

砂層型メタンハイドレートフォーラム 2020

地下で何が起こっていたのか、
計測とモデルの組み合わせから見えること

山本晃司(JOGMEC, MH21-S)

菅野貴行(シュルンベルジェ)

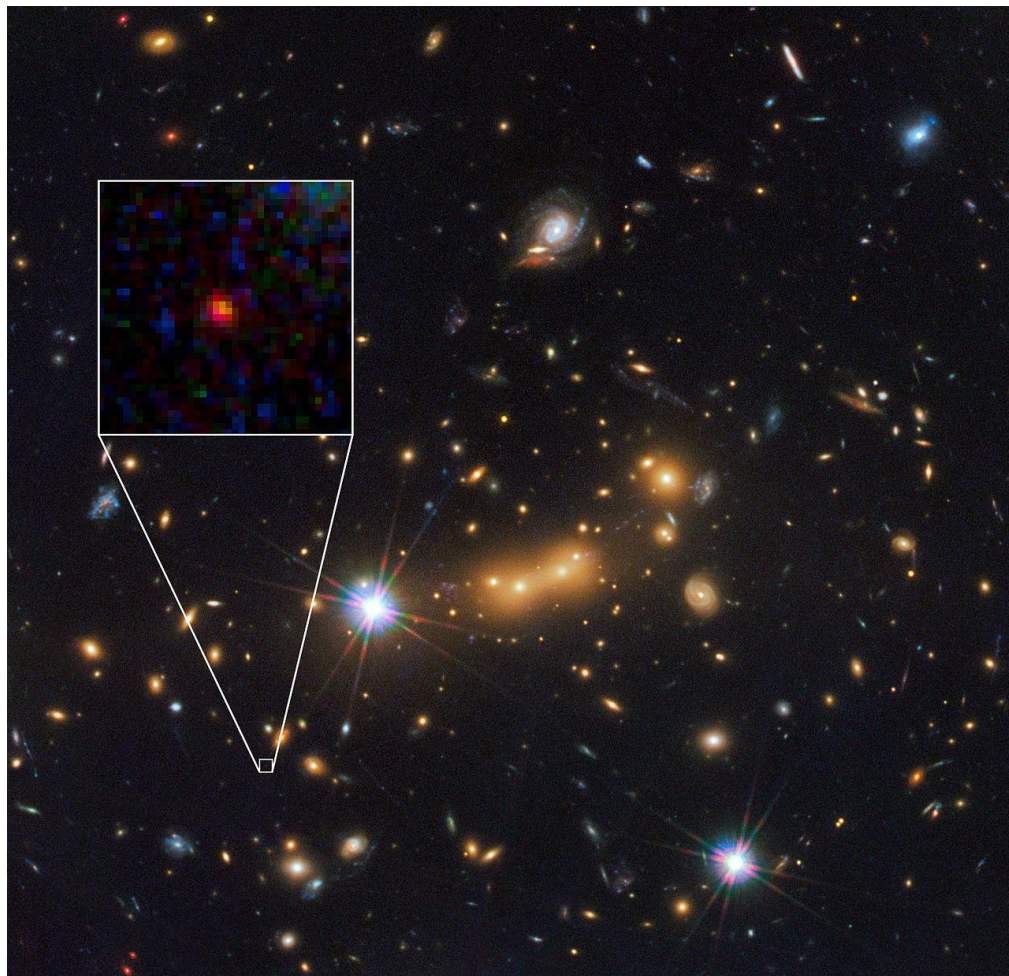
大内久尚(日本オイルエンジニアリング)



2020年12月16日(水)

JOGMEC 技術センター

宇宙は見える、地下は見えない



きりん座MACS0647-JD、地球からの距離319億光年の最も遠い天体 (ESA/Hubble 2011)



