

北海油田の計測データに基づく水圧破碎モデルの検証

Verification of a Hydraulic Fracturing Simulator against a North Sea Case

山本晃司*・Marte Gutierrez**・島本辰夫***・前角繁之***

Koji YAMAMOTO, Marte GUTIERREZ, Tatsuo SHIMAMOTO, Shigeyuki MAEZUMI

A three-dimensional simulator for the IOR hydraulic fracturing technique has been developed by the authors based on the theoretical coupling of fluid flow and fracture mechanics models. Its applicability to the condition of real field problems should be verified along with theoretical and numerical correctness and choice of the models of physical phenomena. The pressure history data during the injection and post shut-in periods obtained in a North Sea field are used for this objective with the formation model determined by the wireline logging and empirical knowledge. The simulation results raise the questions of adopted fracture propagation criterion. Nevertheless, history matching of results of the bottom hole pressure between the numerical and real data confirm that the models developed by the authors can be used to estimate the fracture geometry and extension.

Key Words: *Hydraulic Fracturing, Numerical Modelling, Improved Oil Recovery, Field Verification*

1. はじめに

世界各地の巨大油田が減退期を迎える中で、き裂延長数十～百メートル以上、圧入流量数百立方メートルに及ぶ大規模水圧破碎 (Massive Hydraulic Fracturing: MHF) は、坑井の周辺の流動性を確保し回収率を高める坑井刺激技術の一つとしてより広く、一般的に用いられつつある。この技術においては、形成されるき裂の広がりや形状が坑井の生産性の向上に重要な役割を果たすため、これらを事前に予測するシミュレーション技術の発展が望まれている。

また、近年は環境への配慮の必要性から、掘削廃棄物、特にオイルベースマッドを用いた場合の掘削ザクの処分方法として、さらに大規模 (固体圧入量数千トン以上、圧入期間数ヶ月以上) な水圧破碎き裂形成が試みられている。この技術は他の液体廃棄物や二酸化炭素の処分方法としても有望であると考えられるが、これらの廃棄物処理の問題では、地表・海洋及び地下水の汚染防止の観点からき裂伸展の制御がより重要となることが予想され、その意味でもき裂伸展シミュレーションの重要性は増すと考えられる。

筆者らは既報 (山本他、1998) において、き裂の折れ曲がりやを考慮できる三次元水圧破碎シミュレータの

* 正会員 富士総合研究所 地下空間伊東クラスター

** Ph.D. Norwegian Geotechnical Institute

*** 石油公団 石油開発技術センター 油層研究室

理論的背景、及び計算コードに用いた数値解析技術について紹介した。本報においては、本シミュレータが採用している理論モデルを検証するために、北海油田の実フィールドでの水圧破砕過程で獲得された圧力履歴データとシミュレーション結果を比較検討した。地層の岩盤物性等に関しては、当該油田のオペレーターである石油会社 (BP Amoco) の協力を得て、物理検層ログと既存の経験的手法及び数値解析を用いて決定した。ここでは、数値解析結果と実データの一致点及び差違について述べ、これらの背景を分析する。さらに、今後の検討項目や開発目標について述べる。

2. 対象フィールド

本研究で取り扱ったのは、北海油田のノルウェー-鉦区最南部に位置する Valhall フィールドである (図 1 及び図 2)。この油田は北海で最初に開発された Ekofisk フィールドの南側に隣接し、周囲の Ekofisk 油田群と構造を共有している。貯留層深度は約 2400m、構造全体の面積は 24,000ha、その内生産可能な面積は 2800ha で、原油の API 比重は 34.3 (0.8g/cm³)、油温は約 195°F (90.5°C)、粘性係数は 0.32cp (0.32mPa·s) (195°F) である。貯留層は白亜紀後期に堆積した非常に低い浸透率を示す細密なチョークで、Ekofisk と共通の Tor 層 (白亜系後期、シャンパーニュ-マーストリヒト階) と Hod 層 (白亜系前期、チューロン階) であるが、Tor 層の方が高い孔隙率、浸透率を持ち、主に生産に寄与している。この貯留層の地質学的特徴は、異常高圧状態であり生産に従って圧密沈下が生じる、飽和率が極めて小さい (平均 5-10%、場合により測定不能)、及び浸透率が低い (10~0.1md (10⁻²~10⁻⁴μm²)) といった点である。この浸透率の低さにもかかわらず高い生産性が維持できるのは天然き裂の発達のためと考えられる。

