとしたのであった。とりわけ、戦争や自然災害など頻度の少ない事象について、数値的な確率を求めることが不可能であることに、ケインズはとりわけ注意を促していた。

合理的期待形成における確率概念

ミュース（John Fraser Muth）が、最小分散不偏推定量による期待形成を、需要関数、供給関数と市場の均衡条件から構成された単純な連立方程式モデルに適用したのは、1961 年の論文「合理的期待と価格変動の理論」[1]においてであった。ミュースは変数 X_t が次の確率過程に従うものとする。[2]

---

1 *Econometrica* 29, pp.315-35.

2 ε_{t-i} は期待値 0 で互いに独立な分散 σ^2 の確率変数。

$$X_t = \sum_{i=0}^{\infty} \omega_i \varepsilon_{t-i}, \omega_0 = 1$$

このとき、X_{t+1}と、t 期に利用可能な情報に基づいて形成されるX_{t+1}の予想はそれぞれ、

$$X_{t+1} = \sum_{i=0}^{\infty} \omega_i \varepsilon_{t+1-i},\ X_{t+1}^e = \sum_{i=0}^{\infty} \nu_i \varepsilon_{t-i}$$

となる。予測誤差の期待値をとると、

$$E[e_{t+1}] = E[X_{t+1} - X_{t+1}^e] = E\left[\varepsilon_t + \sum_{i=0}^{\infty} (\omega_{i+1} - \nu_i)\varepsilon_{t-i}\right] = 0$$

であるから、上の予想値は不偏推定量となることが分かる。一方、予測誤差の分散は、

$$\sigma_e^2 = \sigma^2 + \sum_{i=0}^{\infty} (\omega_{i+1} - \nu_i)^2 \sigma^2$$

であるから、誤差分散を最小にする条件は$\omega_{i+1}=\nu_i$である。こうして得られる最小分散線形不偏推定量は、統計的には条件付期待値のことであるから、

$$X_{t+1}^e = E\left[X_{t+1} | \varepsilon_{t,} \varepsilon_{t-1}, \varepsilon_{t-2}, \cdots\right] = E[X_{t+1} | \Omega_t]$$

と表現できる。このように、合理的期待形成仮説の下で予想形成は期待値を取ることと同じ意味になる。

こうしてミュースによって経済学に導入された合理的期待形成は、1970 年代になると周知のように陸続とマクロ経済学に導入されていく。ルーカス (Robert Emerson Lucas, Jr.) の「期待形成と貨幣の中立性」[3]は 1972 年の発表であったし、サージェント＝ウォーレス（Thomas John Sargent & Neil Wallace）の「合理的期待と最適貨幣操作および最適貨幣供給ルール」[4]は 1975 年に現れた。

こうした期待形成への確率の適用はケインズ確率論においても中心的な主題となっており、ケインズは 1 章を割いて確率の行動への適用を論じている。彼の主張の中心は数学的期待値を行動判断に役立てる上での慎重な注意なのだが、機械的適用が留保されるべき理

[3] *Journal of Economic Theory* 4, pp.103-24.
[4] *Journal of Political Economy* 83, pp.241-54.

由になる論点は 2 つある。

1 つは期待値だけでなくリスクをも考慮すべきであるということである。リスクについてケインズは、命題が真であった場合の善の量を A、その確率を p として E＝pA で表わされる期待値に対して、

$$R = p(A - E) = p(1 - p)A$$

で定義している。ケインズ確率論では確率は命題の真偽に関するものであるから、2 項分布に従うことになる。そして、上記のリスクの定式化は 2 項分布の分散に等しいから、ケインズがリスクを分散で測る、ポートフォリオ理論における平均・分散アプローチと同様の行動基準を仮定していたことは明らかである。

不明瞭さは、もう一方の「推論の重み（weight of argument）」を巡る議論の方にある。論理確率は必ず求められるとするケインズであるが、その確率への信頼の度合には様々なレベルがあることを述べ、新しい試みとして「推論の重み」という測度を導入する。確率値に付与されるこの「推論の重み」は、命題に関わる証拠が増えていけば増大していくとされる点でデータ数や情報量に関わっていることだけは確かである。この点、「推論の重み」は、区間推定における信頼係数や検定論での危険率に類似したイメージを持つように思うが、現代統計学に完全に対応する概念は存在しない。人間行動への適用でケインズは、便宜的なものと断りを入れながら、数学的期待値を修正した係数として

$$c = \frac{2pw}{(1 + p)(1 + w)}$$

が示されている。しかし、一瞥すれば明らかなように、「推論の重み」w は確率 p と全く対称的に扱われており、これでは確率値を 2 重化しただけであるという批判を免れないだろう。ただ、ここで確認しておきたいのは、数学的期待値を意思決定に適用する際に、極めて慎重でなければならないというケインズの強い信念と洞察があったということである。

サヴェッジの意図と主観確率の公理化

私はかつて学史学会全国大会でサヴェッジとルーカスとの関連性について報告[5]したことがある。サヴェッジはシカゴ大学の経済学者グループと統計学者グループの双方に影響力を持ち、主観的・個人的確率論の公理を打ち立てた。これによって頻度説に代わる確率が数学的に頑強なものであることが明確に示されたのである。また、サヴェッジは第 2 次大戦中にフォン・ノイマン（John von Neumann）の統計学アシスタントをしていたことも

