

講 演  
 Lecture

## 坑井健全性におけるジオメカニクスの検討\*

古 井 健 二<sup>\*\*、†</sup>

(Received July 24, 2019 ; accepted August 28, 2019)

### Geomechanics aspects of well integrity

Kenji Furui

**Abstract :** Well integrity is one of the most important considerations in wells engineering and requires technical measures to reduce the risk of uncontrolled release and leakage of formation fluids during drilling, well completions, production, and abandonment stages. Many casing damage incidents and well integrity issues caused by subsidence and reservoir compaction have been reported in HPHT oil and gas fields in the North Sea and the Gulf of Mexico. This study presents lessons learned from casing failure events reported overseas and also discusses how to deal with these well integrity issues from geomechanics aspects.

**Keywords :** well integrity, casing failure, geomechanics, HPHT fields, reservoir compaction

### 1. はじめに

坑井健全性は、作井技術で最も重要な検討項目の1つであり、掘削、仕上げ、生産、そして廃坑までのライフサイクルを通して、地層流体の放出・漏洩リスクを減らすための技術的対策が必要となる。北海やメキシコ湾における高圧貯留層の開発では、地盤の不安定化によりケーシングに破損が生じ、坑井健全性が損なわれる事例が数多く報告されている。本稿では、海外のケーシング破損の事例から導き出された教訓を紹介し、ジオメカニクスの観点からケーシング破損の対処方法などを紹介する。

### 2. 坑井健全性とジオメカニクス

ノルウェー領北海油田の坑井設計で広く用いられている坑井健全性ガイドライン NORSOK D-010 によれば、坑井健全性とは、「坑井のライフサイクルにおいて、地層流体の制御不能な流出リスク削減を目的とした、技術的、操業的、組織的な解決法を適用すること」と定義されている (NORSOK Standard D-010 rev.4, 2013)。坑井の健全性を確保するには、地下流体や圧力を遮蔽するための適切なバリアの設置が重要となる。作井作業において、セメント、ケー

シング、シュートラック、ブリッジプラグ、パッカー、安全弁、泥水などさまざまなものがバリア要素として用いられている。これらは坑井ライフサイクルで想定される圧力、温度、荷重履歴などについてテストを行い、初めてバリアとして使用できる。一般的にはバリア要素の予期せぬ破損なども考慮し、独立したバリアを二重で設置することが推奨されており、一部地域では二重バリアが義務付けられているところもある。

坑井のライフサイクルに渡り健全性を維持するためには、坑井設計の段階から、さまざまな要因を考慮し仕様を決定する必要がある。長期間の油・ガスの生産では、鋼管の腐食・浸食や、坑内機器の故障、セメントの劣化などによる地層流体の地表流出リスクなどがあり、坑井改修によるウェルバリアの補修が必要となる場合もある。一方で、圧密貯留層からの油・ガスの生産では、貯留層や周辺地盤の応力・ひずみ状態が大きく変化し、坑井を取り巻く地下環境が当初の想定から大きく変化し、想定外の応力がケーシングに負荷されるケースもある。このような場合は、生産に伴う地盤の変形といったジオメカニクスの要因を考慮してケーシングや仕上げの設計を行うことが求められる。

### 3. ジオメカニクスに関連したケーシング破壊

圧密貯留層に関連した最も重大な問題はケーシングの破損である。多くのケーシング破損の事例が、Ekofisk field や Valhall field などの北海油田や Belridge field や Wilmington field などの米国カリフォルニア州の油田など

\* 令和元年 6 月 12 日、令和元年度石油技術協会春季講演会作井部門シンポジウム「坑井健全性の確保に対する取り組み」で講演 This paper was presented at the 2019 JAPT Drilling Symposium entitled "Approaches to establish the Well Integrity" held in Tokyo, Japan, June 12, 2019.

\*\* 早稲田大学創造理工学部 School of Creative Science and Engineering, Waseda University

で報告されている。ケーシングの変形が生じた場合、変形が十分小さく生産障害とならない場合もあるが、鋼管が大きく湾曲し dogleg やき裂が発生した場合は、サイドトラックや廃坑作業が必要となることがあり被害は甚大となるケースもある。

地層変位によるケーシング破損のメカニズムには、圧縮破壊、せん断破壊、引張破壊などさまざまであり、その原因を特定するには、貯留層内および周辺地層の応力とひずみ状態の把握が必要となる。特に、せん断変位を生じる恐れのある断層や地層境界面近傍の応力・ひずみ変化をジオメカニクスシミュレータにより解析し、これらの解析結果から、ケーシング破損のリスクを減らすような坑井位置や坑井の傾斜角を決定することが重要となる。

#### 4. Elgin ガス田 G4 坑井でのガス流出事故の例

2012年3月にElgin ガス・コンデンセート田 G4 坑井でガス流出事故が発生し、プラットフォームおよび掘削リグから全作業員が避難し、ガス流出の2か月後に高比重泥水によるキルウェルが行われた (Henderson and Hainsworth, 2004)。

