論 説
 Original Article

アナログデータを用いた石油の移動・集積リスク評価*

守 屋 俊 治^{**†}

(Received September 4, 2017 ; accepted January 12, 2018)

Improving petroleum migration risk analysis by using play analogues

Shunji Moriya

Abstract : The greatest challenge in petroleum migration risk analysis arises from the fact that specifying migration pathways is extremely difficult by using currently available data such as 3D seismic, due to their insufficient resolution. Utilizing petroleum play analogues as indirect data is, therefore, one of the important approaches to improve the analysis.

An example from UK North Sea pre-Cretaceous plays was shown to demonstrate validity of the approach. Historical exploration well data drilled in the common petroleum system or plays were collected, and the relationship between migration-related parameters and drilling results was statistically analyzed. It revealed that migration style, reservoir age and migration distance are the parameters most strongly related to successful or failed migration. Those statistical analysis results can be used as reference to determine migration chance factor for the plays, which subsequently helps to determine that for undrilled prospects.

Petroleum migration risk analysis by using play analogues must be combined with other methods such as well/seismic shows analysis and petroleum system modeling. Systematic and integrated approach must lead to better understanding and risking of plays/prospects, and new insight into further exploration potentials.

Keywords : petroleum migration risk analysis, play analogues, migration chance factor

1. 緒 言

石油の移動・集積は、探鉱プロスペクトに対する地質リスク評価において予測することが最も困難な要素の 1 つである。実際、移動・集積が試掘井不成功の原因とされ、しかも、試掘前にリスクとして認識されていなかった例は多い (佐藤ほか, 2004)。

移動・集積リスク評価が困難な理由は、移動・集積が他の石油システム要素 (根源岩, 貯留岩, シール, トラップ) と異なりプロセスであること (石油技術協会, 2013) に加え、キッチンからトラップに至る移動経路全域について必要な情報を必要な精度で得ることが不可能なことにある。すなわち、移動・集積リスクを正しく評価するためには、堆積盆全体の埋没史と熱史を復元してキッチンにおける生

成・排出とトラップ形成のタイミングを決定し、そのときの構造形態、キャリアベッドや断層の分布と性状を詳細に把握した上で移動経路を特定し、移動の可否を論じる必要がある。しかし、多くの探鉱案件では、キッチンからトラップまでをカバーする十分なデータが得られていることは稀なため、質・量とも不十分な情報をもとに移動・集積リスク評価を行うことを強いられる。

小論では、移動・集積リスク評価の現状と課題を考察した後、改善に向けた取り組みのうち、アナログデータを用いた評価の重要性について論じる。

2. 移動・集積リスク評価の現状と課題

2.1 移動・集積リスク評価項目

通常、探鉱プロスペクトに対する移動・集積リスク評価は、キッチンにおける生成・移動とトラップ形成のタイミング、キッチンからトラップへの移動経路という 2 つの項目について行われる (Otis and Schneidermann, 1997 ; 佐藤ほか, 2004)。小論では、移動・集積に密接に関わる要素としてこれらに「生成・排出量」を加え、また移動経路を「位置関係」と「キャリア」に二分して、以下の 4 項目につい

* 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.

** 石油資源開発(株) Japan Petroleum Exploration Co., Ltd.

† Corresponding author : E-Mail : shunji.moriya@japex.co.jp

て評価の現状と課題を考察する。なお、ここではキャリアをキャリアベッドや断層など、石油の移動経路となる媒体を指すこととする。

- (1) キッチン・フェッチエリアでの石油の生成・排出量 (generation/expulsion)
- (2) 生成・移動とトラップ形成のタイミング (Timing relative to trap formation)
- (3) キッチン・フェッチエリアとトラップの位置関係 (Position of trap with respect to kitchen/fetch area)
- (4) キャリアの有無 (Connection of carriers to reservoir)

2.2 移動・集積リスク評価の現状と課題

従来から用いられてきた移動・集積リスク評価手法は、一次元地化学モデリング (生成・排出シミュレーション) などで推定した生成・排出のタイミングにおける復元構造図や復元断面図を作成し、それを元に想定キッチンからトラップへの移動経路を推定する、というものである。このとき、側方移動経路としてのキャリアベッドや垂直移動経路としての断層の分布や性状は、必ずしも定量的に評価されないことが多い。