油田付近の水深は約 70m で、1975 年の発見後、1977 年より試掘が開始され、1982 年にプラットフォームが建設されて生産が開始され現在に至っている。操業会社は Amoco Norway A/S (現 BP Amoco) である。

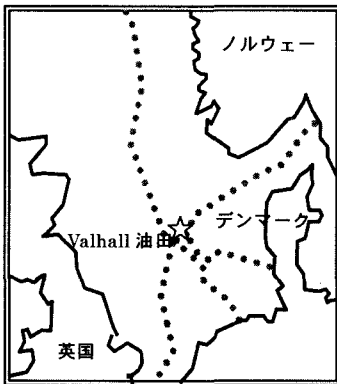


図 1 Valhall フィールドの位置

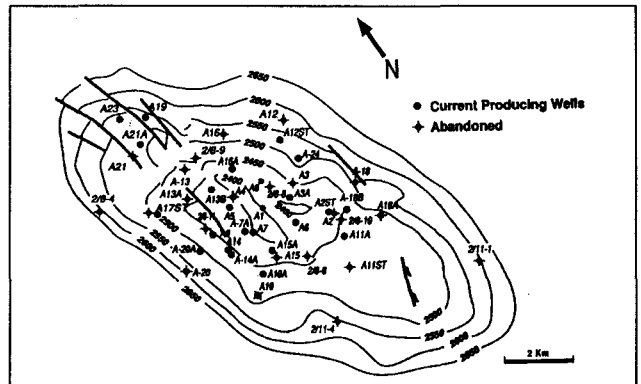


図 2 Valhall 構造図 (坑井と貯留層上部深度分布) (York et al.1992)

3. 坑井と地層のモデル化

水圧破砕過程のシミュレーションでは、坑井のプロファイルの他、地層の原位置応力、岩盤の弾性及び破壊・き裂伸展に関するパラメータ、圧入流体の流動性に関するパラメータを入力データとして与える必要がある。本報告においては、垂直井 (傾斜角 5.5°) の検討結果について述べる。

周辺地層のモデルは、主として検層ログから求めた孔隙率と密度より経験的に定めている。当該坑井は、

垂直深度約 2400m において Tor 層に達している。Tor の層厚は 42m であるが、中央よりやや下に、低孔隙率、高密度の層 (dense zone) が見られる。

岩盤のヤング率、ポアソン比は図中に示すように Tor 層、上部層、及び下部層のそれぞれについて与える。Dense Zone の物性は不明であり、以下に示す例では、Dense Zone の層厚が比較的薄いことなどの理由から、この層を無視して三層モデルとして計算している。き裂伸展の判定は線形破壊力学基準に従い破壊靱性値 K_{IC} とき裂先端の応力拡大係数を比較して、Mastrojannis et al.(1980)の関係式：

$$d = d_{\max} \times \left(\frac{K_I - K_{IC}}{K_{I\max} - K_{IC}} \right)^\alpha \quad (1)$$

に基づいて相対的な伸展量を定めている。ここで K_I はき裂周上各点の応力拡大係数、 $K_{I\max}$ はその最大値である。破壊靱性値は経験的に選ばれた値として、1500psi \cdot in. (1.65MPa \cdot √m) を与えているが、これは NGI (Norwegian Geotechnical Institute) のチョークのデータベースと矛盾しない値となっている。