数値シミュレーションとデータ同化技術で台風の進路予測の精度は大幅に改善した

地下の問題ではどうか！？

知りたい量に比べて観測可能量が圧倒的に少ない・・・

観測



シミュレーション

メタンハイドレート分解の物理

メタハイ分解領域

分解後の浸透率 $k' > k$

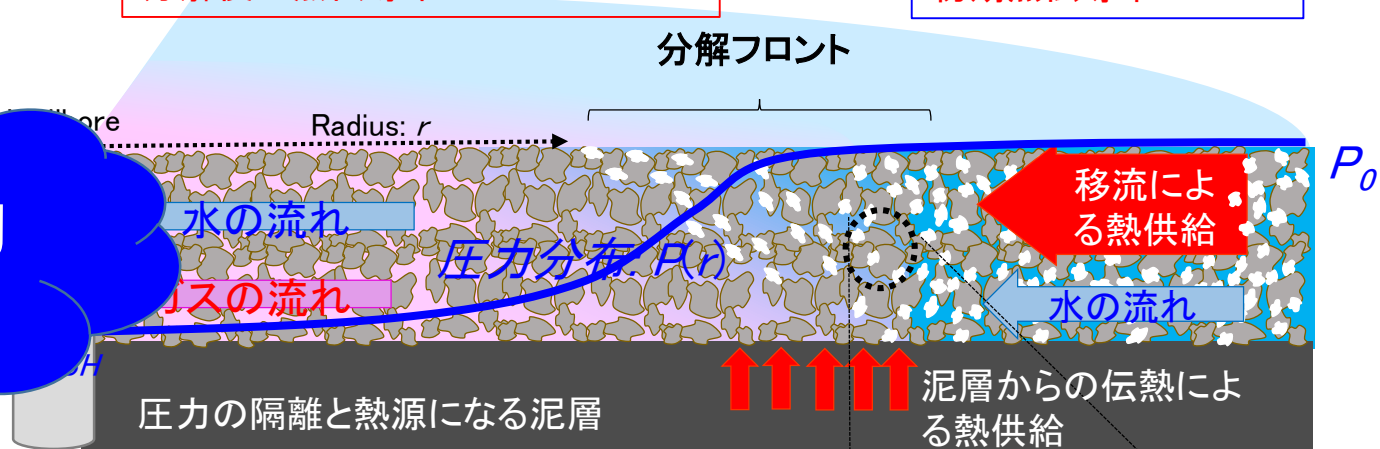
分解後の熱伝導率 λ'

分解前の領域

初期浸透率 k

初期熱伝導率 λ

19世紀の物理学だが...



$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_g S_g) = \dot{m}_g + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \rho_g \frac{k k_g}{\mu_g} \frac{\partial P_g}{\partial r} \right)$$

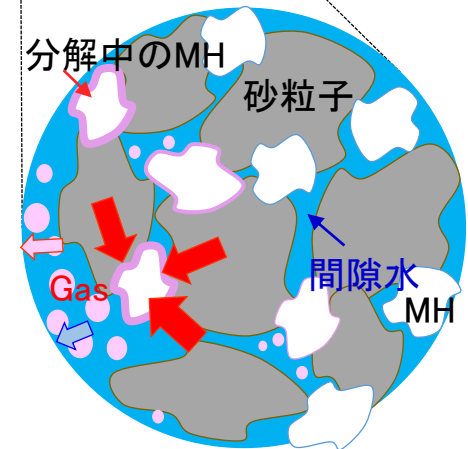
$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_w S_w) = \dot{m}_w + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \rho_w \frac{k k_w}{\mu_w} \frac{\partial P_w}{\partial r} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_h S_h) = \dot{m}_h$$

- 流体は圧力の高い方から低い方に流れる
- 質量は保存する

$$\frac{\partial}{\partial t} [(\phi \cdot (\rho_w c_w S_w + \rho_g c_g S_g + \rho_h c_h S_h) + (1 - \phi) \rho_h c_h) \cdot T] + \nabla [(\rho_w c_w v_w + \rho_g c_g v_g) \cdot T] = \nabla (\lambda \nabla T) + Q_\eta + Q_\varepsilon + Q_h$$

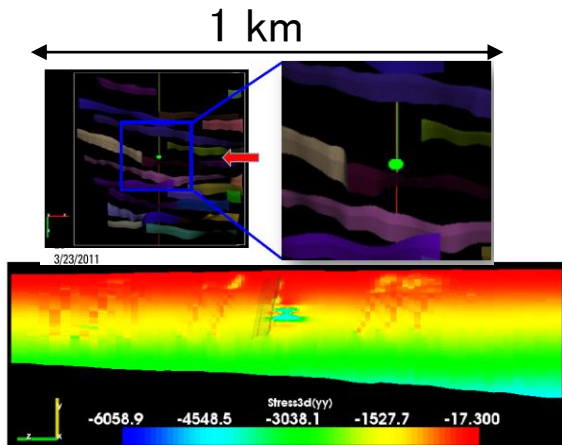
- 熱は温度の高い方から低い方に流れる
- エネルギーは保存する
- 分解は熱を奪う



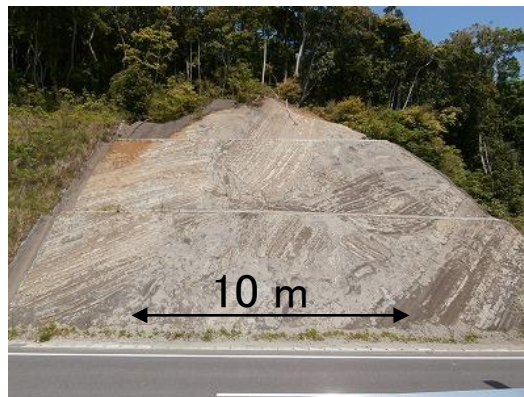
$$\dot{m}_g = M_h k_d A_s (p_{eq}(r, T) - p)$$