最近では、三次元石油システムモデリング (生成・移動シミュレーション) を用いた評価がますます多用されるようになってきている。実際、ダイナミックなプロセスである埋没史と熱史を再現する上で、三次元シミュレーションは有効な手法である。とくに、根源岩からの生成・排出、トラップ形成のタイミング、想定キッチンエリアとトラップの三次元的な位置関係を評価するためには最適のツールといえるだろう。しかしながら、キャリアベッドや断層の分布や性状に関しては、堆積盆全体にわたって必要な精度で情報を得ることは依然困難であり、その不確実性が計算結果に与える影響は非常に大きい (守屋ほか, 2007; Childs *et al.* 2009)。

そもそも、石油はキャリアベッドのごく限定された領域を移動すると考えられており (Schowalter, 1979; Dembicki and Anderson, 1989), また、しばしば垂直移動経路とされる断層についても、断層を介した併置関係や断層岩の不均質性などミクロな性状が通路となるかシールとなるかに重大な影響を与えると考えられている (Vrolijk *et al.* 2016)。このようなミクロな地質状況までも把握可能な高分解能のデータ取得技術が開発される可能性は、将来的にも極めて低い。

石油の移動経路となるキャリアベッドや断層などの分布と性状、すなわち前節で示した4項目のうちの「キャリア」を精度よく決定できない状況では、どのような手法を用いるにしても、信頼性の高い評価結果を得ることは容易ではない。移動・集積に関する本質的な課題は、移動経路となるキャリアの可視化が不可能な点にあるといえよう。

3. 移動・集積リスク評価の改善に向けた取り組み

このような課題を抱える中、三次元地震探査データや三次元地質モデルの高精度化、あるいは効率的な不確実性評価など、評価の改善へ向けた取り組みが継続されている。

とくに注目すべきは、キッチンエリアを含めた広域三次元地震探査データ取得の普及により、移動経路上に残される小規模な集積を示唆するアノマリーや、トラップからのリークを示唆するガスチムニーなどが、理想的な条件下では検知されるようになってきていることである (例えば Løseth *et al.* 2009)。すでに述べたように、個々の移動経路自体を可視化することは不可能であるが、小規模なトラップに集積した石油や移動経路が密集している領域など、より規模の大きい現象を捉えることは可能になってきている。それらを丹念に抽出することで、移動経路を部分的に特定ないし推定することが可能になると考える。

一方で、そのような直接的データによる評価とは別に、間接的データ (アナログデータ) に基づく評価精度向上を目指すことも重要であろう。アナログデータに基づく評価とは、対象とするプロスペクトと同一のプレイの既存試掘井について移動・集積に関連するパラメータと掘削結果に関する情報を収集・分析してデータベース化し、その統計データをプロスペクトの移動・集積リスク評価に利用しようというものである (Sluijk and Nederlof, 1984)。このようなアナログデータに基づく評価を、直接的データによる評価やシミュレーションなど他の手法と併用することにより、移動・集積リスク評価の精度向上が期待できる。

本章では、アナログデータに基づく移動・集積リスク評価の例として英領北海におけるアナログデータ分析例を紹介し、その有用性を示したい。

4. アナログデータを用いた移動・集積リスク評価 —英領北海の例

4.1 アナログデータ分析の目的

アナログデータ分析の第1の目的は、2.1節で挙げた4つの移動・集積リスク評価項目のうち、とくに「キャリアの有無」の評価に資することである。地震探査データなどによる可視化が困難なこの項目の評価において、アナログデータが果たす役割は大きい。一方、他の3項目は、埋没史・熱史の復元と地化学モデリングあるいは石油システムモデリングを適切に行うことで、結果に対する不確実性は残るものの、評価は可能である。

第2の目的は、アナログデータ分析を通じた石油システム・プレイの理解である。統一的な基準でシステムティックに整備したアナログデータベースを用いることで、評価者個人の知識や経験に基づく属人的な評価を排し、より客観的な評価を行うことも、このような分析の重要な目的である。

