

メタンハイドレートフォーラム2014

地層の力学応答－地層の安定性と出砂のメカニズム

フィールド開発技術グループリーダー 山本晃司 (JOGMEC)
 生産手法開発グループ 米田純 (AIST)
 MH21 ワーキンググループ2 (WG2)

メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム
 Research Consortium for Methane Hydrate Resources in Japan

本日の内容

- 力学的課題、特に出砂
- 2013年試験における出砂と原因の検討
- 出砂対策法と実験・解析手法

地層と坑井の力学的課題

- 主な課題: ハイドレート貯留層が、海底面下の比較的浅い深度の未固結堆積物中に存在する
- 大きな圧力の変動とMH分解による物性変化が生じる
- ⇒ 地層と坑井の安定性の技術課題
 - 地層が坑井の重量を支持できるか
 - 地層の変形とそれによって坑井に加わる力によって坑井が破壊したり、出砂が起きたり、圧密による浸透率変化が生じたりしないか
 - 坑井の周辺のセメントや地層が破壊されて海底面との導通経路にならないか
 - 海底の斜面安定性など、広域の影響が生じないか
- データ・サンプルの取得手法、実験手法、応力評価の方法、3次元力学モデルの構築、シミュレーション技術など、広範な研究を実施中

ここまでの話: 地層は剛体として話していたが: 実は地層は変形・破壊する



Porosity-elasticity by M.A. Biot

Compatibility law
$$e_{ij} = 1/2 \cdot (u_{i,j} + u_{j,i})$$

$$\zeta = w_{k,k} = -\beta(U_k - u_k)_{,k}$$

Constitutive law
$$\begin{cases} \sigma_{ij} = 2\mu e_{ij} + (\lambda e_{kk} - \alpha p)\delta_{ij} \\ p = -\alpha M e_{kk} + M \zeta \end{cases}$$

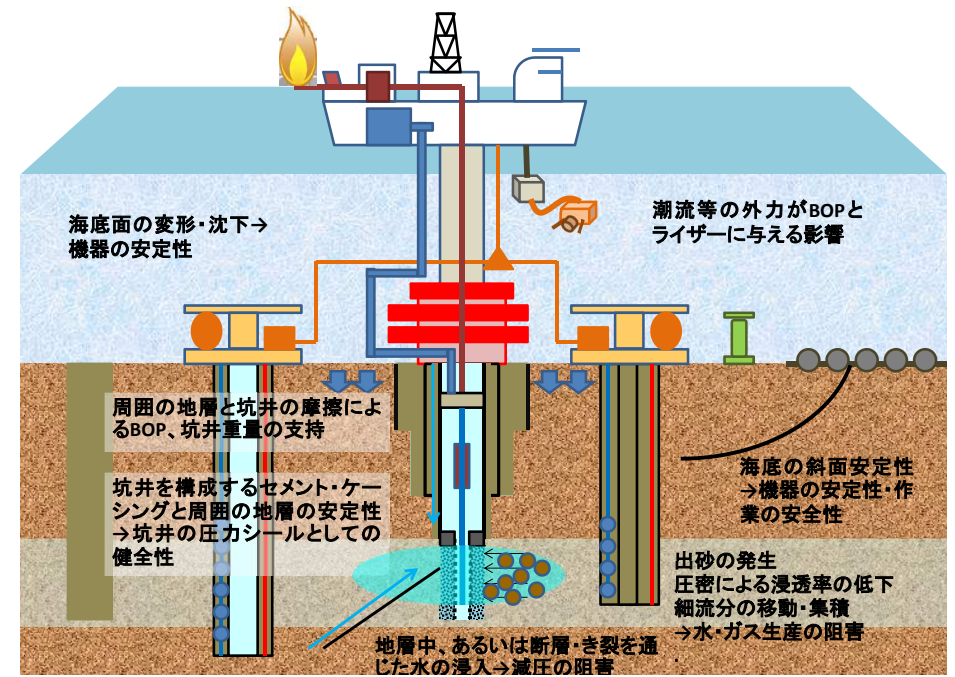
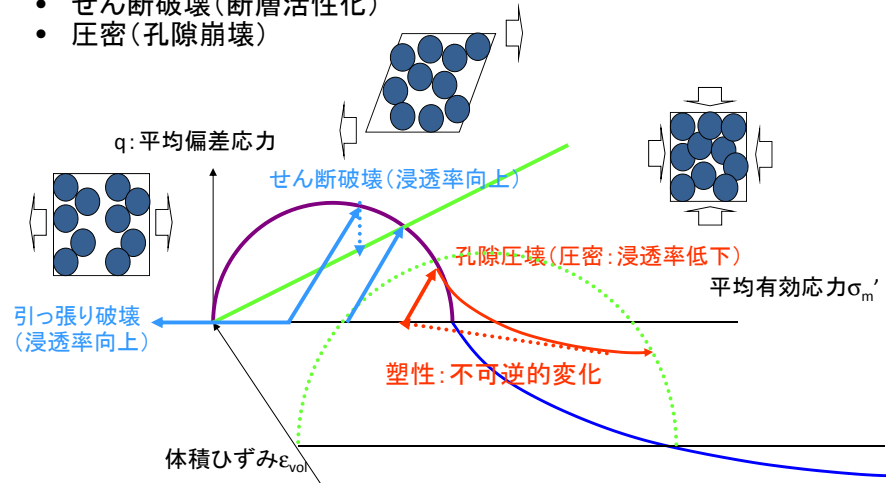
Equation of motion
$$\begin{cases} \sigma_{ij,j} + \rho b_i = \rho \ddot{u}_i + \rho_f \dot{w}_i \\ p_{,i} + \rho_f c_i = -\rho_f \ddot{u}_i - \rho_f / \beta \cdot \dot{w}_i - b \dot{w}_i \end{cases}$$

Darcy's law
$$\dot{w}_i = -1/b \cdot p_{,i}$$

λ, μ	Elastic modulus	λ, μ, α, M
ρ	Mass parameter	ρ, ρ_f, β
	Diffusion parameter	$b = \eta/k$

地層の変形・破壊は水利特性も変える:生産挙動に影響

- 引っ張り破壊(き裂形成)
- せん断破壊(断層活性化)
- 圧密(孔隙崩壊)



岩石の貯留層での出砂

坑口

TRCメールマガジン: 石油開発最新事情: 出砂現象
そのメカニズムと対策
http://www.jogmec.go.jp/library/recommend_library_10_000046.html

地層圧力と坑底流動圧力の低下による有効応力の上昇

坑内の砂の輸送とそれによる配管の摩擦等

ケーシングに穿たれたパーフォレーション孔

パーフォレーション周辺での岩石破壊の発生

水付きの発生

砂による坑内の埋没

貯留層の圧力が下がり、有効応力が增大して、それを支える坑内の圧力も下がるため、坑井周りの岩石が破壊されて砂になり流れ込む

$$P_m < \frac{1 - \sin \phi}{2} (3S_v - S_n - UCS) + \frac{1 + \sin \phi}{2} P_f$$