[5] 第 66 回全国大会（2002 年 10 月 26・27 日、新潟大学）、「サヴェッジからルーカスへ」。

あり、統計学的な意思決定論にも大きく貢献した。私の報告は、シカゴ大学[6]で学んだルーカスがサヴェッジの意思決定論に影響されてミュースの合理的期待仮説をマクロ経済学に導入したという仮説を提示したものであった。このサヴェッジはランダム・ウォーク仮説の導入に関してサミュエルソンに直接的な示唆を与えており、ラスムセンのいたMITへの影響力も持っていたと推察される。そもそも、1951年の主著『統計学の基礎』における主観確率論の公理化や意思決定論への確率の全面利用の試みが、原発の安全評価における確率的方法の導入に大きな影響を与えたであろうことを否定する方が不自然であろう。

ケインズからサヴェッジへの確率論の展開を繋ぐものとして、いったんラムジーに戻っておこう。ラムジーはケインズの確率論を批判的に継承するなかで、「推論の重み」を「確信の度合（degrees of belief）」と読み換えて確率値に統合する。その上で、ケインズの言うように感情を伴う純粋に主観的な信念としてしまえば、それに数値を付与することは難しくなるため、外部から観察可能な、決断に基づく人間行動から確率値を読み取ることを考える。ラムジーの試みの段階で、既にその定式化は公理論的であるが、その中心に置かれるのが「倫理的に中立的な命題（ethically neutral proposition）」である。ラムジーは、選択対象 α と β の差と γ と δ の差が等しいことを、「確信の度合」が 1/2 の中立的命題 P が真のとき α、偽のとき δ となる選択肢と、同じく真のとき β、偽のとき γ となる選択肢が当人にとって無差別となることで定義する。このように効用関数を仮定することから、任意の事象についての「確信の度合」が導出できる。今、α を確実に得られる賭けと、事象が真のとき β、偽のとき δ を得られる賭けが無差別であれば、

$$\alpha = P_r\beta + (1 - P_r)\delta$$

が成り立つから、「確信の度合」P_r は

$$P_r = \frac{\alpha - \delta}{\beta - \delta}$$

となる。

このように効用から確率を導くラムジーに対して、サヴェッジは選択公理から確率と効用を共に導くという方法をとる。サヴェッジが人々の選択行動に関する公理として立てるのは 6 つの内容である。公理 1 は、自然の状態が与えられたとき、行動を表す関数の集合において順序関係が成り立つことを要請するものである。公理 2 と公理 3 はいわゆる「確

[6] 実際には、サヴェッジがシカゴ大学で教えた期間は 1946 年から 1960 年であるから、歴史のコースで学んでいたルーカスが経済学に戻ってからと重なるのは最後の 2、3 年であろう。しかし、サヴェッジがシカゴを去った年に、ルーカスはサヴェッジと親しかったフリードマンの下で価格理論の研究に加わっている。サヴェッジはその後ミシガン大学、エール大学で教え、1971 年に 53 歳の若さで亡くなった。

かなことの原理（sure-thing principle）」である。うち、公理 2 は、同じ結果をもたらすような 2 つの行動の間で選択を行う場合、同じ結果をもたらす事象は選択と無関係であるという内容である。公理 3 は、条件付選好関係とその条件の下で確実に生じる結果との間の対応関係に整合性がなくてはならないということを求めている。公理 4 は、定理が述べることになる確率関係＜*と選好関係＜との同値関係において、＜*に弱順序が形成されることを保証するためのものである。公理 5 は、ある結果に至る行動で、すべての対が無差別になる特殊な状況を排除している。公理 6 は、選好順序＜から導出される、実数値をとる順序の存在を確保するために、無限に望ましいとか無限に望ましくないとかいうような結果が存在することを排除している。

ここから求められる定理は以下の内容である。なお、ここで S は状態の集合（A, B はその部分集合、A^c, B^c はそれぞれの余集合）、X は結果の集合（x, y はその要素）、F は行動の集合（f, g はその要素）である。

$$\mathrm{A} <^{*} \mathrm{B} \Leftrightarrow \mathrm{f} < g \;\text{ whenever }\; \mathrm{x} < y, f = x\ on\ A, f = \mathrm{y\ on\ A^c}, \mathrm{g} = \mathrm{y\ on\ B}, \mathrm{g} = \mathrm{x\ on\ B^c}$$

という同値関係で結ばれる S のすべての部分集合族で定義される＜*に対して、

$$\mathrm{A} <^{*} \mathrm{B} \Leftrightarrow \mathrm{p(A)} < \mathrm{p(B)}$$

を満たす確率測度 p が S の部分集合族上にただ一つ存在し、この測度は B の部分集合である C に対して、

$$0 \leq \rho \leq 1 \Rightarrow \mathrm{p(C)} = \rho \mathrm{p(B)}$$

という性質を満たす。

おわりに

サヴェッジの定理は、人間の判断なり行動が必ず数値的な確率を与えることを保証する。そして、それは 1970 年代以降の経済社会において、数値的な確率に基づく諸判断が合理的で信頼に足るものであるという信仰の源になったように思われる。だが、論理を逆にして、主観確率に基づく判断や選択が、事後的に後悔しないような納得いく結果をもたらすことを保証するものでは決してないこともまた自明である。

統計的に言って効率的な予想を形成したり、数値的確率に基づく定量的な判断をしたりすることは常に可能である。しかし、それらへの過信は常に戒められなくてはならない。そのことこそが、ケインズ確率論が現代の私たちに残した唯一の遺産であるかもしれない。