4.2 収集データ

主として公表文献・公表データ (Erratt *et al.* 2005; Mathieu, 2015 など) を用いて、1967~2013年にかけて英領北海でジュラ系あるいはそれより下位の貯留岩をターゲットに掘削された試掘井274坑のデータを収集した (図1)。これらは、地理的には Viking Graben から Central Graben および Moray Firth に分布しており、約70%が根源岩である Kimmeridge 頁岩層とほぼ同層準である上部

図1 英領北海アナログデータ分析地域と収集した坑井データ

図2 分析地域のプレイ概念図

ジュラ系のシンリフトプレイ、約30%がそれより下位層をターゲットとしたプレリフトプレイに対する試掘井である。トラップタイプとしては、67%が構造トラップ、14%が層位トラップ、残りが組み合わせトラップとなっている。図2に対象地域のプレイ概念図を示す。

収集にあたっては、データが成功事例に偏ることを避けるため、なるべく多くの不成功井のデータを集めることを心掛けた。ただ、結果的には成功井の割合が46%と、当該期間の実際の成功率（約33%；UK Oil and Gas Authorityのデータを元に算出した成功率）と比較して成功井に偏ったデータセットとなっている。

収集データは坑井諸元、プレイタイプ、掘削結果、不成功原因のほか、生成・排出量、移動様式、垂直・側方移動距離、断層を含めたキャリア・バリアの種類や性状、地層圧力など、移動・集積に関わる各種パラメータである（表

1）。これらは掘削前に推定可能で、統計的に扱うことで移動・集積リスク推定に有効と判断したものである。

不成功原因は、原則として出典資料の評価を踏襲し、トラップ、貯留岩、シール、チャージ（根源岩+移動・集積）の4つに分類した（図3(a)）。しかし、出典資料の評価が不適当と考えた一部坑井については著者の解釈により修正した。すなわち、高压高温（HPHT）プレイでは不成功原因をシールとしているものが多いが、その中には油・ガス徴がない、地層圧力が水圧破碎圧力を大きく下回っているなど、必ずしもシールが原因とは断定できないものがある。このような坑井については「シールないしチャージ」あるいは「チャージ」に変更した。なお、収集した274坑井のうち12坑（収集データの4%）は不成功原因についての情報が得られなかったため、不明とした。

ところで、坑井掘削によって明らかになるのは、厳密に

表 1 英領北海アナログデータ分析に用いた収集データの事例

General Info.			
	#	40	46
	Well	16/7b-20	16/8-1
	Field/discover/prospect	Miller	King fisher
	Country	UK	UK
	Block	16/7b	16/8
	Well category	Exploration	Exploration
	Well status	P&A Oil	P&A Oil&Gas
	Operator	BP	Shell
	Spud date	1-Nov-82	9-Feb-72
	Basin	South Viking Graben	South Viking Graben
	Petroleum system name	Kimmeridge	Kimmeridgd
	Petroleum system type	Rift	Rift
	Play	Upper Jurassic combination	M-L Jurassic structural
	Play type	Syn-rift combination	Pre-rift structural
	Fluid tyoe	Oil	Dry
	Reason of failure	Success	Reservoir
Trap			
	Trap category	Combination	Structural
	Trap type	3-way+stratigraphic	Faulted 3-way
	Timing of trap formation	Early Cretaceous	Late Jurassic
Reservoir			
	Reservoir unit	Brae	Heather Fm
	Reservoir age	Upper Jurassic	Mid Jurassic
	Reservoir type	Turbidite Sst	Turbidite Sst
Source			
	Source rock unit	Kimmeridge	Kimmeridge
	Source rock age	Upper Jurassic	Upper Jurassic
	Source type	Marine shale	Marine shale
Seal			
	Seal unit	Kimmeridge	Heather & faults
	Seal age	Upper Jurassic	Mid Jurassic
	Sesl type	Marine shale	Marine shale and faults
	Abnormal pressure [EMW]	1.28	
	Trap-seal type	Capillary limited	
Migration			
	Timing of expulsion/migration	Paleogene onwards	Paleogene onwards
	HC generated[10 ⁶ kg]	445,500	445,500
	Migration style	In matured source rocks	Stratigraphic downward
	Lateral migration distance[km]	~ 0.5 km	~ 0.5 km
	Lateral carrier	Upper Jurassic Sst	Mid Jurassic Sst
	Lateral carrier type	Turbidite Sst	Turbidite Sst
	Lateral barrier	-	?
	Lateral barrier type		
	Vertical migration distance[km]	0 km	~ 0.5 km
	Vertical carrier	-	Fault
	Vertical carrier type		
	Vertical barrier	-	?
	Vertical barfier type		
	DHI	None	None
Migration factor assessment			
	Generation/expulsion	○	○
	Timing relative to trap formation	○	○
	Position of trap with respect to kitchen	○	○
	Connection of pathways to reservoir	○	?
	Remark		Heather shaled out
	References	McClure and Brown (1992) Rooksby (1991)	Spence and Kreutz (2003)

