



ポスト・ノーマルサイエンスとグローバル感度解析

香田 正人*

Post-Normal Science and Global Sensitivity Analysis

Masato KODA*

Abstract— Post-Normal Science is a total management conception of the complex science-related issues. By an inclusion of large-scale complex systems as models of our modern society, it is able to provide a coherent framework for an extended participation in decision-making and/or assessing possible solutions and alternatives for complex public issues, based on the new technology of global sensitivity analysis. Global sensitivity analysis is a means of quality control of generic models and is useful in the assessment of public policies. Global sensitivity analysis provides a new technical tool for Post-Normal Science.

Keywords— Post-Normal Science, global sensitivity analysis, large-scale complex systems

1. はじめに

科学技術と社会との関係が大きく変容し、社会の高度技術化が急速に進展しつつある。すなわち、科学技術の成果が広く社会に浸透するとともに、相互の関係がますます大規模で複雑なものとなり、宇宙システムや原子力プラント、インターネットや国際金融マーケットのような大規模複雑系が出現することになった。つまり、社会発展の基盤となる要素技術数や経済活動のプレイヤー数などが非常に多くなるだけでなく、全体システムが不確定なゆらぎのもとで時間発展するに従い、要素間の階層構造が自己組織的に創発され、それらが絡み合っただイナミックな大規模複雑系となっている。

そうした結果、社会は多大な恩恵を被ると同時に、以前には予想もできなかったようなクリティカルなリスクも抱え込んでいる。たとえば、1986年4月に発生したチェルノブイリ原子力発電所事故や、国際金融マーケットにおける2008年9月のリーマン・ショックは未だ記憶に新しいところである。こうした現代の大規模複雑系が抱える潜在的リスクについても科学技術的に評価することは可能で、専門家に限れば、ある程度の客観的な合意を得ることができよう。

しかし、リスクに対して安全であるか危険であるかのよう、直接の利害関係を持つ個々人の主観的な判断が

反映される社会的ソリューションの評価については、これまでの科学技術の範疇を越える問題群が存在する。

社会の安全性に対するリスク認識についての問いである、「どこまで安全なら、十分に安全といえるのか (How safe is safe enough?)」がその代表例である。つまり、アダム・スミスの「神の見えざる手」が自然には機能しないような、多様な利害関係のトレードオフが存在し、社会的文脈に基づく価値判断が求められる問題群である。筆者が専門としているオペレーションズ・リサーチやデータ科学の分野においても、同様な価値構造を有する問題は少なくない。

こうした問題群に対する接近法として、科学技術を社会的文脈の中で新しく捉え直す「ポスト・ノーマルサイエンス (Post-Normal Science)」の考え方が提唱されている [1]。筆者は、欧州委員会共同研究センターのイスプラ研究所 (イタリア) [2] が主催する、感度解析に関する国際ワークショップ SAMO (Sensitivity Analysis of Model Output) の初回会合 (1995年) に招聘されて以来、3年ごとに開催される同会合への参加を続けてきた。そうして、2010年7月にミラノで開催された第6回の SAMO2010 では、ポスト・ノーマルサイエンスを提唱した科学哲学者のラベッツ氏による特別講演を聞くことができた。本稿では、それを踏まえてポスト・ノーマルサイエンスを紹介するとともに、筆者の研究している感度解析 (特にグローバル感度解析) との関連について考えてみたい。

*筑波大学大学院システム情報工学研究科 茨城県つくば市天王台 1-1-1

*Graduate School of Systems and Information Engineering, The University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki

Received: 26 January 2011, 1 March 2011

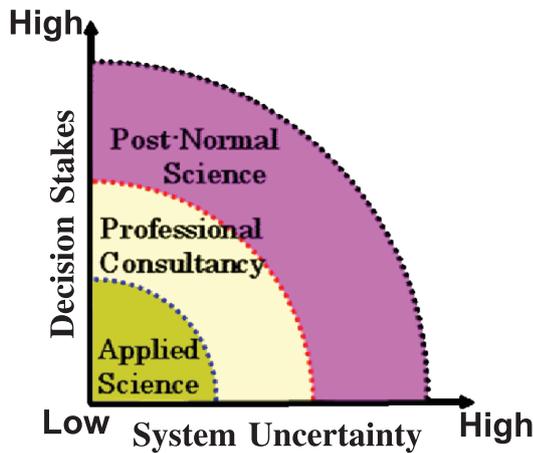


Fig. 1: Post-Normal Science

2. ポスト・ノーマルサイエンス

ラベッツ氏は現代科学を、Fig. 1 に示すような2つの軸に基づき分類している。すなわち、横軸を「系の不確実性 (System Uncertainty)」、縦軸を「意思決定に関する利害関係 (Decision Stakes)」として、この両軸のレベルがともに高い領域を「ポスト・ノーマルサイエンス (Post-Normal Science)」と規定した。これとは対照的に、両軸のレベルがともに低い、従来の規範的科学 (ノーマルサイエンス) の領域を「応用科学 (Applied Science)」とした。そうして、ポスト・ノーマルサイエンスと応用科学の中間領域を「専門的コンサルタンシー (Professional Consultancy)」としている。余談ではあるが、トーマス・クーンは、明確に定義可能な個々のパラダイム内に閉じた規範的科学における研究領域を、パズル解きの世界とも呼んでいる [3]。

