講 演
 Lecture

地質リスク・不確実性評価の課題～効果的な適用に向けて*

高 山 邦 明^{**,†}

(Received September 13, 2017 ; accepted November 9, 2017)

Issues in risk and uncertainty evaluation – Toward improved application in E&P

Kuniaki Takayama

Abstract : Geological risk assessments have been routinely carried out for exploration and development in oil and gas since 1990s. Because of our lack in sufficient information and knowledge of subsurface resources, the geological risk is quantitatively evaluated using probabilistic techniques. Even though the methodologies of risk assessments look well established already, some issues still remain in their actual execution and application and three key issues are highlighted here: geological chance of success, cognitive biases and post-well evaluation.

Geological chance of success may be regarded as relatively a simple concept of risk evaluation, but its proper understanding and implementation can't be easily achieved as it is not an absolute number and its assessment depends on quality/quantity of information and technical skills/experiences of evaluators.

As subsurface evaluation relies on fairly limited information under great uncertainties, it is very susceptible to cognitive biases including anchoring, availability heuristic, conjunction fallacy, overconfidence and hindsight bias.

Post-well evaluation is a crucial part of the risk analysis and required to be conducted so as to improve the quality of risk evaluation.

Keywords : geological risk, geological chance of success, cognitive bias, post-well evaluation

1. はじめに

探鉱プロスペクト評価では石油や天然ガスの発見確率を評価し、発見時に期待される埋蔵量は不確実性を考慮して確率分布として見積もる、いわゆる地質リスク評価が行われ、経済性評価に用いられている。開発・生産段階の油ガス田においては想定される石油・ガスの胚胎モデルに基づいて生産プロファイルや究極可採埋蔵量の不確実性が評価され、開発の意思決定やフィールドの価値評価に使われる。

地質リスク評価の歴史をひも解くとイージーオイルや大きな埋蔵量の発見が難しくなりつつあった 1980 年代に遡る。R. E. Megill や E. Capen といった先人が探鉱のリスクや経済性について検討し、現在の地質リスク評価の基盤となるコンセプトを築き上げた（たとえば、Megill, 1984, 1977）。当時の集大成にあたるのが 1992 年に AAPG から発

行された「The Business of Petroleum Exploration」である (Steinmetz ed., 1992)。

低油価が続いた 1990 年代になると石油各社がリスク評価を本格的に実務で採用を始め、リスクが定量化され、ポートフォリオマネジメントにより投資の最適化がシステムティックに行われるようになった。日本では石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) の前身の石油公団が 1990 年代後半から導入を開始し、探鉱投融資対象プロジェクトの採択審査に用いるようになり (佐藤・高山, 1997; 中西, 2000; 高山, 2002, 2008), 広く国内各社も定量的な地質リスク評価のシステムを導入した。石油公団がシステム導入にあたり、米国 Rose & Associates 社とともに行った調査・検討結果は、AAPG から「Risk Analysis and Management of Petroleum Exploration Ventures」というテキストとして発刊され、リスク評価の参考書として広く用いられている (Rose, 2001)。

地質リスク・不確実性評価は今や定式化され、各社のルールに従ってごく一般的に行われ、シェールガスなど非在来型石油開発にも適用されている。しかし、リスク評価は私たちが地下の石油資源を直接見ることができないという情報の欠如に起因する存在予測の不確かさの度合いを定量的に示すものであり、その正しい理解は容易ではなく、また、

* 平成 29 年 6 月 14 日、平成 29 年度石油技術協会春季講演会、地質・探鉱部門シンポジウム「地質リスクと不確実性評価」にて講演
 This paper was presented at the 2017 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "The Geological Risk Assessment and Resource Uncertainty on Technical Evaluation" held in Tokyo on June 14, 2017.