Rock stress

Pore pressure

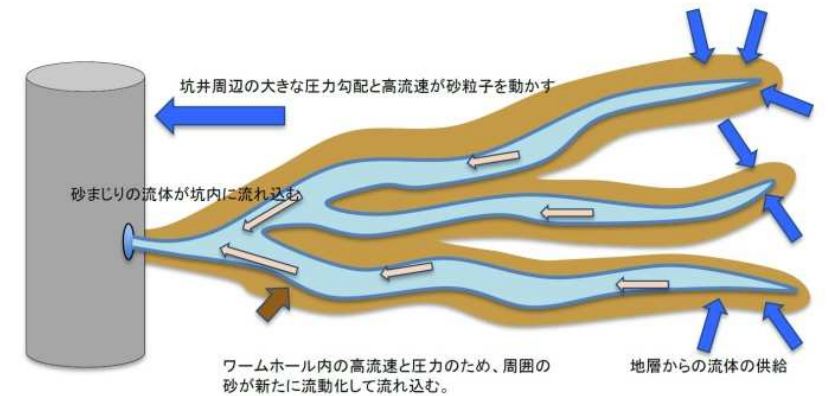
Mud pressure

出砂

Tensile stress concentration; leads to tensile failure of wellbore (Drilling induced fracture)

Compressional stress concentration; leads to shear failure of wellbore (Breakout)

メタンハイドレートのような未固結層での出砂



地層内を流れる流体によって、地層が流動化し、ワームホール状の流路(内部浸食ないしはパイピング)が生じる。周囲の砂を侵食しながら継続的に流入する。

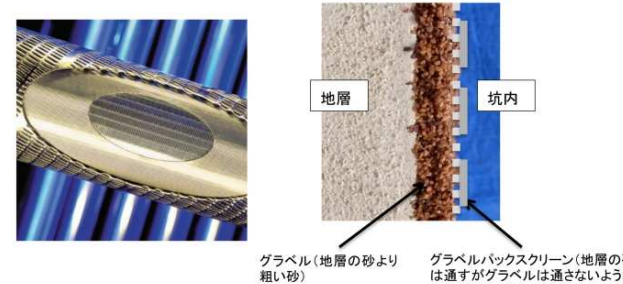
出砂の問題

- 砂を出すことの問題
 - 坑井が埋没して、生産がそれ以上できなくなる
 - 出てくる砂を運び処理するのにコストがかかる
 - 砂によって管内の摩耗が生じて、漏えい等の事故につながる
- 砂を出すことのメリット
 - 坑井周辺に流路ができるので、みかけの浸透率が上がり(マイナスのスキン)、生産性が向上する
- 出砂対策のポイント: 生産性の維持と出砂障害の防止の両立
 - 完全に砂を止めようとするとう生産性が下がる
 - 出砂対策装置の目詰まりが問題: 細粒分は流し、粗粒分はしっかり止めるのが原則
- メタンハイドレートの場合
 - 出砂による流路形成が、海底や帯水層との導通を招くと、減圧の継続が不可能になる恐れがある。

出砂対策装置



スチールウールタイプのスクリーン(2008年第2回陸上産出試験で使用)



グラベルパック(2013年第1回海洋産出試験で使用)

2013年の出砂現象

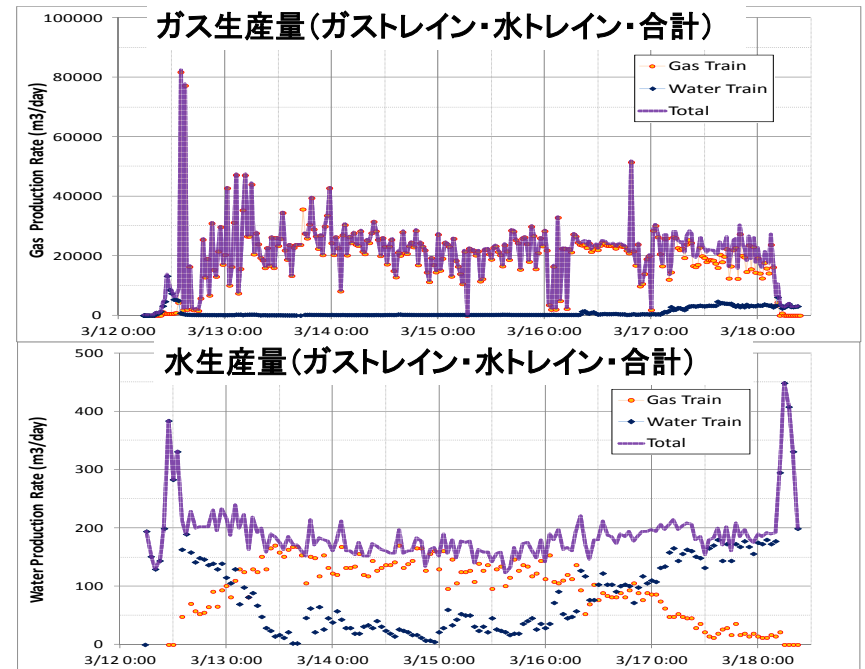
観測された事実: 船上

- 最初に水量が急増: ポンプの安全装置が働いて回転数が低下
- ポンプの回転数は回復するが、水を運びきれずに坑内圧力が回復してガスの生産が止まる。
- 船上に砂が到達して、フィルターを詰まらせる。さらに、ガスセパレータや計量タンクが砂で埋まり、生産を続けるのが困難になる。
- 坑内(特に暴噴防止装置)が砂で埋没することを避けるためにポンプを回転させたまま、坑内にガス生産ラインを通じて船上から水を送り込み、坑内からガスと砂を追い出す。
- 坑内の圧力が初期状態に復帰して、状況観察後、廃坑処置に移る。