- 不安定な条件だと早く分解する

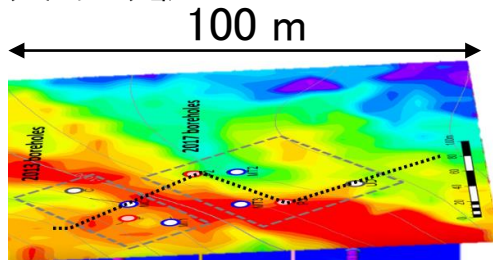
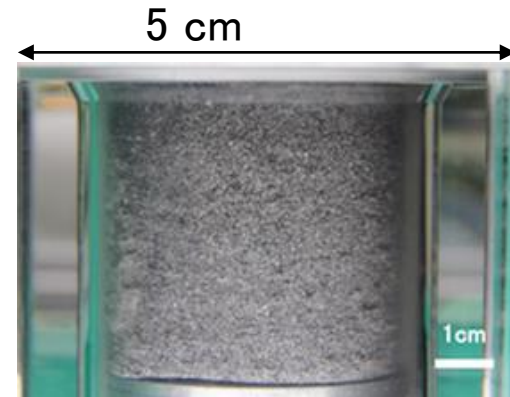
現実の地下の様子、すべてをコンピュータに収められないだけ 複雑・不均質



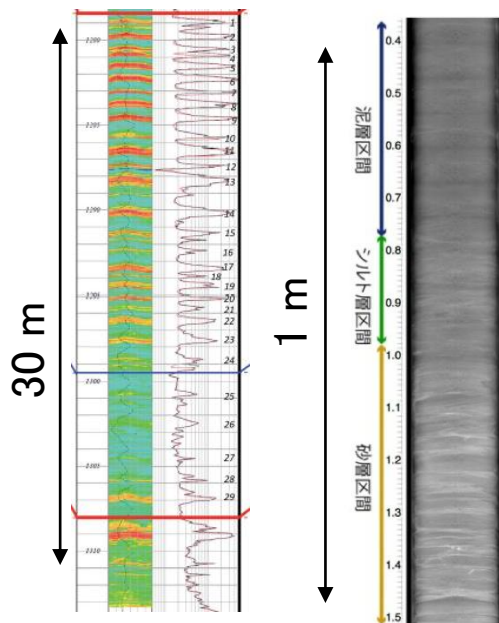
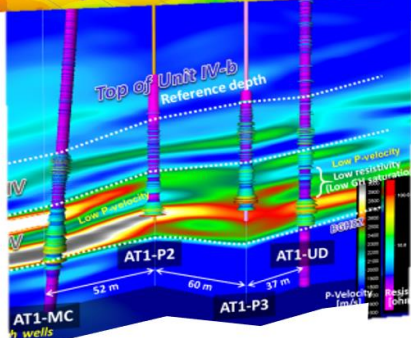
地震探査で抽出された断層とハイドレート 分解影響のシミュレーション



海底地滑りで乱された地層(南房総市)