** 国際石油開発帝石(株)パース事務所イクシスサブサーフェス Ichthys Subsurface INPEX Perth

† Corresponding author : E-Mail : kuniaki.takayama@inpx.com.au

実践においてさまざまなバイアスを受ける可能性が高いことから、いくつかの課題が見出される。本講演では、地質的成功確率の理解、認知バイアスの存在、事後評価の重要性の3つの課題について紹介する。

2. 地質リスク・不確実性評価の課題

2.1 地質的成功確率の理解

探鉱プロスペクトの地質的成功確率は石油システムを構成要素に分け、個々が成立している確度を数値化し、それを掛け合わせることで算出される。要素に関するデータの質・量とそのデータが示す要素の成立・不成立に関する情報に基づいて、確度は0から1の間で評価される。情報が少なく判断が困難な場合が基準の0.5、情報が増えるにつれ、成立する可能性が高いと1、あるいは逆に成立している可能性が低いとより0に近い確度になる。要素の1つでも欠けていると石油システムが成立しないことから要素を掛け合わせることになる。比較的シンプルなコンセプトだが、成功確率を正しく理解することは実は容易ではない。

要素の数は評価者によって異なっており、根源岩、炭化水素の移動集積、貯留岩、クロージャー、シール（保存を含む）の5要素のケースが多いが、石油会社によっては根源岩と移動集積をまとめて「チャージ」として4要素にするケース、さらにクロージャーとシールを合わせて「トラップ」として3要素にするケースがある。ここで、すべての要素について情報がほとんどなく、確度の評価が0.5になった場合を想定すると、成功確率の評価は要素の数によって異なり、5要素ではおよそ3%、4要素で6%、3要素では13%になってしまう。手法によって確率が変わるというのはおかしい話であるが、要素をまとめればまとめるほど、情報がない場合の評価が0.5よりも小さくなるはずであり、

各要素が含む条件の量や他の要素との重要性のバランスを考慮して確度を評価するシステムとなっていなければならない。また、たとえばシールに関して、クロージャーが4-way か、2ないし3-wayなのか、すなわち、キャップロックだけを考えれば良いのか、断層など側方シールも考える必要もあるのか、純粋な層位トラップのように全方向に加え、下方シールも考えないといけいいのかによって、情報が少ないケースの基準値の値が異なってくることに注意が必要である。層位トラップの場合に往々にして高い成功確率が与えられがちなのは、このシール評価に多くの条件が含まれていることを考慮していないことに起因すると考えられる。

成功確率はこうした個々の要素の確度評価の基準をもつことが非常に重要であり、最終的に算出した確率が結果の実績に合うように要素の評価が行われている、あるいは行えるようなシステムとなっている必要がある。成功確率評価の精度は実績のレビュー、すなわち事後評価（Post-well evaluation）を繰り返す中で評価システムが確立されていくものであり、事後評価がきわめて重要になる。この点については後述する。

そもそも抽出したプロスペクトに石油・ガスがあるかないかはすでに決まっており、すべてを知っている「神」が評価すれば成功確率は1か0かになる（図1）。しかし、相手が地下深部にあって見えないために掘削しない限りそれを確かめられないことから、限られた情報に基づいて我々が予測することになるために、存在の確信度を確率として表現することになる。したがって、もっている情報量、その解釈・評価によって確率は変わり、同じプロスペクトの成功確率が会社や評価者によって異なるのは不思議ではない（図1）。たとえば、保有している地震探査デー

図1 評価者による成功確率評価の違いのイメージ

地下の真の姿を知っている「神」であれば、プロスペクトの成功確率は0%か100%のいずれかになる。我々は限られた情報に基づいて地下の様子を推定することになるが故に確率を用いた表現となり、確率評価は各社がもつ情報の量・質とそれを解釈する技術力に依存する。

タの量や処理による質、Seismic anomaly の評価技術や経験によって成功確率が変わってくることは容易に想像される。すなわち、成功確率評価は情報の量や質、技術力に依存する。

成功確率を A 社が 30%、B 社が 10% と見積もったプロスペクトで発見があった場合、高い確率を見積もった A 社の評価の方が優れていると見なしがちだが、確率評価の妥当性は単一のプロスペクトの結果では判断できず、数多くの結果を統計的にレビューする必要がある。これについても事後評価の重要性として後述する。