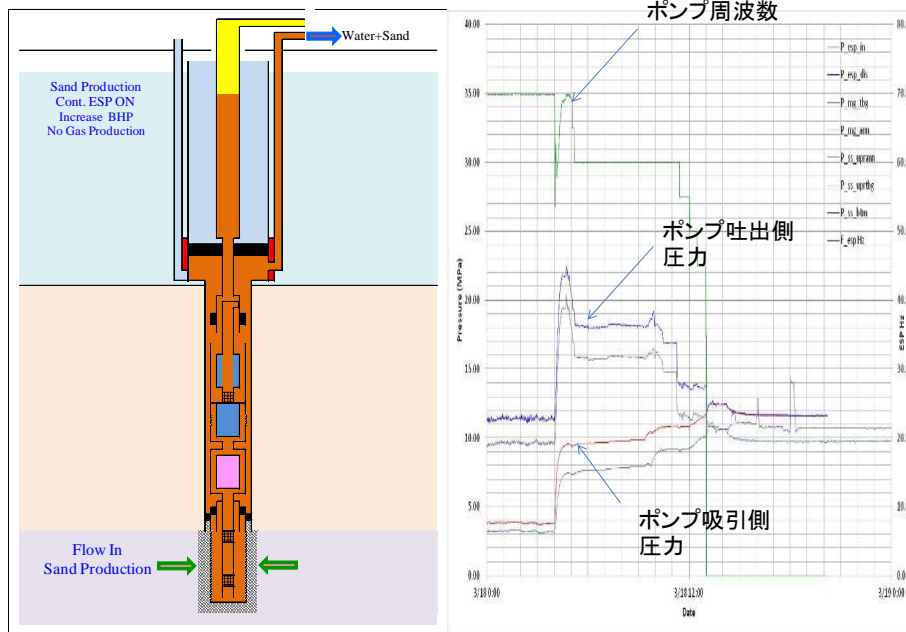
観測された事実: 坑内

- 出砂と同時に、生産井の温度がほぼ初期の温度まで回復する。
- 坑内の圧力は、水をくみ上げられないので徐々に上昇する。
- モニタリング井においても、特定深度で急激な温度変化(低下・上昇)が見られる。
- その後に実施した物理検層で、出砂の影響の可能性のある変化が捉えられる。

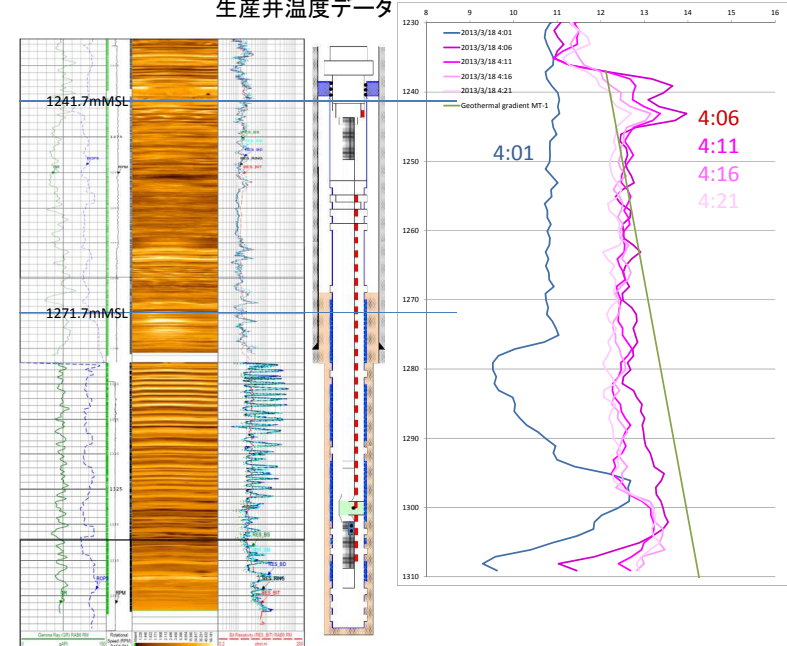
12



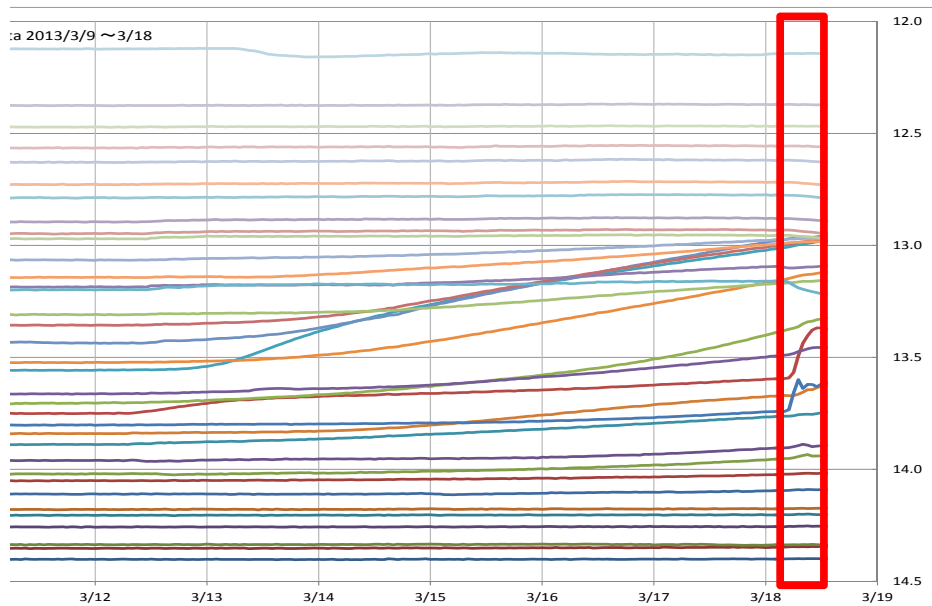
Sand Production (出砂時)



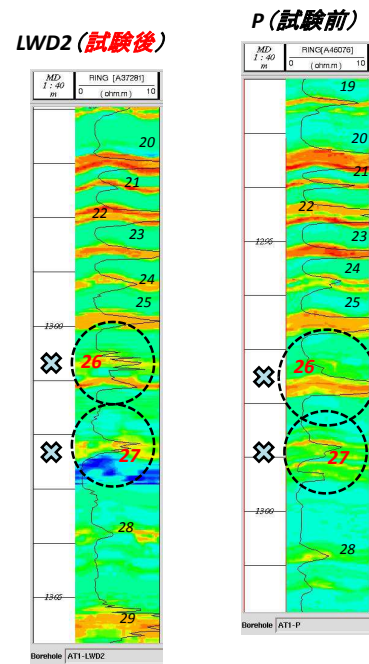
生産井温度データ



モニタリング井温度データ



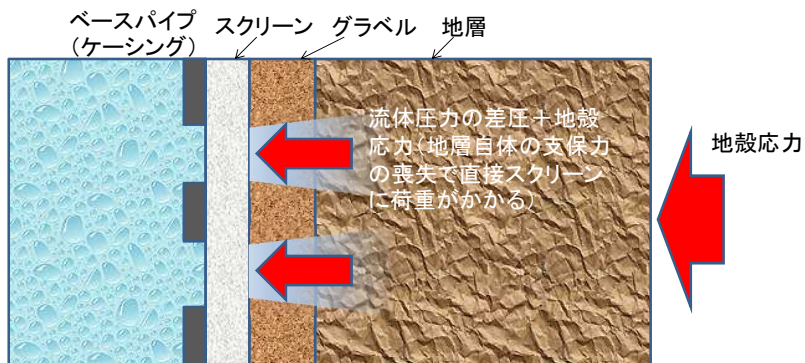
試験前に生産井(P井)で取得された比抵抗イメージログと、試験後(出砂後)に近傍(LWD2井)で取得されたデータの比較