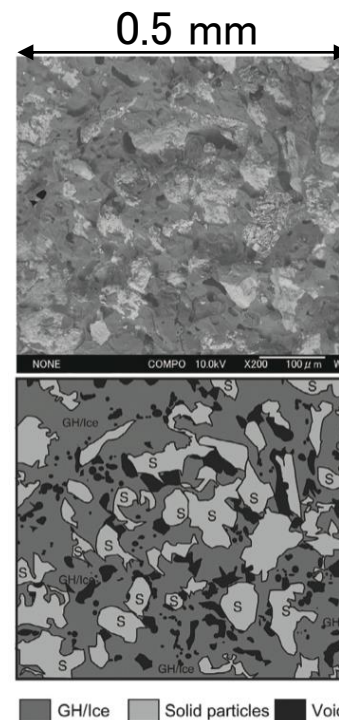


地震探査で見られたハイドレート飽和率の分布



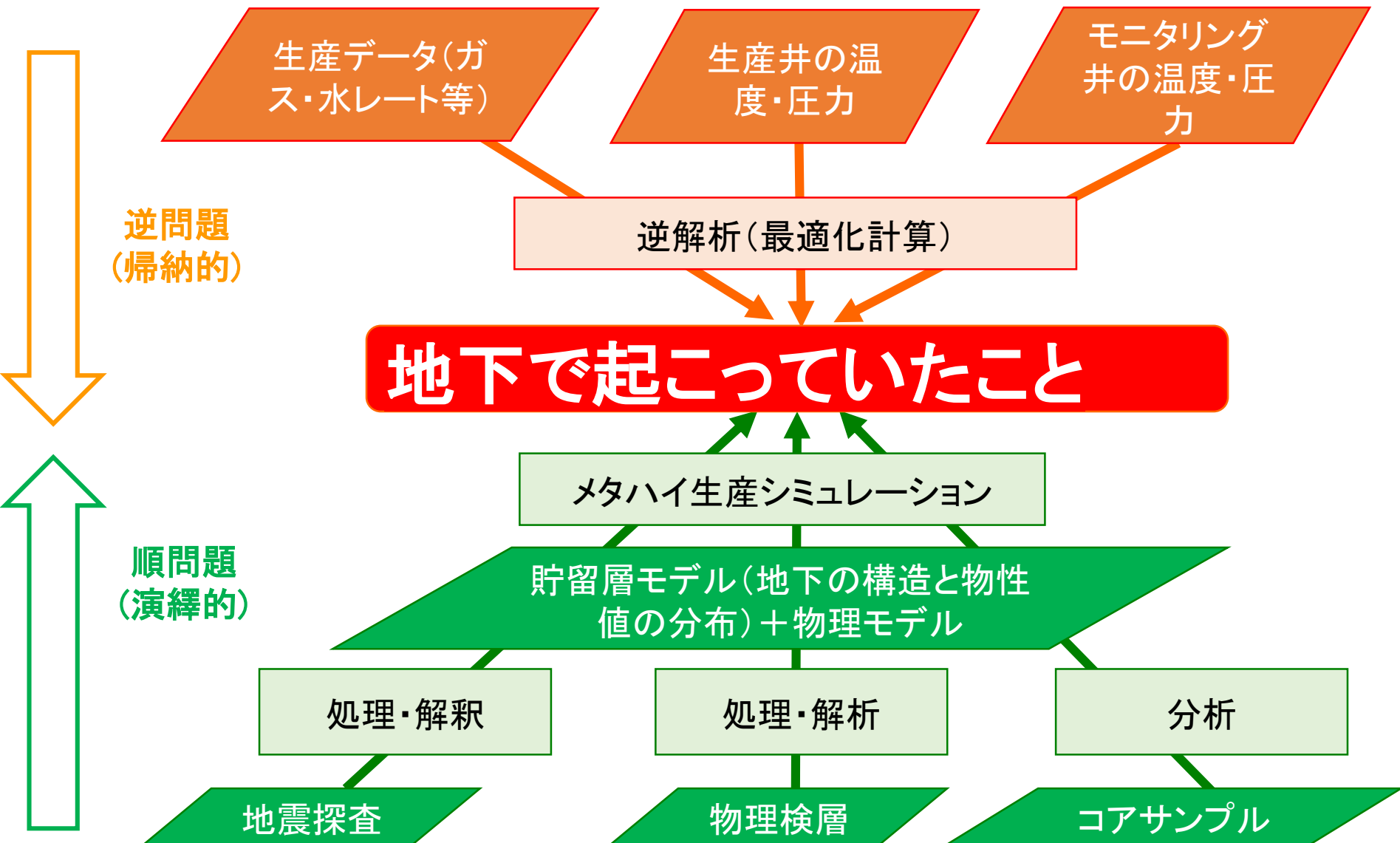
メタンハイドレート層の物理検層

メタンハイドレート層のコアのCT写真



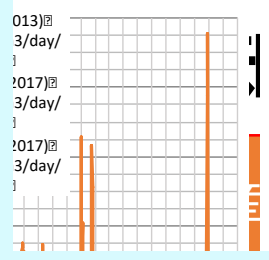
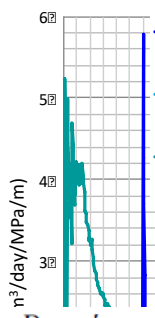
ハイドレートを含む堆積物の電子顕微鏡写真(鈴木他、2009)

地下で起こっていたことを知るための方法



生産データ

↑ 現場の現実
 ↑ 最終的に知りたいこと
 ↓ たくさんの要因が関わっている。



モニタリングデータ

↑ 現場の現実
 ↓ おおむね間接的情報
 ↓ たくさんの要因が関わっている。

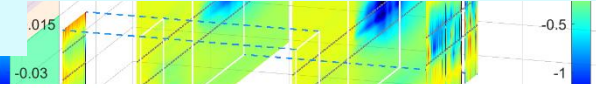
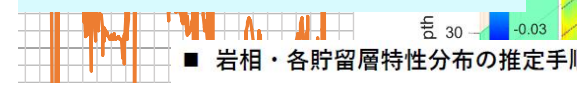


時間的に連続的な情報

Darcy's equations and the equation of continuity

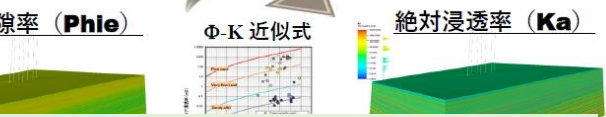
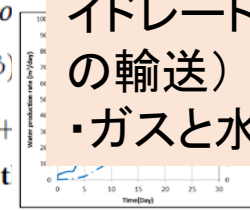
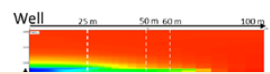
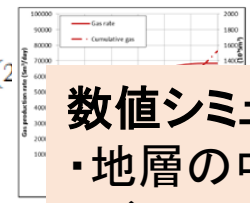
$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_w S_w) = \dot{m}_w + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho_w \frac{k k_{rw}}{\mu_w} \frac{\partial P_w}{\partial r} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_g S_g) = \dot{m}_g + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho_g \frac{k k_{rg}}{\mu} \frac{\partial P_g}{\partial r} \right)$$



数値シミュレーション

- ・地層の中の現象(メタンハイドレートの分解、熱と物質の輸送)
- ・ガスと水の生産量



貯留層モデル

- ・地質構造
- ・物性値(水理・熱・力学)
- ・初期の温度・圧力の空間的な分布

物理モデル

- ・流体と熱の輸送
- ・ハイドレートの分解反応

$$\rho_w c_w v_w + \rho_g c_g v_g T = \nabla(\lambda \nabla T) + Q_{\eta} + \dots$$