応用科学領域においては、短期的に差し迫った問題に対する意思決定について、必要な知識や情報を持っている専門家への委任が行われ、得られた結論は応用科学を営みとする同業者 (ピア) の相互レビューによって評価される。また、結論をもたらす影響も、応用科学者のコミュニティ内に閉じている場合が多く、社会的にも限定されている。これは、一般の非専門家には必要な素養 (専門的知識や情報など) が不足ないしは欠如しているからという、意思決定に関する欠如モデル、もしくは従来型の専門委員会方式である。

次に、専門的コンサルタンシー領域では、意思決定の専門家への部分的な委任が行われる。すなわち、意思決定についてのコンサルティングである。通常、コンサルタンの創造性は設計という技術形態を通して社会化され、一般的な評価を受けることが多い。例としては、航空機や原子力プラントの設計エンジニア、手術を執刀する外科医の場合などが挙げられよう。専門的コンサルタ

ンシーでは、専門家と非専門家が意思決定について相互にやりとりを行うといった、動的な関係性の中で実現される相互主観的な文脈価値が重要となる。

これに対して、ポスト・ノーマルサイエンス領域では専門家のみでなく、専門家以外の利害関係者 (ステークホルダー) も意思決定に関与する。たとえば、冒頭に述べたチェルノブイリ原子力発電所事故のように、長期的かつ不可逆的な被害をもたらすクリティカル・リスクを有する大規模複雑系を取り扱う場合には、大学や研究機関の専門家のみならず、関連する複合的課題に通じた政策担当者、実務家、市民等の利害関係者が協働する必要がある。また、そうした場を提供する社会的プラットフォームの構築も必要となる。

こうした分野横断型の、従来の規範的科学を越えた意味におけるポストモダン主義的な枠組みとして、ポスト・ノーマルサイエンスが提唱されたのである。つまり、専門家の判断に委任する意思決定が必ずしも問題解決にはつながらず、ステークホルダーの多様な利害関係を踏まえた社会的文脈に基づく価値判断を必要とする領域がポスト・ノーマルサイエンスである。

ポスト・ノーマルサイエンスの考え方は、ギボンズが「モード2」の知的生産様式と名づけたモード論にも通じる [4]。すなわち「モード1」の知的生産様式は、個々の規範的科学の範疇で独創的学術価値を求めて行われる従来型のアカデミックな活動である。これに対して、モード2の知的生産様式は専門家のみならず、ステークホルダーが協働する分野横断型のポスト科学的な取り組みである。すなわち、ポスト・ノーマルサイエンスはモード2の知的生産様式の延長上にあるといえる。

3. グローバル感度解析

現代社会が直面する重要課題である、地球温暖化の防止やクリーンな環境の保全、持続可能な経済を支える多様な資源とエネルギーの確保、さらには国際金融マーケットの安定化等の複合的課題については、十分な情報や知識が得られない不確実な状況下でも、可能な代替案を評価し必要とされる方針を決定することが求められている。こうした複合的課題は、我々の知識不足や情報不足等に起因する不確実さを内包し、不確定なゆらぎのもとでダイナミックに発展する大規模複雑系の問題として理解可能である。同時に、その利害関係が広範囲に渡るため、ソリューションの社会的合理性についての価値判断が論争的である。加えて、意思決定の局面も切迫している場合が多い。

このような複合的課題に対しては、大規模複雑系として数理的なモデリングを行った後、シミュレーションにより評価することが実施されてきた。1972年のローマ

クラブの報告書「成長の限界」では、フォレストアの提案したシステム・ダイナミクスを用いたシミュレーションに基づき、経済と人口の抑制を直ちに実行しなければ人類社会は深刻な危機に直面すると警告したのであった[5]。しかし、世界モデル構築の際に便宜上組み込まれた仮定や、アプリアリな論拠には不確実性があり、世界モデル自体が開いた系とならざるを得なかった。なおかつ、当時の情報化のレベルやデータ不足の状況下におけるシミュレーション結果は論争を招くもので、現実の政策決定プロセスに関与することもなかった。

メドウズによる「成長の限界」の最大の弱点は、結果が導かれるための様々な仮定や要因を、パラメータとして変化させることにより世界モデルの品質保証をしていなかったために、異なる仮定や別のデータから得られる帰結を見て取れなかったことにある。このような作業仮説としてのモデルに関して、入力パラメータを変化させたとき、異なる仮定に対して結果がどのくらい敏感に変動するかを検証し、その作業仮説の論理構造がどのように組み立てられているか、また代替的な帰結がどうなり得るかを分析するアプローチは、一般に感度解析として知られている。