温度データなどから出砂が起きたと考えられている特定の砂層で、出砂の影響と考えられる変化が見られる

仮説A:減圧にある圧力差と地層の応力でスクリーンが破損

- 減圧(約9MPa)と、地層強度が低下して支保効果が失われることで、グラベルを通じて大きな応力がスクリーンにかかる
- ベースパイプの空隙部などでスクリーンが荷重を支えられずに破損
- 砂とグラベルが流れ込む
- バリエーションとして、地層変形に伴うスクリーンの座屈なども考えられる。

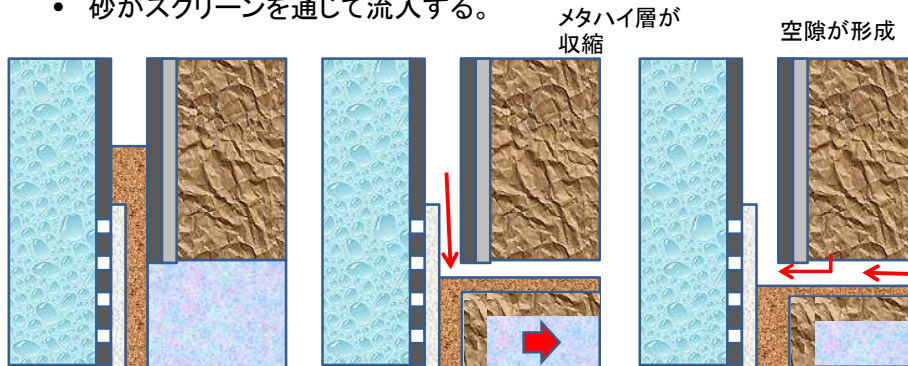


仮説A:減圧にある圧力差と地層の応力でスクリーンが破損

- 効果的に減圧されMHの分解が進んだ層、またはもともとMH飽和率が低く強度が低かった層で発生すると考えられる。
- 出砂が兆候なく瞬時に発生したことは整合する。
- スクリーンが大きく破損すれば、グラベルサンドも生産されることが考えられるが、実際にはグラベルはまったく検出されていない。
- 10MPa(1cmあたり100kgf程度の荷重)でスクリーンが壊れるか? スクリーンのサンプルを分析した結果、単純にスクリーンが押しぬかれて破損する可能性は低いことが分かった。
- 一方、スクリーンの一部が開くような力や、摩耗の影響がないかは検討が必要。

仮説B:地層の収縮によるグラベルトップの低下

- MHの分解により地層が収縮してアニュラス体積が増える、あるいははき裂・空隙ができる。
- それによりグラベルトップが低下
- サンドリザーブ分を使いきって地層とスクリーンの間にグラベルがなくなる。
- バリエーションとして、1)地層中に収縮引張り裂のような空隙が形成される、2)グラベル自体が大きく圧密する、なども考えられる。
- 砂がスクリーンを通じて流入する。



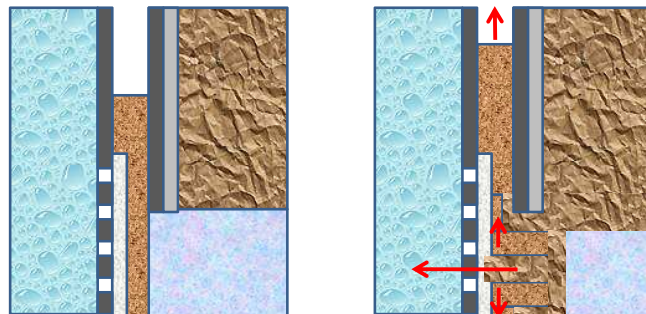
仮説B:地層の収縮によるグラベルトップの低下

- 想定されていた問題で、それに対応するためにサンドリザーブが設けられている。
- 地層の体積が若干収縮しても、周囲から応力が加わっている軟弱な地層で、アニュラスの容積が増えることがありうるか？
- 出砂が発生するとすると、ケーシングシュー付近で発生する。
- 温度データの分析などで出砂が起きたのはケーシングシュー直下ではないとみられるので、主要要因とは考えにくい。

21

仮説C:地層がグラベルを押しつけてスクリーンと接触

- 仮説Aと同様に地層からグラベルに荷重が加わる。
- 比重が軽く、またゆるくしかつまっていないグラベルはその力に押しつけられて上方に移動(鉛直に加わっている荷重は自重分の数100kPa)
- 流動のある場であり、地層及びグラベルは、きわめて緩く動きやすい状態のため、水の流れもグラベルを動かす。
- 地層の粒子がスクリーンに達して出砂が始まる。