(a) Reason of failure

b) Migration factors assessment

図3 (a) 分析坑井の不成功原因。(b) 移動・集積各要素の成否

は貯留岩の有無のみであり、その他の不成功原因や各種パラメータは、あくまでも著者を含めた評価者の解釈である。したがって、以下に述べる分析結果には、解釈の任意性に起因する不確実性があることには留意する必要がある。

4.3 不成功原因分析

不成功井 147 坑（収集データの 54%）のうち、チャージが原因と推定されたものは 48 坑（同 18%）であり、その可能性があるものを含めると 71 坑（26%）となる（図 3(a)）。これは推定された不成功原因として最多である。

チャージの成否原因をさらに分析するため、成功井も含めた全 247 坑について 2.1 節に示した「生成・排出量」「タイミング」「位置関係」「キャリアの有無」の 4 項目の成否を集計した（図 3(b)）。その結果、生成・排出量とタイミングに関しては、問題ありと判断された坑井はなかった。これは、北海では上部ジュラ系 Kimmeridge 頁岩層が良好な根源岩として広く分布していること、坑井周辺の沈降部では白亜紀から現在にかけて熟成に達すること（Kubala *et al.* 2003）、それに対してトラップ形成時期は白亜系基底不整合以前であることによる。

一方で、チャージに問題があった可能性がある 71 坑のうち、58 坑においてキッチンからトラップまでの間のキャリアの欠如が疑われた。これは、キッチンとトラップの位置関係が移動に適している、すなわちトラップが有効なキッチンのフェッチエリア内にあるにもかかわらず、移動の痕跡がないことから、消去法として推定されたものである。おそらく、キャリアベッドの堆積学的な、あるいは断層による連続性の欠如、断層の垂直移動経路としての機能の欠如などのケースがあると考えられる。

このように、優秀な熟成根源岩が分布し、一般には移動・

集積を含めたチャージのリスクが小さいと考えられている北海においても、キャリア分布に対するリスクは少なからず存在する。

4.4 移動・集積評価

収集した移動・集積に関わるパラメータと移動の成否の関係を考察した。その結果、いくつかのパラメータは移動の成否と関連することが明らかになった（図 4）。ここでは、そのうち 3 つについて考察する。

(a) 移動様式

図 4(a) はプレリフトプレイとシンリフトプレイに分けて移動の成否を比較した図である。構造、層位といったトラップ形態にかかわらず、プレリフトプレイでは移動の成否率が約 60% であるのに対して、シンリフトプレイでは成否率が 80% となっており、有意な差が認められた。前者が層準的下方移動（Stratigraphic downward migration）が必要なのに対して、後者は側方移動のみで集積可能であることが成否率の異なった原因と考えられる。

(b) 貯留岩層準

図 4(b) は貯留岩層準ごとの移動の成否を比較した図である。上部ジュラ系はシンリフトプレイ、その他の中下部ジュラ系、三畳系、ペルム系、デボン系はプレリフトプレイであるが、注目すべきは三畳系の成否率が上部ジュラ系と同様に高いことである。これは三畳系が砂岩優勢な岩相が卓越しているため、断層を介した層準的下方移動に有利なことが原因と考えられる。