成功確率評価に不確実性があることも認識すべき点で、確率の値や期待値にしきい値を設定した意思決定では留意すべきである。Peel (2016) は、成功確率は不十分なデータに基づいた “soft number” であり、一般的に 20% 前後の誤差を伴っているとしている（成功確率 25% であれば、実際の成功確率は 20~30%）。そして、不確かな確率評価に時間を費やすのではなく、経済性がブレイクイーブンとなるのに必要な成功確率を逆算し、ザクッと評価した成功確率に不確実性のレンジを与えたものを比較して経済性を見積もることを提案している。例えば、平均ドライホールコストが 100 MM ドル、成功時の平均価値が 250 MM ドル、成功確率が 40% と見積もられた場合、ブレイクイーブンの成功確率は 29%、RoR = 25% で 36%、これと成功確率の不確実性を考慮した確率、32~48% を比較して経済性を評価するアイデアであり、興味深い。

2.2 認知バイアスの存在

2002 年に心理学者 Daniel Kahneman がノーベル賞を受賞したことにより、行動経済学が大きく注目されるようになった。Kahneman は以前から不確実性がある状況での人間の判断について研究を行っており（例えば、Tversky and Kahneman, 1974）、ノーベル賞受賞後に発刊された『Thinking, Fast and Slow』がベストセラーとなった（Kahneman, 2011）。情報が限られて不確実性のある状況下で人間は迅速な判断をする傾向があり、その際に「直感」による判断によって系統的なエラー（「認知バイアス：Cognitive bias」）が生じ、さまざまな判断、意思決定に影響を与えることを行動経済学は示している。難しい問題に遭遇した際により簡単な答えに置き換えてしまう（ヒューリスティック：heuristic）、統計的に判断すべきところに因果関係を適用して考えてしまう、少ないデータに認められる一貫性やトレンドを実際以上に強調して一般化してしまう、といった認知バイアスがあり、限られたデータから地下の状況を予想する石油開発においても認知バイアスが評価や判断に影響を与えていることが知られている（Capen, 1976；Baddeley *et al.*, 2004；Welsh *et al.*, 2005）。その代表的なものを見ていきたい。

・アンカリング（Anchoring）

人が数量を見積もる際、事前にある数量を与えられてそれを考えてしまうと、見積もりが事前に与えられた数量に影響されてしまうことをアンカリングと呼ぶ。Welsh *et al.* (2005) が行った実験によると、2003 年の世界の埋蔵量に

ついて 176 人の参加者に質問した際、2 つのグループに分け、一方には最初に埋蔵量は 574 Bbbl より多いか少ないかを聞いた後に埋蔵量を見積もらせ、他方には最初に 1,722 Bbbl より多いか少ないかを質問してから見積もらせたところ、答えが前者では平均 682 Bbbl、後者では平均 1,931 Bbbl となり、事前に参加者に与えられた情報が明らかに予想に影響を与えている。限られたデータに依存する石油開発では、手元にあるわずかなデータに予測が偏りを生じるアンカリングが起こるケースは多々ある。

・利用可能性バイアス・ヒューリスティック（Availability bias/heuristic）

よく覚えていて、すぐに思い出しやすいことは、よく生じると考えてしまうバイアスである。Baddeley *et al.* (2004) は、地質技術者は自分が経験した良かった事例、複雑だった事例の方がごく一般的な事例よりも思い出しやすいため、後の評価に影響を与えることを指摘している。経験や少ない情報が評価の鍵となる石油開発ではそれが本当に対象となるプロスペクトやフィールドにアナログとして適用できるのか、十分な注意が必要になる。これはアンカリングや後述する自信過剰にも関連するバイアスである。