仮説C:地層がグラベルを押しつけてスクリーンと接触

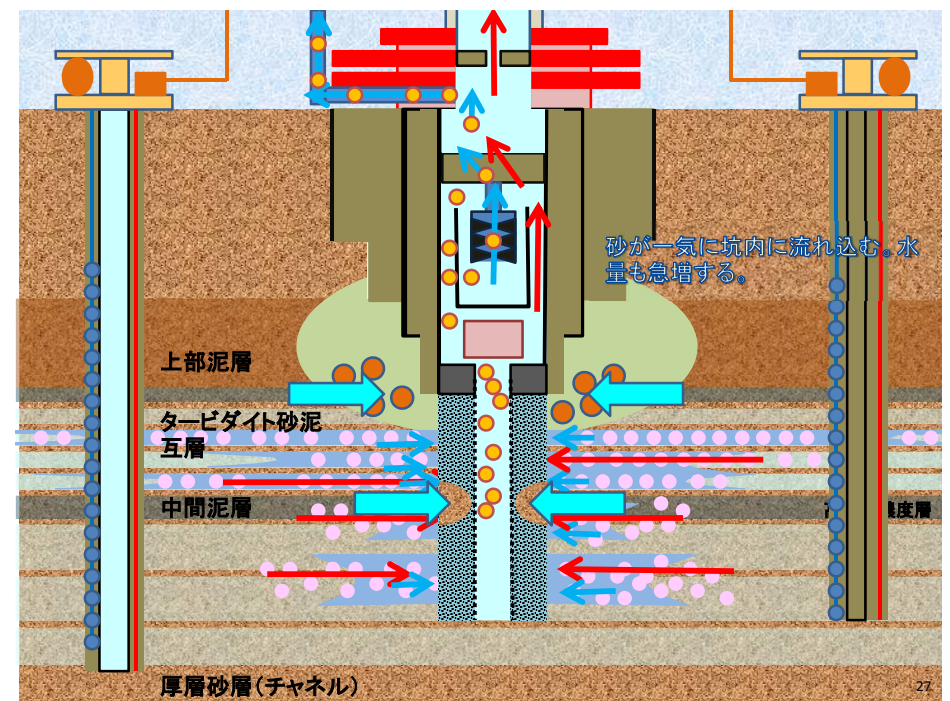
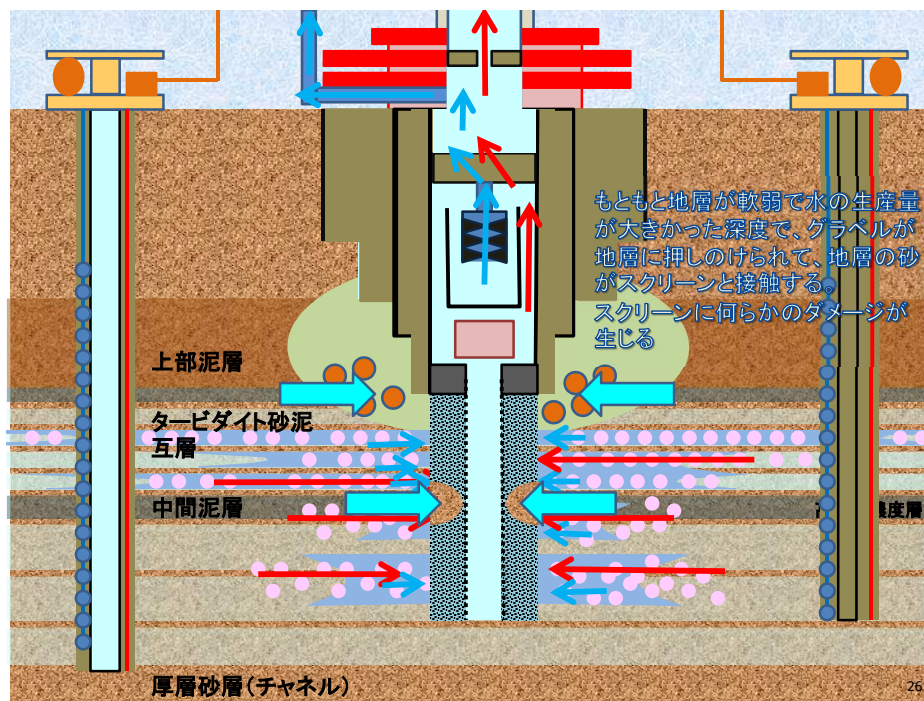
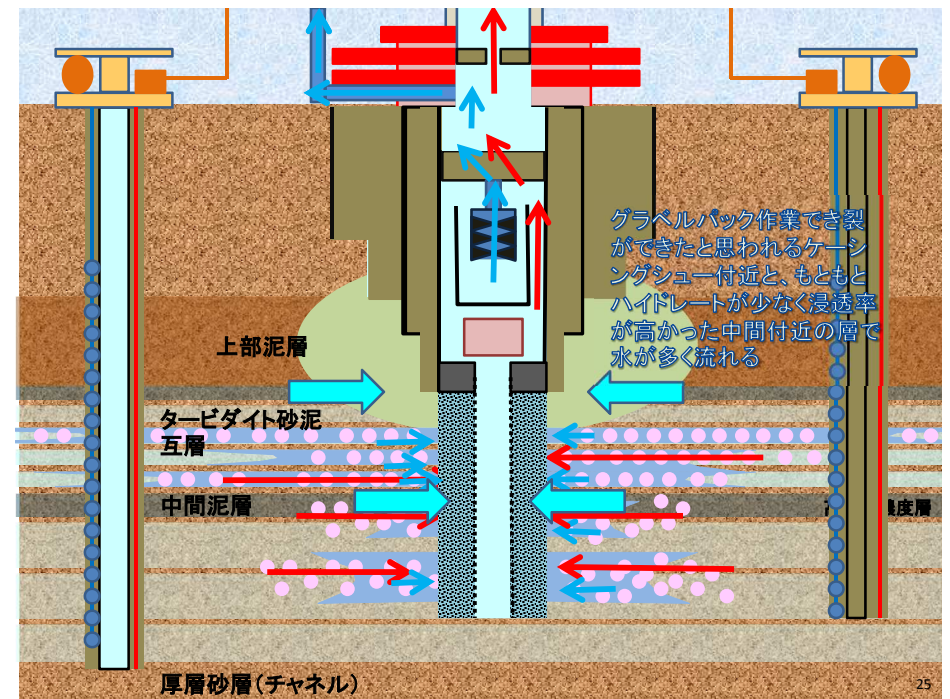
- 水の生産性の高い地層で出砂が起きる可能性が高い。
- 出砂の発生点がケーシングシュー直下である必要がない。
- 徐々に出砂が増えるのではなく、一気に発生できるか。
- 数値計算や室内実験で地層の応力変化・変形を予想して、ありうるシナリオを検討している。
- 温度データの分析などで出砂発生深度と整合する。

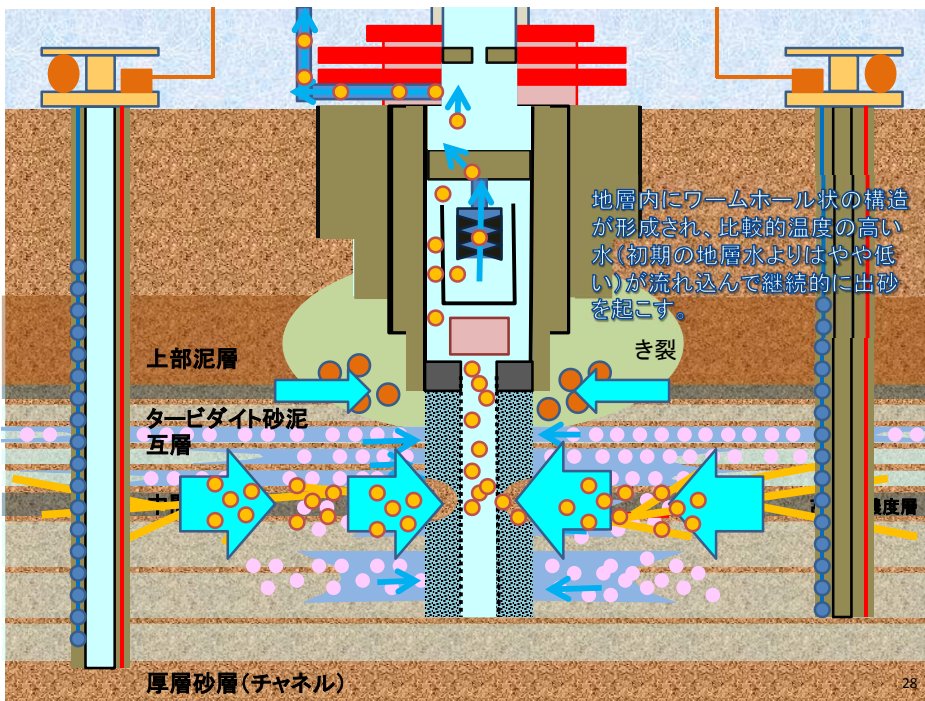
23

考えられる出砂の過程

- 出砂が起きたのは、もともと水生産量が多かった層と考えられる
 - 砂の流動化が起きやすかった？
- グラベルが砂の侵入を止めていたが、押しのけられる等して働かなくなる
- スクリーンの損傷が起きて、砂が流れ込めるようになる
- 流路が形成されて、水と砂が大量・継続的に坑内に流れ込む
- 仮説AとCの複合的な要因で、徐々に砂が動きうる状況が作られたうえで、一気に流れ込んだと考え、今後の出砂対策の検討を行うこととしている。