Kinetics parameters of MH dissociation in t equation

$$\dot{m}_g = M_h k_d A_s (p_{eq}(r, T) - p) \quad (24)$$

ある時刻の情報(4D(TimeLapse)のデータ取得もある)

地震探査

- ↑ 三次元
- ↑ 広範囲(km)
- ↓ 低分解能(15m)
- ↓ 間接的情報(解釈が必要)



物理検層

- ↑ 多くの物理量
- ・井戸に沿った一次元
- ・中くらいの分解能(0.5 ft)
- ↓ おおむね間接的情報



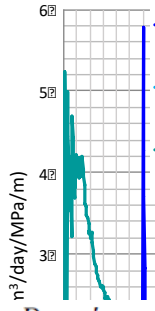
コア

- ↑ 直接的計測
- ↓ 点の情報
- ↓ 高度な分析技術・高コスト



生産データ

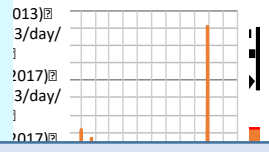
- ↑ 現場の現実
- ↑ 最終的に知りたいこと
- ↓ たくさ
- てい



Darcy's equations of

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_w S_w) = m_w$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_g S_g) = m_g +$$



モニタリングデータ

- ↑ 現場の現実
- ↓ おおむね間接的情報
- が関わってい

**このすべての要素が満たされる
状況が地下で起きていた真実**

あるいは

**矛盾が起きたとしたら、そこに見
えていなかった何かがある**

物理モデル

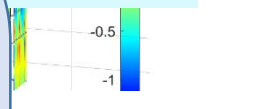
流体と熱の輸

・ハイドレート

$$+ \nabla \cdot [(\rho_w c_w v_w + \rho_g c_g v_g) + \dots]$$

Kinetics parameter equation^{21,86,87}

$$\dot{m}_g = M_h k_d A_s (p_{eq}(r, t) - p_g)$$



絶対浸透率 (Ka)



力学)

力



地震探査

- ↑ 三次元
- ↑ 広範囲 (km)
- ↓ 低分解能 (15m)
- ↓ 間接的情報 (解釈が必要)