き裂から地層への流体の流出 (リークオフ) がき裂形成に大きな影響を与える。地層へのリークオフはき裂面からの一次元的な浸透とそれによる間隙水圧上昇のモデルを元に、次式に基づくき裂形成後の経過時間の平方根に反比例するとする関係で、次のように与えられる：

$$q_L = \frac{2c_L}{\sqrt{t-t_0}} \quad (2)$$

ここで t_0 はき裂形成時刻である。また、 c_L はリークオフ係数で、岩盤の浸透性と圧入流体の性質から定まる。リークオフ係数についてはヒストリーマッチングを行う際の変数として扱う。

ミニフラック (小規模水圧破碎) の結果等からフラクチャーのき裂閉合圧力 (CP) の生産層と上部層及び下部層の応力コントラストがそれぞれ +1960psi (13.5MPa) 及び +2060psi (14.2MPa) と計測されており、この閉合圧力の応力コントラストを初期応力のコントラストとして設定する。また、貯留層付近の岩石密度は 1.9g/cm³ 程度であることから、応力勾配を 0.823psi/ft (18.62kPa/m) と設定する。

圧入流体は高粘性のスラリーで、その性質はべき乗則で表現され、 $n'=0.47$, $k'=0.0715\text{psi}/\text{sec}^{0.47}$ (160° F) が与えられている。ここでは図 4 に示すような 120 分間の水圧破碎過程を扱い、その際の圧入レートは最大 40bbl/min (6.36m³/min)、総圧入流量は 1300bbl (207m³) である。

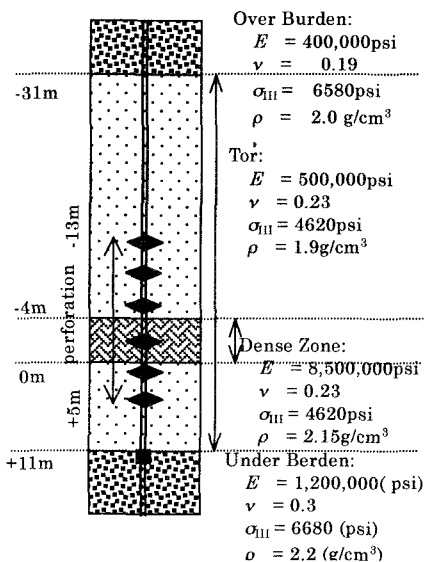


図 3 坑井と地層のモデル化

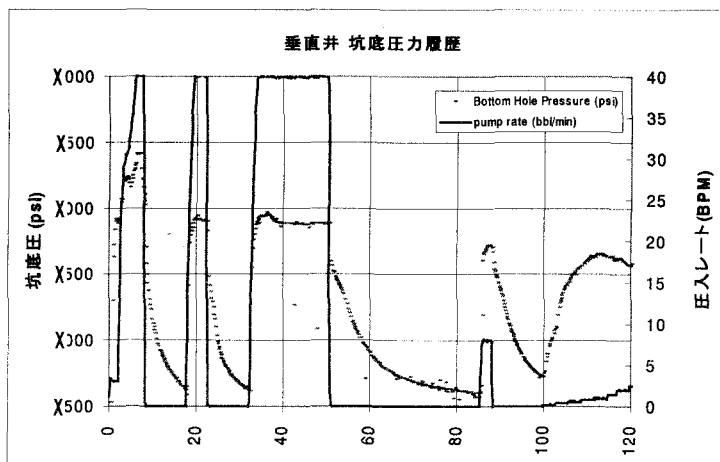


図 4 圧入レートと計測された坑底圧

4. 坑底圧力のヒストリーマッチング

水圧破碎実施段階での坑底での圧力履歴は、地層にき裂が生じて伸展開始するブレイクダウン圧力 (FBP)、き裂成長段階のほぼ一定のき裂伸展圧力 (FPP)、シャットイン直後の急激な圧力低下 (ISIP) とその後のき裂閉合圧力 (CP) に達するまでの圧力低下という過程をたどる。このうちブレイクダウン圧力については、現在の定常流と線形破壊力学モデルで正確に扱うことはできないので、信頼性が低い。また、ISIP は圧力ゲージとき裂内の間のフリクション等に起因するものであり、本モデルでは再現していない。