24

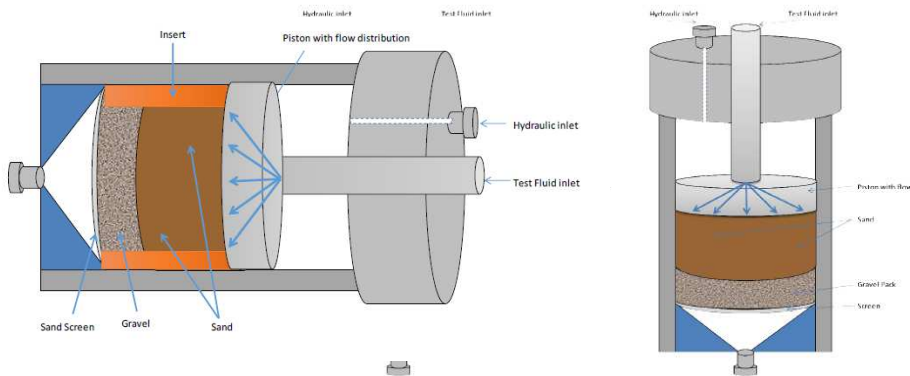




出砂の実験とモデリングによる検討

29

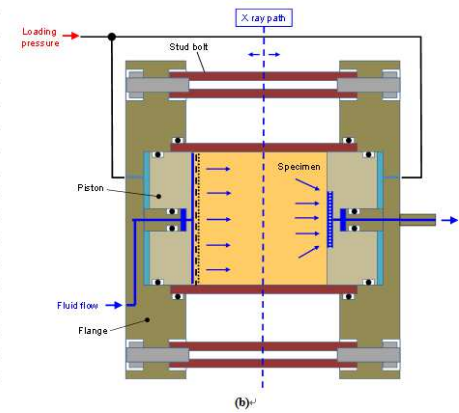
スラリーテスト・グラベルパケットテスト: 砂がスクリーンを通過できるか、グラベルが効き続けるか実験



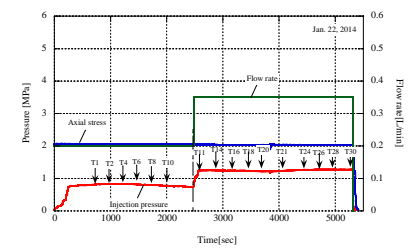
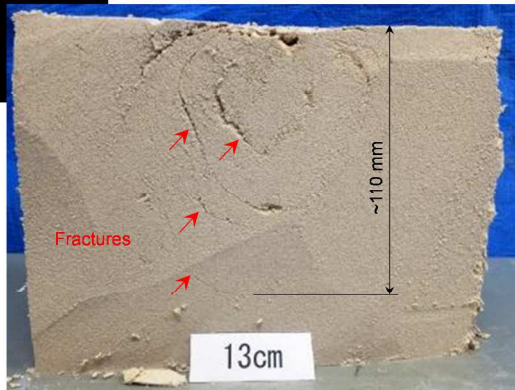
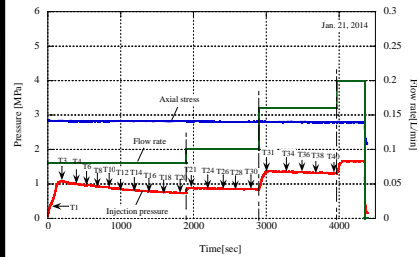
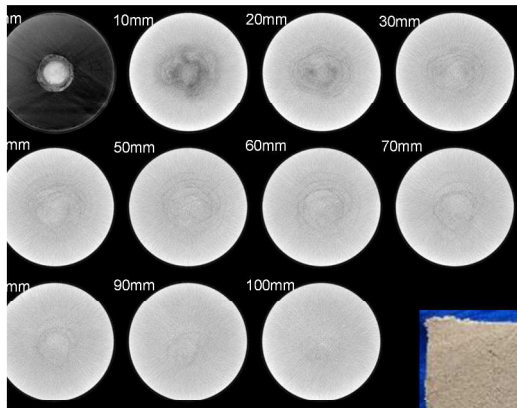
31



出砂の過程を
CTで可視化する実験(東北
大伊藤教授一
ポスター)

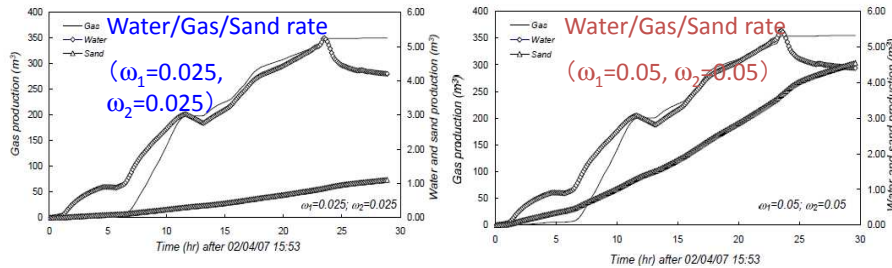


32

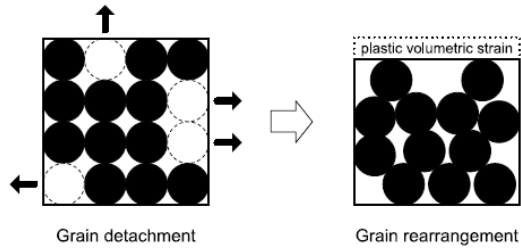


グラベルがあると、砂の侵入は
まったく見られない

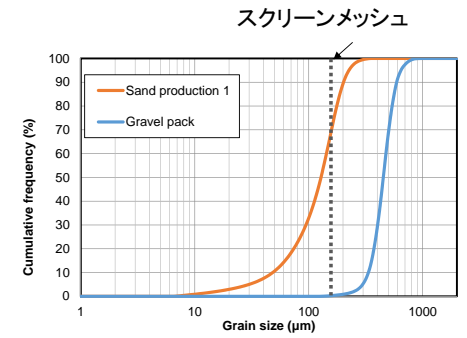
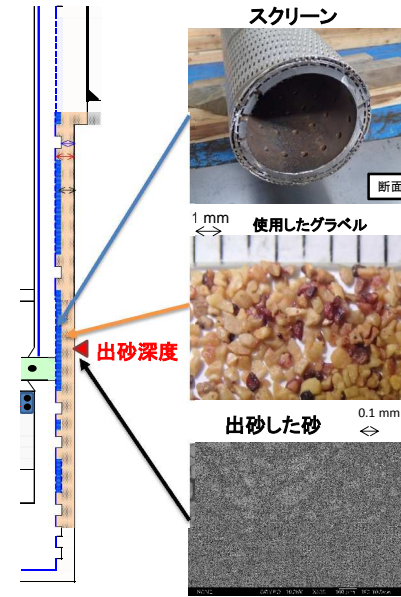
未固結層で砂が流体によって運ばれる過程を考慮した出砂モデル(Technion大学Klar准教授)→ポスター