- ↑ 多くの物理量
- ・井戸に沿った一次元
- ・中くらいの分解能 (0.5 ft)
- ↓ おおむね間接的情報

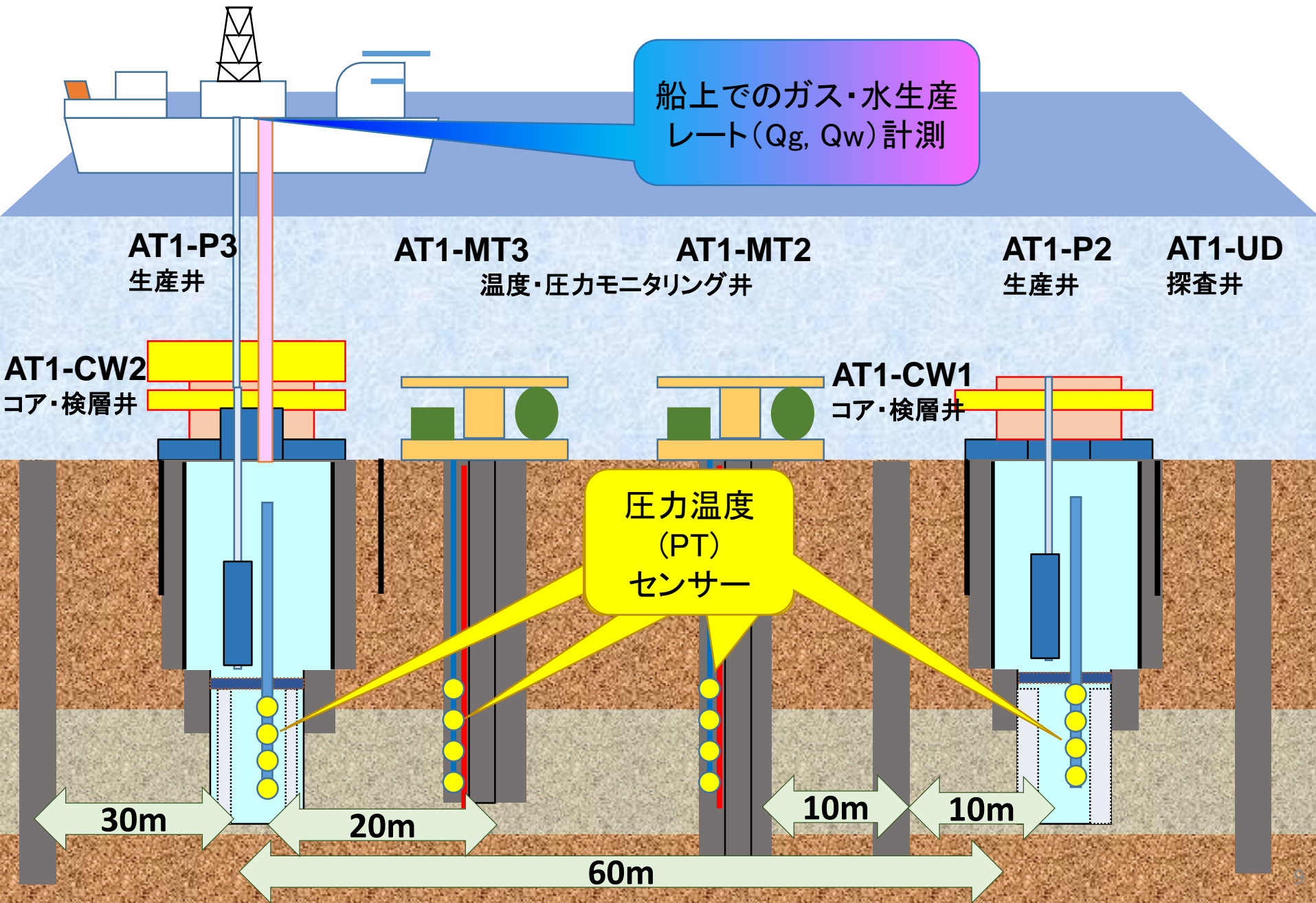


- ↑ 直接的計測
- ↓ 点の情報
- ↓ 高コスト

Pressure-core Nondestructive Analysis Tools (PNATs) @AIST

MH21-S

第2回海洋産出試験(2017年)の坑井配置

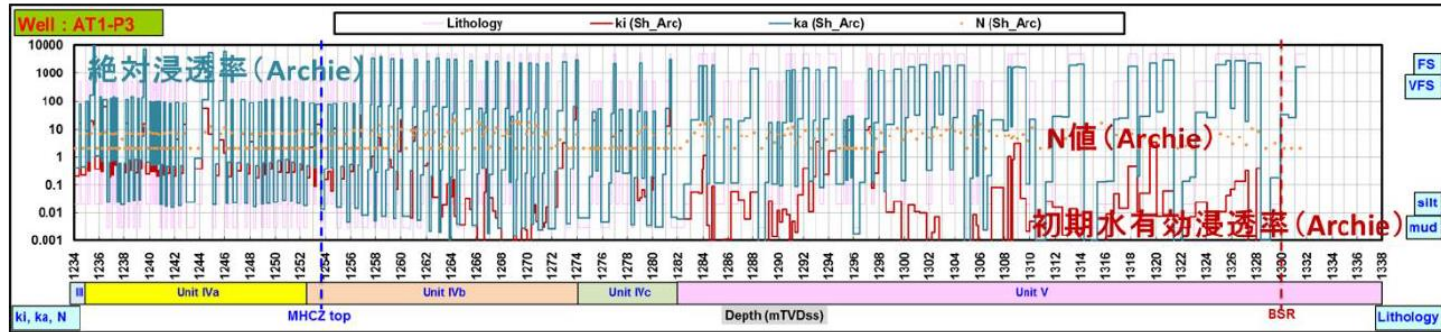


数値シミュレーションと実際の生産挙動の違い

一貯留層パラメータの初期設定

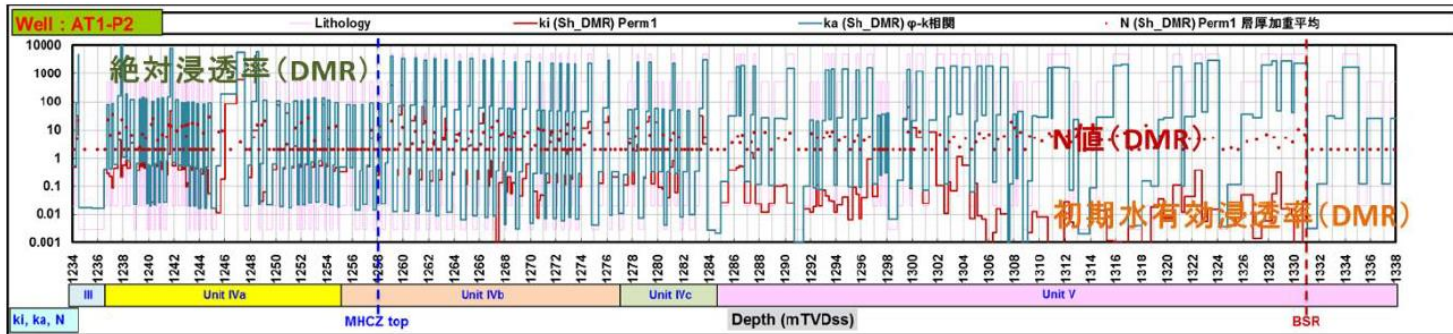
- 物理検層のデータに基づき、第1回海洋産出試験の結果に基づくヒストリーマッチングの知見を用いて構築した貯留層モデル(初期浸透率等)に基づく (Konno et al., 2017) **特に水理特性(浸透率)に注目**