・基準率錯誤（Base rate neglect）

統計データに基づいた一般的な確率・比率があるにもかかわらず、それを無視して限られた情報やデータ経験に基づいた判断に依存してしまうバイアスである。Milkov (2017) は、石油探鉱の成功確率や埋蔵量の予測において、対象エリアにおける過去の統計データがあるにもかかわらず、それを無視して対象とするプロスペクトに関する情報だけに基いて評価を行い、予測精度が低くなっている事例を紹介している。石油会社 Lundin がノルウェー海の探鉱で 2011~15 年に行った 27 プロスペクトの評価では、成功確率は予測の 27% に対して実績は 57%、期待埋蔵量の平均 161 MMBOE に対して実績は 42 MMBOE と予実績に大きな違いがある。これに対してほぼ同時期のこの地域におけるすべての会社の探鉱実績（基準率）を見ると、成功確率は 47%、発見量は 43 MMBOE であり、Lundin の実績に近い。評価においては基準率を参照しつつ、個々のプロスペクトやフィールドの情報を吟味することが必要である。

・連言錯誤（Conjunction fallacy）

複数の事象を組み合わせていくとよりイメージが具体的になり、実際にありそう、起こりそうと思いがちになるバイアスで、実際には条件が加わるにつれてそれが起こる確率は下がっていることを見落としてしまう。“一貫性、もつともらしさ” と “可能性” を容易に混同してしまうことによって生じるバイアスである。地質モデルや油層モデルを作成する際、種々の要素を取り込んで凝ったモデルを作ると一見現実近くてそうになっている可能性が高いと思いがちだが、実際にはそのとおりになる可能性は凝れば凝るほど低くなる（Welsh *et al.*, 2005）。

・自信過剰（Overconfidence）

実際に見えているのは一部でしかないにもかかわらず、

見えている部分、自らが判断できる（と考える）部分に依存して信じてしまうことによるバイアスで、見た目がすべて（“What you see is all there is”）となってしまう（Kahneman, 2011）。石油開発のリスク評価のパイオニアである E. Capen は、不確実性について正しい定量的な考えがないにもかかわらず、ほぼ誰でも不確実性を低く見積もる傾向があり、自分の知識の正確さを過剰評価して決断してしまい、悲惨な結果を招くと語っている（Capen, 1976）。

・後知恵バイアス（Hindsight bias）

物事が起きてからそれが予測可能だったと考えるバイアスを指し、予測が当たった場合にそれが起こる前の実際よりも予測が正しいとより強く考えていたと記憶する傾向がある（Kahneman, 2011）。成功というのは能力と幸運との組み合わせであるが、運でなく能力の結果と判断され、成功者が実際以上に賞賛されることは多々見受けられる。石油開発でも大油田を発見した人物はメディアで広く取り上げられるが、現代において大油田・ガス田が発見される確率は数パーセント程度であり、発見は幸運の要素が非常に大きい。必要なのは成功者を過剰に称えたり、不成功の結果をもたらした人物を批判したりすることではなく、成功、不成功にかかわらず結果を事前評価と照らし合わせたレビューを徹底的に行い、事前評価の妥当性を見極め、次の評価につなげていくことである。

こうした種々の認知バイアスの克服にはまず、認知バイアスがどのようなものか、どのような時に起こるのかについて十分に知ることが重要である。そのためのリスクトレーニングも行われており、その効果が示されている（Welsh *et al.*, 2005）。Kahneman の著作・論文などに目を通して認知バイアスがどのようなものであるかを理解しておくことも有効であろう。また、ピアレビューなどにより、より多くの人、とくに該当するプロジェクトに関わっていない視点や類似プロジェクトでの経験に基づいた意見を聞

き、議論することによりバイアスに気づいて補正することができる。

2.3 事後評価 Post-well evaluation の重要性

地質リスク評価の個々の手法についてさまざまな是非の議論が行われているが、最終的には実績に合うような予測であることが必ず求められる。坑井掘削前の評価にはじっくりと時間がかけられるのに対して、事後評価は簡単に済まされる傾向があるように見受けられるが、事前評価よりもむしろ坑井掘削後のレビューがきわめて重要であり、先に述べたように、成功、不成功にかかわらず、掘削により得られたデータを解析し、事前評価の妥当性を徹底的に検討することにより、地質リスク評価の質を高めることができる（佐藤ほか, 2004）。