(c) 側方移動距離

移動距離と移動の成否にも明瞭な関連が見て取れる。とくに、側方移動距離が 20 km を超えると移動の可能性が著しく低下していることが分かる。これは、側方移動距離

図4 英領北海アナログデータ分析結果
移動様式(a), 貯留岩層準(b), 側方移動距離(c) と移動の成否

が長くなるにしたがって、キャリアがキッチンからトラップまで連続する可能性が低下することを示唆している。

4.5 アナログデータを用いた移動・集積リスク評価

前節の検討では、移動様式、貯留岩層準、移動距離と移動の成否の相関が高いことが明らかになった。このようなアナログデータは未試掘のプロスペクトの移動・集積リスクを評価する際の指標となると考えられる。すなわち、対象とするプロスペクトと同一プレイに属する既存試掘井について移動・集積に関連するパラメータと掘削結果に関する情報を収集・分析してデータベース化し、その統計デー

タを用いてまずプレイの移動・集積リスク評価値（チャンスファクター）を決定する。その上で、プロスペクト固有の要素を加味して最終的な移動・集積チャンスファクターを決定することができる（White, 1993）。

アナログデータの移動・集積成否率の値をそのままプレイのチャンスファクターとして用いるのが理想であるが、その可否は慎重に検討する必要がある。まず、使用データベースが偏りのないものである必要がある。英領北海の例では、掘削された全試掘井に対する試掘成功率やプレイタイプの比率は、分析坑井のそれらとは異なっている。また、ここでは1967年から2013年までのデータを一括して扱ったが、例えば1960年代と現在では利用可能なデータやプレイに対する理解、あるいは残存ポテンシャルが異なると考えられ、それを反映して成否率も変化している可能性がある。しかし、今回の分析例のようにデータの偏りが無視できない場合でも、直接スコアに反映するのではなく、相対的な評価として利用することは十分可能である。

5. 結 論

移動・集積リスク評価の本質的な課題は、移動経路となるキャリアの可視化が不可能な点にある。このような課題を抱える中、三次元地震探査など直接的データによる評価や石油システムモデリングなど、評価の改善へ向けた取り組みが継続されている。小論では、改善に向けた取り組みのうち、間接的データ（アナログデータ）を用いた評価の重要性について論じた。

アナログデータに基づく評価とは、対象とするプロスペクトと同一プレイの既存試掘井について移動・集積に関連するパラメータと掘削結果に関する情報を収集・分析してデータベース化し、その統計データをプロスペクトの移動・集積リスク評価、とくにキャリアの有無の評価に利用しようというものである。英領北海での検討では、移動様式、貯留岩層準、移動距離と移動・集積の成否の相関が高いことが明らかになった。これらの統計データは、プレイのチャンスファクターを決定する際の指標として用いることが可能である。その上で、プロスペクト固有の要素を加味してプロスペクトの最終的な移動・集積チャンスファクターを決定することができる。

このようなアナログデータに基づく評価は、単独で満足できる結果をもたらすものではなく、直接的データによる評価や石油システムモデリングなど、すべてを組み合わせることで総合的に評価することが重要である。システムティックなワークフローを作成し、それにしたがって必要な評価項目を網羅することで、より適切なリスク評価が可能となると考える。そして、これらの作業を通じて石油システムやプレイについての理解が促進され、新たなプロスペクトの創出につながっていくものと期待する。

謝 辞

石油資源開発株式会社には公表許可をいただいた。小論は、2011～2015年にかけて石油資源開発株式会社内で実

施された技術開発課題「石油の移動・集積評価技術の高度化」の成果の一部をまとめたものである。プロジェクトメンバーをはじめ、社内の諸氏からは多くの議論・助言をいただいた。また、石油技術協会シンポジウム世話人の方々には講演の機会を与えていただくとともに、執筆に際してご協力を賜った。査読者には有益なご意見をいただいた。以上の方々に心より感謝いたします。