P3



(b) 絶対浸透率、初期水有効浸透率、およびN値

P2



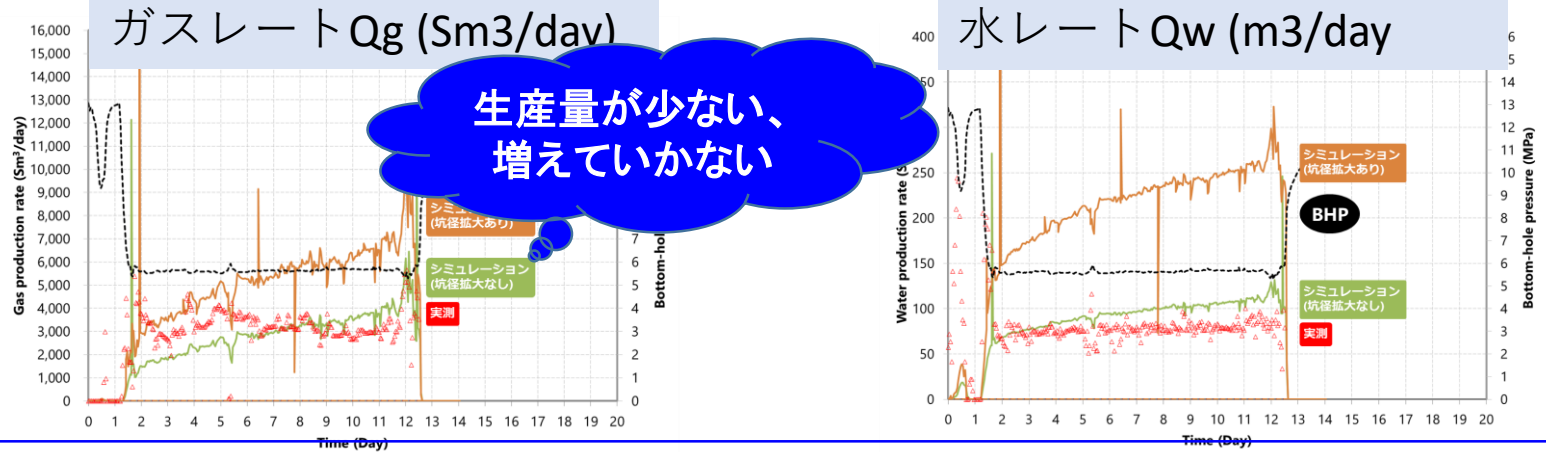
(b) 絶対浸透率、初期水有効浸透率、およびN値

数値シミュレーションと実際の生産挙動の違い

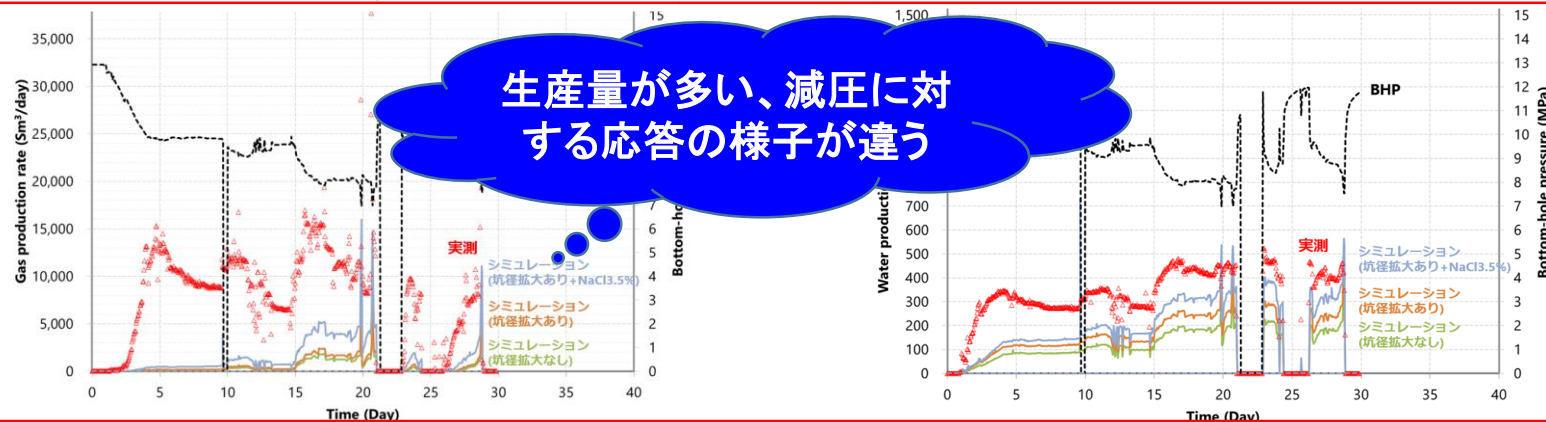
—水レート(Qw)とガスレート(Qg)