初期に設定したモデルでは、計算された圧力履歴は流体の性状にもよるが、計測されたものよりも3倍程度小さくなる傾向がある。これは、Dense Zone を考慮していないことも一つの原因と考えられるが、後で述べるようにき裂伸展則の問題である可能性があり検討を要する。圧力は岩盤の弾性定数にほぼ比例して高くなるため、ここではTor層の弾性定数を初期のモデルの3倍に設定している。こうして計算された圧力履歴の形状は計測されたものと良く一致する。

シャットイン後の圧力低下状況を計測と一致させるためにリークオフ係数 C_L を変化させた場合の圧力履歴の変化を図5に示す。この場合、圧力低下を一致させるためにリークオフ係数を高くすると、圧入中は常に新しいき裂表面が形成され続けることから破碎過程が終了する以前にき裂体積が0以下になり計算が発散する。このことは、単純な一次元浸透モデルが長期間のMHFのシミュレーションには適切でないことを示している。

また、き裂の拘束の度合いが圧力履歴に影響を与えることが、Cuesta(1991)などで古典的なKDG、PKN、円形き裂などのモデルに対して示されている。

き裂が貯留層内に拘束される制限をゆるめるために、応力コントラストを無くしてほぼ円形のき裂を形成させた例では、FPPが負の傾きを持つという解析解と一致する結果が得られ(図6及び図7)、実際のき裂も計算結果同様ある程度貯留層内に拘束されていることが予想される。

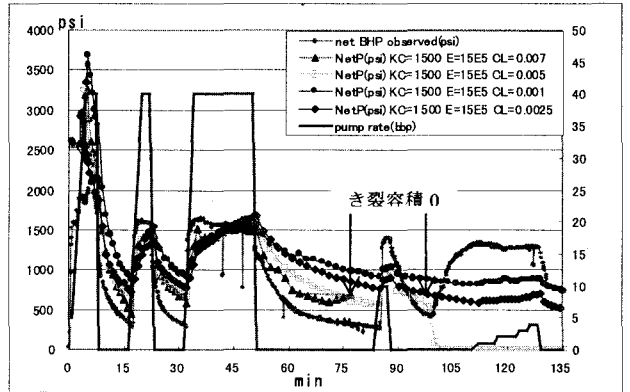


図5 リークオフ係数の違いによる圧力履歴の変化

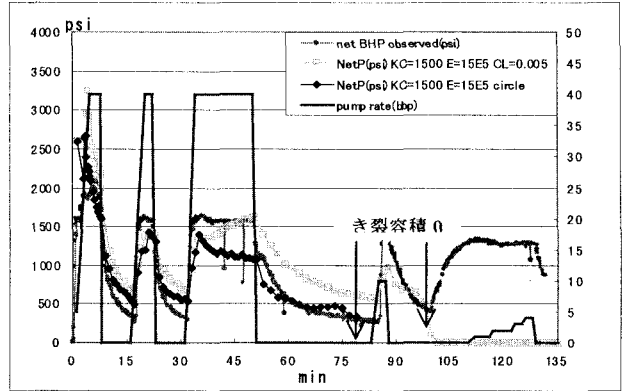


図6 き裂形状の違いによる圧力履歴の変化

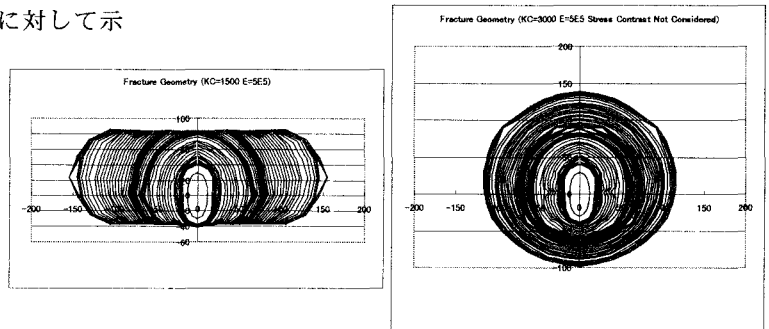


図7 形成されたき裂形状

(左: 応力コントラスト有、右: コントラスト無)