Measurement (gas/water)

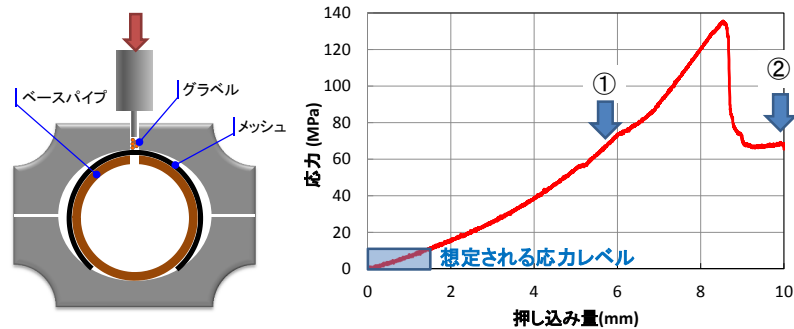


出砂した砂とグラベル、スクリーンメッシュの関係

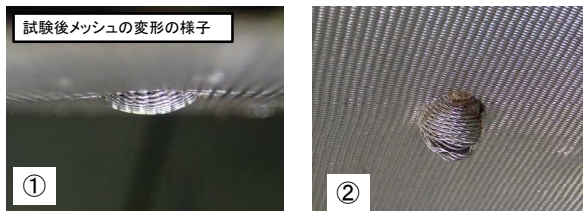


生産された砂は、貯留層内のMH胚胎層の砂の粒径とほぼ等しく、平均粒径は約120μm。使用したグラベルパックは平均粒径約450μm。

水平応力に対するスクリーンの強度

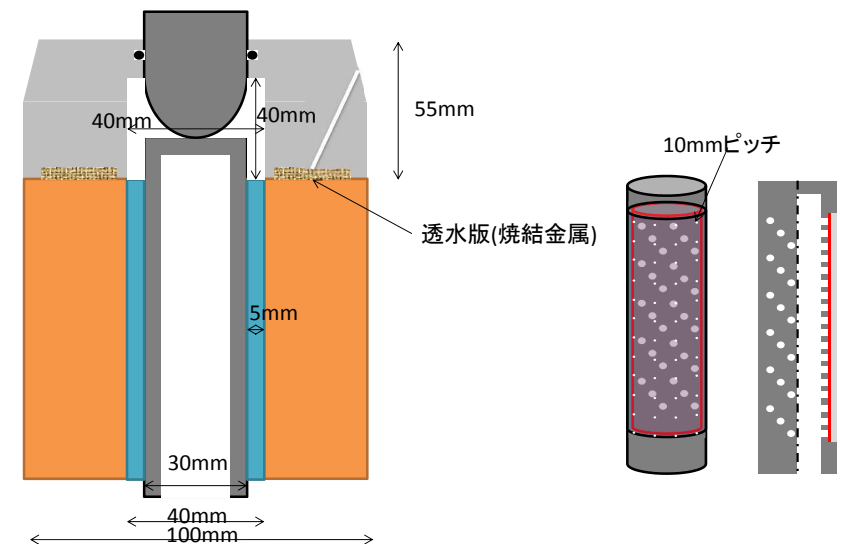


生産時の応力負荷は最大十数MPaと考えられる。これに対して、70MPaの応力を負荷してもスクリーンは健全性を保っており、約130MPaでようやく破損する。地層の応力でスクリーンが破損した可能性は低い。



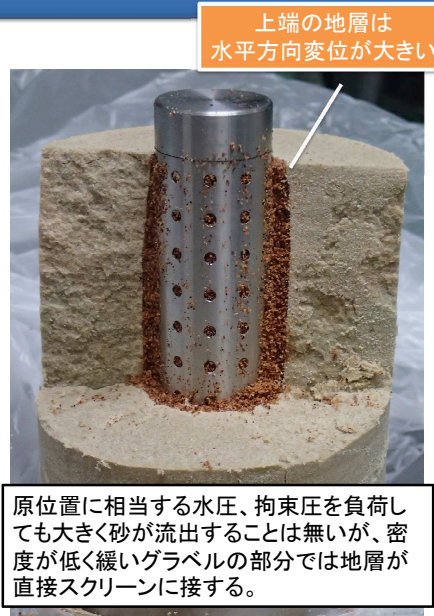
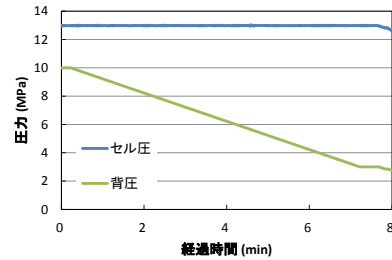
グラベルの機能再現試験