感度解析は、モデルにおける入力因子（パラメータ）の現象論的な不確実さが、モデル出力の認識論的な不確実さに与える影響を定量化する技術である。特に、著者もその開発に係わってきたグローバル感度解析（Global Sensitivity Analysis）[2, 6]は、ポスト・ノーマルサイエンスの考え方に沿っている。グローバル感度解析が、従来の感度解析と大きく異なるのは次の3点である。

- ① 着目する入力因子（パラメータ）は、一定あるいは無限のパラメータ空間で、その不確実さを表現する確率密度関数で示される分布に従って調べられる。
- ② 入力因子によって生じられたモデル出力は、全パラメータ空間における他のすべての入力因子のグローバルな変化も同時に勘案して評価される。
- ③ モデル独立である。

ここにモデル独立（model independent）とは、特定のモデル形式（たとえば、線型システムか否か）や個別のモデル構造（加法性や単調性など）に制約されることなく、あるいは、入力因子間の相互作用の有無などによらず、感度解析が実行可能なことである。

すなわち、グローバル感度解析では、対象への入出力関係などのシステム機能に着目し、大規模複雑系が内包する不確実さを確率密度関数の分布形状として組み込んでいる。さらに、現象に対して演繹的に導かれたモデル構造に形式的に依存するのではなく、メタモデルによる帰納的でモデル独立な定式化がなされているので一般性が高い。具体的には、分散分析の適用により、モデル出

力の総分散（すなわち不確実さ）を関連するモデル因子の各次元の偏分散（partial variances）に分解して、総分散への寄与度を評価するものである[6]。

従って、グローバル感度解析の適用により、全入力因子にわたるモデル出力の不確実さと、それらの相互作用の効果を一度に包含して評価できる。言い換えれば、グローバル感度解析によって初めて多様なエージェント間の相互作用などを統計学的に厳密に取扱い、ポスト・ノーマルサイエンスに必要とされる大規模複雑系の包括的な特徴を総合的に分析することが実現される。

このように、グローバル感度解析に基づいて様々な社会的文脈価値のトレードオフを吟味することにより、代替案の評価や施策の優先度の決定などを行うことが可能となる。こうした観点から、ポスト・ノーマルサイエンスの提唱者であるラベッツ氏が、専門的には畑違いに思える感度解析に関する国際ワークショップ SAMO2010の特別講演に招聘されたのであった。グローバル感度解析の近年における技術展開の詳細については、日本オペレーションズ・リサーチ学会機関誌「オペレーションズ・リサーチ」第55巻第10号の特集[7]を参照していただければ幸いである。

4. おわりに

近年の急速なグローバル化によって、地球や市場の有限性に気付かされた結果、人々の利害関係についての認識も物質的な充足から持続可能な経済や、安全社会などの質的充足に移りつつある。これに対応する形で、規範的科学についても、ポストモダン主義的なパラダイムシフトが求められている。すなわち、現代の複合的課題に対して有効なソリューションの社会的実装には、科学技術の量的充足のみでは不十分で、利害関係者の多様な文脈価値に開かれたポスト・ノーマルサイエンスからの接近も必要であろう。こうした場合に、グローバル感度解析を社会的ソリューションの品質保証のためのツールとして活用できる。

ポスト・ノーマルサイエンスには規範的科学を超えて、シュンペーターの言う新結合（イノベーション）[8]を具現化させる、現代科学技術の新しい表象的ツール、あるいは社会的プラットフォームとして機能することが期待されている。

参考文献

- [1] J. R. Ravetz: "What is Post-Normal Science," Futures, Vol.31, pp. 647-653, 1999.
- [2] 欧州委員会共同研究センター・イスプラ研究所（European Commission, Joint Research Centre in Ispra）Econometrics

- and Applied Statistics Unit ホームページ, <http://sensitivity-analysis.jrc.ec.europa.eu>
- [3] クーン (T. S. Kuhn 著, 中山茂訳) : “科学革命の構造,” みすず書房, 1971.
- [4] ギボンズ (M. Gibbons 編著, 小林信一監訳) : “現代社会と知の創造 モード論とは何か,” 丸善, 1997.
- [5] メドウズ (D. H. Meadows 編著, 大来佐武郎監訳) : “成長の限界 — ローマ・クラブ「人類の危機」レポート,” ダイヤモンド社, 1972.
- [6] A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana, and S. Tarantola: “Global Sensitivity Analysis The Primer,” John Wiley & Sons, 2008.
- [7] 香田正人編: “特集 現代感度解析入門: FAST と Sobol' 法を中心として,” オペレーションズ・リサーチ (日本オペレーションズ・リサーチ学会機関誌), Vol.55, No.10, 2010.

- [8] 伊東光晴, 根井雅弘: “シュンペーター — 孤高の経済学者 —,” 岩波新書 273, 1993.

香田 正人



1976 年東京大学大学院工学系研究科博士課程航空学専門課程修了。Caltech 研究員, 東京大学助教授などを経て, 1998 年筑波大学大学院システム情報工学研究科教授, 現在に至る。データマイニング工学, 感度解析理論, 数理最適化理論などの研究に従事。工学博士。日本オペレーションズ・リサーチ学会などの会員。