5. モデルの問題点

(1) き裂伸展クライテリアの問題点

き裂の形状、き裂が地層内に拘束されるか、といった点は採用するき裂伸展クライテリアに依存する。線形破壊力学モデルではき裂先端に応力特異点が生じるが内圧は特異点にはなり得ないこと、き裂伸展過程ではき裂の伸展速度がき裂内流体の流動速度よりも高くなり、き裂先端にドライゾーンが生じることなどから、シミュレーションのき裂内圧力は実際よりも低くなることが指摘されており (Desroches et al. 1998)、これらき裂先端付近の流体挙動のより正確なモデル化が必要と考えられる。

(2) リークオフモデルの問題点

地層内への浸透を一次元浸透流と仮定した現在のリークオフモデルではき裂伸展を伴うリークオフ挙動や繰り返し圧入を正確に扱えないため、地層内の三次元的な流れを考慮したモデルを検討する必要がある。この問題は、マルチプルフラクチャーの問題等への適用する場合さらに重要になるであろう。

6. まとめ

本報告ではシミュレータの可能性と、現在適用しているモデルの限界を明らかにすることができた。本シミュレータの特徴である三次元的な広がりを持ったき裂伸展の問題や、プロパント流動の解析については今回の研究では取り扱わなかったため、これらの検証は今後の課題である。

このシミュレータの目的は、き裂の広がりや形状を予測することであり、そのためには実際に形成されたき裂形状と比較することが望ましい。水圧破砕き裂の伸展状況をモニターする手段としては、地表面及びボアホール内の傾斜を計測する方法や、AE 波を観測する手法が提案されている。しかし、石油坑井のような深部掘削では地表に達するまでに地盤の変形や AE の信号が減衰するため、適用は難しい。今後は、これらを含めたき裂のキャラクタライゼーション手法についても検討したい。

The authors express sincere appreciation to BP Amoco and its staffs who assisted with providing the data from the field and giving permission for the publication.

7. 参考文献

- 1) 山本晃司、島本辰夫、市川真、伊東淳：三次元水圧破砕シミュレータの開発、第 29 回岩盤力学に関するシンポジウム、1999
- 2) K. Yamamoto, T. Shimamoto, S. Maezumi, "Development of a True 3D Hydraulic Fracturing Simulator," SPE 54265, Proc. Asia Pacific Gas and Oil Conference and Exhibition, 1999
- 3) N.Ali & T.Alcock "Valhall Field, Norway-The First Ten Years," North Sea Oil and Gas Reservoir-III
- 4) S.D.York, C.P.Peng & T.H.Joslin, "Reservoir Management of Valhall Field, Norway," JPT, August 1992
- 5) E. N. Mastrojannis, L. E. Keer, T. Mura: Growth of Planar Cracks Induced by Hydraulic Fracturing, International Journal for Numerical Method in Engineering, Vol. 15, pp41-54, 1980
- 6) N.R. Warpinski, Michael Berry Smith, "Rock Mechanics and Fracture Geometry," Recent Advance in Hydraulic Fracturing, SPE Monograph vo.12, 1989
- 7) R.W.VeatchJr., Z.A.Moschovidis, & C.R.Fast, "An Overview of Hydraulic Fracturing," Recent Advance in Hydraulic Fracturing, SPE Monograph vo.12, 1989
- 9) J. F. Cuesta, "Review of Fracturing Pressure Analysis," OIL GAS-European Magazine 1/1991
- 10) J. Desroches, B. Lnoach, P. Papanastasiou, "On the Modeling of Near Tip Processes in Hydraulic Fractures," Int.J.Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr. vol. 30, No.7