ケーシングシュー周りの小型模型実験

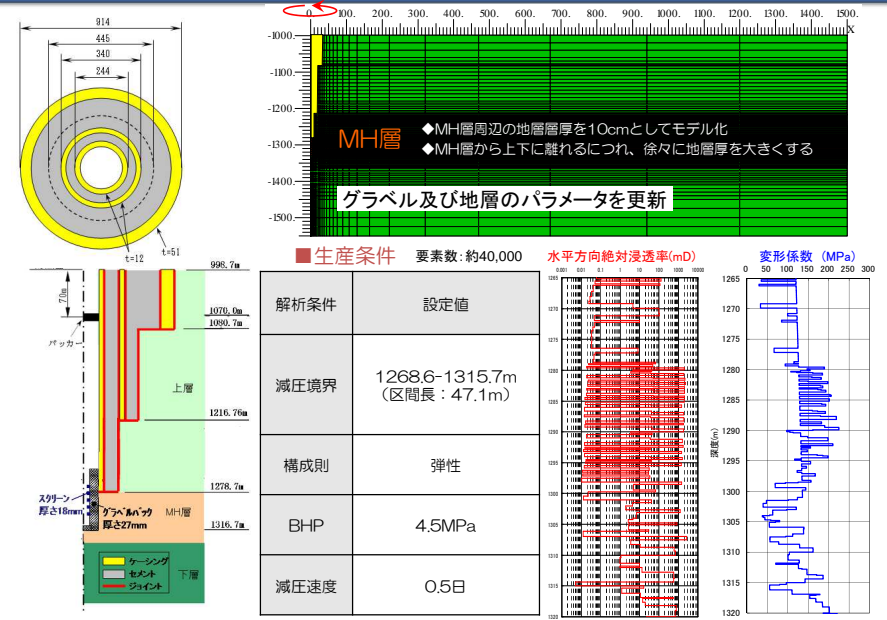


グラベルの機能再現試験

ケーシングシュー周りの小型模型実験

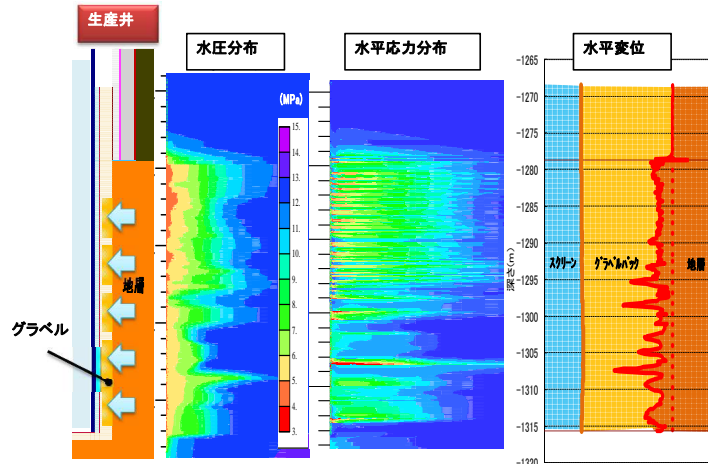


減圧に伴う地層の変形挙動予測 【解析モデル】



減圧に伴う地層の変形挙動予測 【解析例】

- 減圧に伴う地層変形の事後解析(ヒストリーマッチングシミュレーション)
 - 海洋産出試験の減圧をシミュレート
 - 特定の層に局所的な応力負荷

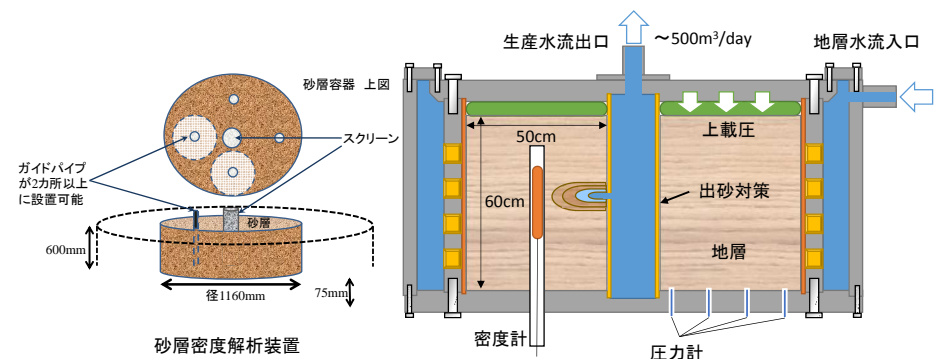


グラベルの肉厚が薄くなる特異的な地層があることを解明

出砂対策技術検証試験(計画)

- 中長期へ向け、有効な出砂対策技術を検証するため、大規模な模型実験装置を開発
 - ✓ 原位置の応力・流速を再現し、出砂対策技術の有効性を検証する。

特徴: 円筒形であり、3次元的な応力条件を再現
1層60cmの高さを有し、砂泥互層約1枚の空間を再現



今後の出砂対策

44

次期海洋産出試験に向けて

- 砂を止めることを一義として
 - 多重防御 (Multiple barrier)
 - 流速の速い場、地層が軟弱で変形する場でも影響を受けにくい装置
 - 十分な力学的強度、耐摩耗強度があること
- その一方で、
 - 生産性への影響は可能な限り下げる (細粒が流せるように工夫)
- モニタリング技術の検討
 - 出砂の初期検知

45

Baker Hughes社のグラベルパックに代わる出砂対策機器GeoForm (形状記憶ポリマー)

◇特殊なポリマーを周囲に巻いたSlotted linerを坑内に降ろし、地下に化学物質を送って化学反応を起こさせて膨張させると、膨張して浸透率を有する軽石状の状態に変わり、アニュラスを埋めて出砂を抑制できる。グラベルパックに比べて作業性が高く (通常のライナー同様降下させてセットし、化学物質を循環させるだけ)、またセットされた後グラベルと異なり強度を持つので、崩れたり移動したりしない。

◇また、浸透率をコントロールできるので、地層間隔離して仕上げ区間を選択できる。

◇メタンハイドレート層に適用できる低温用のケミカルが無かったため、研究中。



BHI資料より



46

多重防御の例: グラベルパックとプレパックスクリーンの組み合わせ (BHI社資料より)

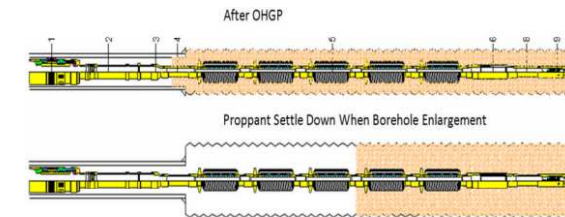


Figure 4



Dual-Screen Prepack



Single-Screen Prepack

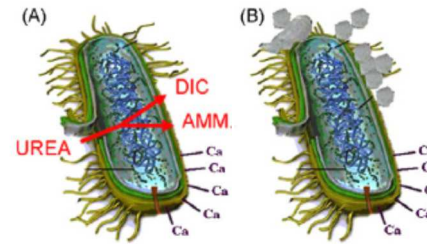


SLIM-PAK™

長期的な課題

- 地層固化技術など
 - 微生物を使用した地層固化(ケンブリッジ大曾我教授、Jiang氏ら)→ポスター
 - CO₂ハイドレートを使用した地層固化
- 水生産との関連を検討
 - 水生産の制御
- 長期試験時の地層変形の影響

48



Microbiologically induced calcite precipitation method (微生物を利用した地層固化法)による出砂対策手法の検討

- ◇微生物が電氣的に粒子接触部に集まって、カルシウムイオンを引きつけ、尿素を分解して炭酸塩を析出させて未固結堆積物を固化させる。
- ◇この手法を用いると、浸透率を維持したまま地層の強度が高まるので、既存の出砂対策手法に組み合わせて、坑井周辺のやや広い範囲の強度を高めることが期待できる。
- ◇ケンブリッジ大と共同研究を実施した。



49