図2 掘削坑井数によって期待される成功確率の変化
事前の確率評価が20%の場合に期待される成功率（P90～P10 ケース）について掘削坑井数への依存の様子を示す。坑井数が少ないと実際の成功率には大きな幅があり（10本では0～40%）、数多く掘削することにより、事前の評価に近い成功率となる（100本掘れば15～25%）。

	プロスペクトA	
	事前評価	見直し後
Source Rock	0.80	0.60
Quantity	○	△
Thermal Maturity	◎	○
Migration	0.50	0.30
Migration Path	△	△'
Efficiency	△	△
Timing	◎	○
(Charge)	(0.40)	(0.18)
Reservoir	0.80	0.70
Storage Capacity	○	△
Properties	◎	○
Closure	0.95	0.80
Existence	◎	
Data Density	◎	
Data Quality	◎	
Seal&Preservation	0.50	0.60
Seal	△	△
Preservation	○	○
Psg	0.15	0.06

図3 地質的成功確率の見直し

事後評価の結果、統計的に地質リスク評価に問題があると見なされた場合、そのように評価されたプロスペクト群について実績に合う評価となるよう事前評価を見直すことが有効である。この事例では事前評価が高かったと判断され、とくに根源岩と移動の評価の見直しを行っている。再評価事例をカタログとして整理し、新たなプロスペクト評価の際に参照することにより、各要素の評価基準を確立していくことができる。

地質リスク評価は不確実性に関する確率論的な評価であることから、予実績比較ではサンプル（坑井）数に基づく統計的な有意性を考慮してレビューする必要がある。たとえば、成功確率20%と評価されたプロスペクトを10個掘って1つも当たらなかったとしても、事前の予測が甘かったという結論を出すことはできない。掘削数によって予想される成功確率の実績（P90～P10のレンジ）を計算した結果を図2に示す。成功率予測20%の10プロスペクトを掘削しても1本も当たらない場合が10%ほどあり、一方で40%を上回る可能性も10%ある。掘削数が増えるにしたがって期待される実績の幅は狭くなるため、予測の妥当性をより突っ込んで検討することが可能になる。

統計的な不確実性を考慮した上で予実績に明らかな差があることが認められた場合はその原因を見だし、事前評価の段階に戻ってポートフォリオとして実績に合うようになるまで再評価を行うことが有効である（図3）。このプロセスにより実績にキャリブレートされたリスク評価事例をカタログとして整理し、新たな成功確率評価を行う際に参照することにより、各要素評価の基準が築かれ、一貫性のある評価の実現につながる事が期待される。

事後評価には統計的な検討が必要であるため、それなりの掘削実績が必要になる。イギリスでは政府が主導して事後評価が行われている。2015年に発行された北海 Moray Firth のレポートでは、2003～2013年に24社によって掘削された98坑井の結果がレビューされている（Oil and Gas Authority, 2015）。このプロジェクトはプロスペクトが掘削された目的を明確にし、成功、不成功の理由をレビューして業界で共有することを目的として行われた。結果として、リスク評価が甘いことが指摘され、全体の36%で主要リスクが把握されていなかったことを問題点として挙げている。こうした事例を参考にしたり、評価しても投資を行わなかったプロジェクトについてもレビューを行うことで事例を増やしたり、リスクワークショップのような場で会社間の課題や経験の共有を図ることが地質リスク評価の精度向上に有効と考えられる。

4. 終わりに

講演者が十数年前にはじめて地質的成功確率の評価を任された際、非常に長い時間かけて評価した結果に全く自信が持てなかったことを鮮明に記憶している。その後、石油公団における地質リスク評価の担当者として関連する100以上の案件の事後評価を行い、民間会社に結果を紹介し、議論する中でようやくリスク評価がどのようなものであるのかが見えてきた。それは国内における地質リスク評価の黎明期の話で、現在では評価手法について各社がマニュアルを作成し、初めての技術者でもそれを参考にして効率的に評価ができるようになってきているが、地質リスク評価の意義を十分に理解し、予測性度の高い評価を行うにはどうしても事後評価を含めた経験が必要であり、ここに挙げた課題についてぜひ議論していただければと思う。