Elgin ガス・コンデンセート田は1997年に開発が始まったイギリス領北海油田で、海底下深度 5,000m ~ 5,600m の高圧高温貯留層 (16,000 psi, 200 deg. C) である。ジュラ紀の Fulmar 砂岩層が主な生産層で overburden 層にはガスを含む低浸透率の Chalk 層が存在している。G4 坑井では 7" 径プロダクションライナーの破損が確認されたため、2011年1月に貯留層上部に Deep-Set プラグが設置されていた。また、G4 坑井は生産中に A アニュラスの圧力異常上昇を生じていたため、9-7/8" 径ケーシングの破損に伴う Chalk 層からのガスの坑井への流入が疑われていた。A アニュラスを構成する 5" 径プロダクションチュービングと 10-3/4" × 9-7/8" 径ケーシングは共にガス圧には耐えられる設計であったが、予期しない 10-3/4" ケーシング破損が生じたことで、今回のガス流出事故へとつながった。

Elgin ガス・コンデンセート田では、開発当初は見られなかった Chalk 層でのガスの兆候が、近年の掘削結果から頻繁に報告されるようになっていた。このガスの兆候が、Chalk 層に含まれるき裂の浸透率上昇によるものか、Chalk 層の孔隙圧の上昇によるものかは不明だが、Fulmar 層での生産に伴う Chalk 層の応力減退が主な原因であると考えられている。また、Elgin ガス・コンデンセート田では、G4 坑井でのガス流出事故の後、「A アニュラスの圧力異常を検知した場合、出来るだけ迅速に対象坑井の生産を中止し、安全性を確保する」ことを決定するなど、坑井健全性に関して操業方針が大きく改定されている。

#### 5. ジオメカニクスシミュレータを用いたケーシング破損への対処方法の検討

Elgin のガス流出事故の主要因の1つが、Overburden 区間におけるケーシングの破損である。同様のケーシング破損事例は、メキシコ湾をはじめとする世界各地の大水深油・

ガス田で、A アニュラスの圧力異常として報告されている。メキシコ湾では、貯留層から 1,000 ~ 1,600 ft-TVD 以浅の間隔でもケーシング破損が報告されており、キャリパー検層の結果から、ケーシング破損が異常高圧層付近で発生したことが報告されている。

Furui *et al.* (2012) は異常高圧砂岩層とケーシング破損の関連性を調べるために、有限要素法を用いたジオメカニクスモデルを用い、生産に伴う貯留層内および周辺地盤の応力解析を実施している。この研究で示されたシミュレーション結果から、Overburden 層に存在する断層や地層境界面で、局所的な引張およびせん断ひずみが発生する可能性が示された。Elgin ガス・コンデンセート田のケースでも、廃坑作業時に得られたキャリパー検層の結果から、9-7/8" 径プロダクションケーシングの破損が Chalk 層に含まれる地層境界面で発生していることが確認されている (Mainguy and Innes, 2019)。

坑井健全性に大きな影響を与える可能生のある Overburden 区間のケーシング破損リスクを減少させるために、掘削・仕上げ中にせん断変位を生じる恐れのある薄いガス層などの存在を確認し、圧力が高い場合はこれらの層を排圧することで、地盤の安定性を向上させることができる。また生産層で大きな圧縮ひずみが予想される場合は、坑井の傾斜角を 70 度以上とすることでケーシングへの軸ひずみを減少させ、座屈破壊のリスクを減少させることができる。このようにジオメカニクス解析を作井計画に取り込むことで、将来のケーシング破損を回避または軽減し、坑井の健全性を向上させることが可能となる。

#### 6. ま と め

本稿では、貯留層圧密度の大きな HPHT フィールドなどで報告されているケーシング破損の事例を紹介し、ジオメカニクスの知見を利用した坑井設計の重要性について述べた。

HPHT フィールドや生産に伴う貯留層圧密度の大きなフィールドでは Overburden 区間でのケーシング破損リスクが高い傾向が報告されている。これらのフィールドでの坑井ライフサイクルにおける坑井健全性の確保においては、ケーシングやセメントといったバリア要素の耐久性の評価においても、地層変位や応力変化といった影響を考慮することが重要となる。

地層の不均質性や断層の影響などを考慮したジオメカニクス解析を実施することで、貯留層流体生産にともなうケーシング破損のリスク評価やケーシング・セメントプログラム、プロダクションパッカー設置深度、坑跡計画といった坑井デザインの最適化が可能となる。生産中は定期的なキャリパー検層や DTS による連続モニタリングを行うことで、ケーシング変形の程度や破損深度を特定し、バリア破損に迅速に対応することで、地層流体漏洩リスクの低減につながる。

## 参 考 文 献

- NORSOK Standard D-010 rev.3, 2004 : Well Integrity in Drilling and Well Operations.
- Henderson, D., and Hainsworth, D. 2014 : Elgin G4 Gas Release: What Happened and the Lessons to Prevent Recurrence. Society of Petroleum Engineers.
- Mainguy, M., and Innes, R., 2019 : Explaining Sustained “A” -Annulus Pressure in Major North Sea High-Pressure/ High-Temperature Fields. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/194001-PA.
- Furui, K., Fuh, G.-F., and Morita, N., 2012 : Casing- and Screen-Failure Analysis in Highly Compacting Sandstone Fields. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/146231-PA.