引用文献

- Childs, C., Sylta, Ø., Moriya, S., Morewood, N., Manzocchi, T., Walsh, J. J. and Hermansen, D., 2009 : Calibrating fault seal using a hydrocarbon migration model of the Oseberg Syd area, Viking Graben. *Marine and Petroleum Geology*, **26** (6), 764–774.
- Dembicki, H. Jr. and Anderson, M. J., 1989 : Secondary migration of oil: experiments supporting efficient movement of separate, buoyant oil phase along limited conduits. *AAPG Bulletin*, **73** (8), 1018–1021.
- Erratt, D., Nicholson, P. H., Winefield, P., Milton-Worsell, R. J., Cayley, G. T. and Arter, G., 2005 : Exploration history of the high-pressure, high-temperature plays: UK Central North Sea. In Dore, A. G. and Vining, B. A. eds. : *Petroleum Geology North-West Europe and Global Perspectives - Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference*, 253–267, The Geological Society, London.
- Fraser, S. I., Robinson, A. M., Johnson, H. D., Underhill, J. R., Kadolsky, D. G. A., Connell, R., Johannessen, P. and Ravnas, R., 2003 : Upper Jurassic. In Evans, D., Graham, C., Armour, A. and Bathurst, P., eds. : *The Millennium Atlas: Petroleum Geology of the Central and Northern North Sea*, 157–189, The Geological Society, London.
- Kubala, M., Bastow, M., Thompson, S., Scotchman, I. and Oygard, K., 2003 : Geothermal regime, petroleum generation and migration. In Evans, D., Graham, C., Armour, A. and Bathurst, P., eds. : *The Millennium Atlas: Petroleum Geology of the Central and Northern North Sea*, 289–315, The Geological Society, London.
- Løseth, H., Gading, M. and Wensaas, L., 2009 : Hydrocarbon leakage interpreted on seismic data. *Marine and Petroleum Geology*, **26** (7), 1304–1319.
- Mathieu, C., 2015 : *Moray Firth - Central North Sea post well analysis*. UK Oil & Gas Authority, Aberdeen.
- McClure, N. M. and Brown, A. A., 1992 : Miller Field: a subtle Upper Jurassic submarine fan trap in the South Viking Graben, United Kingdom sector, North Sea. In Halbouty, M. T. ed. : *Giant Oil and Gas Fields of the Decade 1978-1988*, AAPG Memoir, **54**, 307–322, The American Association of Petroleum Geologists.
- 守屋俊治・山根照真・斎藤雄一・加藤 進・中山一夫, 2007 : 岩船沖油・ガス田のタービダイト砂岩への炭化水素移動・集積モデル, 石技誌, **72** (1), 89–97.
- Otis, R. M. and Schneidermann, N., 1997 : A process for evaluating exploration prospects. *AAPG Bulletin*, **81** (7), 1087–1109.
- Rooksby, S. K., 1991 : The Miller Field, Blocks 16/7B, 16/8B, UK North Sea. In Abbotts, I. L. ed. : *United Kingdom Oil and Gas Fields, 25 Years Commemorative Volume*, Geological Society Memoir, **14**, 159–164, The Geological Society London.
- 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.
- 石油技術協会, 2013 : 石油鉱業便覧, 333–340, 石油技術協会.
- Schowalter, T. T., 1979 : Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment. *AAPG Bulletin*, **63** (5), 723–60.
- Sluijk, D. and Nederlof, M. H., 1984 : Worldwide geological experience as a systematic basis for prospect appraisal. In Demaison, G. and Murris, R. J. eds. : *Petroleum Geochemistry and Basin Evaluation*. AAPG Memoir **35**, 15–26, The American Association of Petroleum Geologists.
- Spence, S. and Kreutz, H., 2003 : The Kingfisher Field, Block 16/8a, UK North Sea. In Gluyas, J. G. and Hitchens, H. M. eds. : *United Kingdom Oil and Gas Fields, Commemorative Millennium Volume*. Geological Society Memoir, **20**, 305–314, The Geological Society London.
- Vrolijk, P. J., Urai, J. L. and Kettermann, M., 2016 : Clay smear: review of mechanisms and applications. *Journal of Structural Geology*, **86**, 95–152.
- White, D. A., 1993 : Geologic risking guide for prospects and plays. *AAPG Bulletin*, **77** (12), 2048–2064.