本講演が行われる直前にスウェーデンで「失敗博物館

(Museum of Failure)」がオープンしたことがメディアで取り上げられていた。さまざまな奇抜なアイデアで商品化されたが日の目を見ることがなく消えていった製品などが多数展示されている模様である。この博物館は開館から3か月ほどで閉館になることがホームページで伝えられており、失敗博物館が失敗に終わるのは皮肉である（2018年に再開との情報もあるが）。しかし、失敗学という分野があるように失敗から非常に多くのことを学ぶことができ、この博物館が目指したところは十分に理解できる。石油探鉱は地質的成功確率が20～30%、油田やガス田が発見される確率となるとわずかに数%という非常にリスクの高いビジネスであり、探鉱のほとんどが失敗に終わる。成功不成功の一つ一つに一喜一憂することなく、結果にかかわらず技術的なレビューを徹底的かつ的確に行い、地質リスク評価の理解と精度を高めて、粘り強くかつ効率的に探鉱を進めていくことが重要である。

SI 単位換算係数

$$\text{bbl} \times 1.589874 \quad \text{E} - 01 = \text{m}^3$$

参 考 文 献

- Baddeley, M. C., Curtis, A. and Wood, R., 2004 : An introduction to prior information derived from probabilistic judgments: elicitation of knowledge, cognitive bias and herding. *in Geological Prior Information: Informing Science and Engineering*, Geological Society, London, Special Publications, 239, 15–27.
- Capen, E. C., 1976 : The difficulty of assessing uncertainty. *Journal of Petroleum Technology*, 843–850.
- Kahneman, D., 2011: Thinking, Fast and Slow. Farrar, Straus and Giroux, New York, 499 p.
- Megill, R. E., 1984, 1977 : *An Introduction to Exploration Risk Analysis, 2nd and 1st Edition*, PennWell Publishing, Tulsa, 273 p.
- Milkov, A. V., 2017 : Integrate instead of ignoring: Base rate neglect as a common fallacy of petroleum explores. *AAPG Bulletin*, 101 (12), 1905–1916.
- 中西健史, 2000 : 石油公団探鉱投資プロジェクトにおける石油地質リスクの定量評価およびそれを反映させた経済性評価. 石技誌, 65 (3), 217–228.
- Oil and Gas Authority, 2015 : *Moray Firth – Central North Sea Post Well analysis*. Oil and Gas Authority, Aberdeen, Aberdeen, 209 p.
- Peel, F. J., 2016 : Prospect risk, pot odds, and efficient drill or no-drill decision making: What the exploration business can learn from high-stakes poker. *AAPG Bulletin*, 100 (4), 525–535.
- Rose, P. R., 2001 : *Risk Analysis and Management of Petroleum Exploration Ventures*. AAPG Methods in Exploration Series, No.12, The American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, 64 p.

- 佐藤大地・藤井康友・高山邦明, 2004: ポストオーディット導入によるプロジェクト評価精度向上. 石技誌, **69** (6), 661-667.
- 佐藤隆一・高山 将, 1997: 石油探鉱における地質リスク評価の手法について. 石油の開発と備蓄, 石油公団, **30** (3), 68-97.
- Steinmetz, R. ed., 1992 : *The Business of Petroleum Exploration*, AAPG Treatise of Petroleum Geology, Handbook of Petroleum Geology, The American Association of Petroleum Geologists, Tulsa.
- 高山邦明, 2002: 石油探鉱におけるリスク評価. ICEP ニュース, **39**, 15-19.
- 高山邦明, 2008: 石油資源探査における地質リスク評価. 地質と調査, 全国地質調査業協会連合会編, 2008 年第 2 号, 22-25.
- Tversky, A. and Kahneman, D., 1974 : Judgement under uncertainty: Heuristics and biases. *Science*, New Series, **185** (4157), 1124-1131.
- Welsh, M. B, Bratvold, R. B. and Begg, S. H., 2005 : Cognitive biases in the petroleum industry: impact and remediation. *SPE96423*, Annual Technical Conference and Exhibition 2005, Dallas, Society of Petroleum Engineers, 1-10.