- MH21-HYDRESシミュレータの計算結果

P3



P2

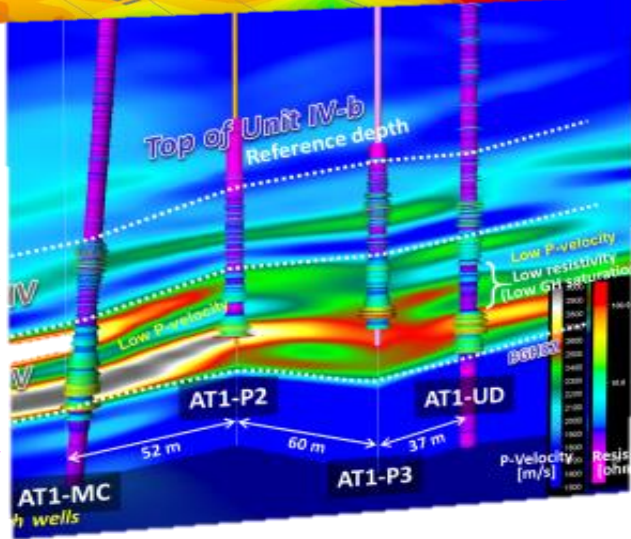
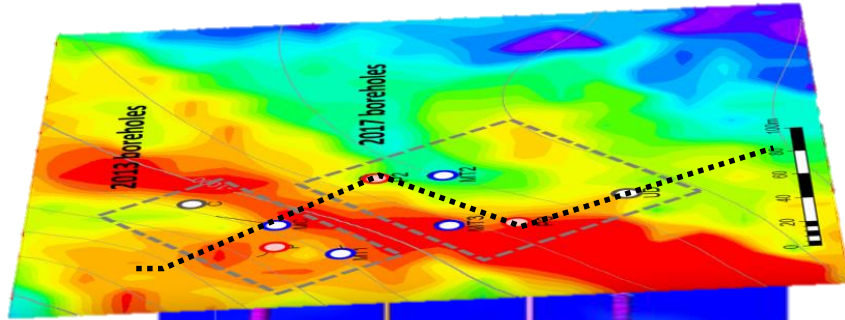


- 坑底圧力
- シミュレーション結果(坑径拡大なし)
- 測定された生産量 Qw, Qg
- シミュレーション結果(坑径拡大あり)

現実の貯留層とその応答

—ハイドレート賦存状況の不均質

$$\text{RMS振幅} \propto \int_{\text{Unit IV}} S_h dz$$



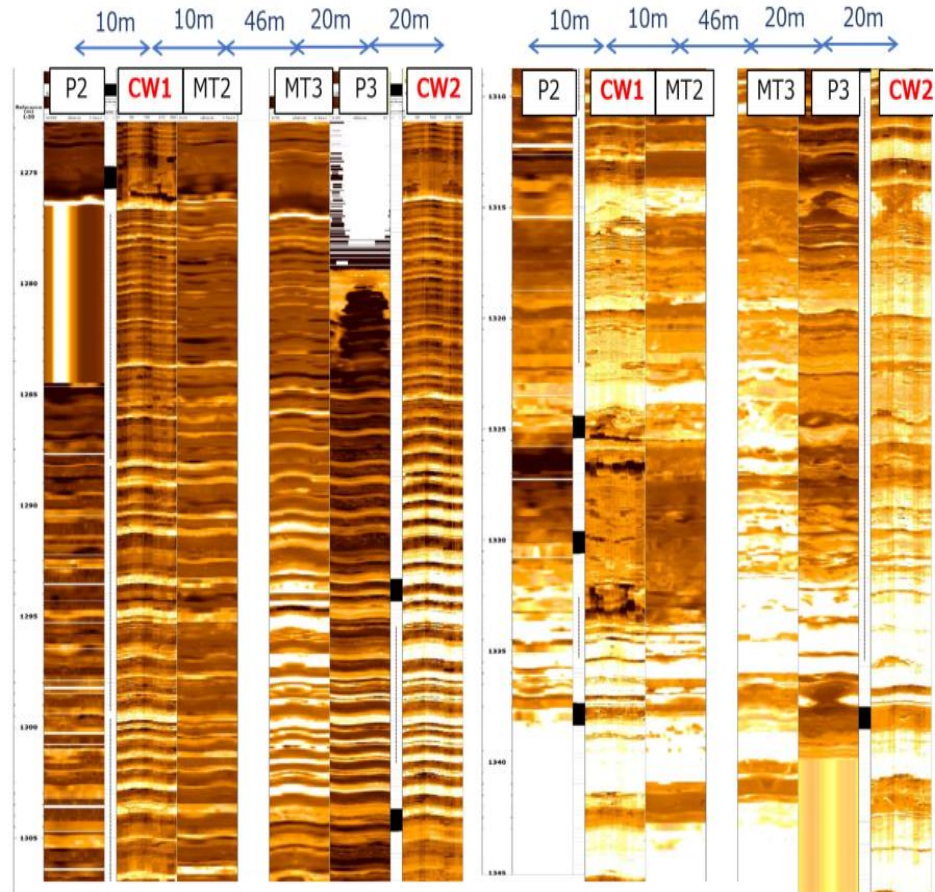
$$V_p \propto S_h \text{ in Unit V}$$

M. Tamaki, et al., *Energies*, 10(10), 1678,
2017; <https://doi.org/10.3390/en10101678>.

地震探査データから見えるハイドレート賦存の不均質性

Unit IV-b, IV-c

Unit V

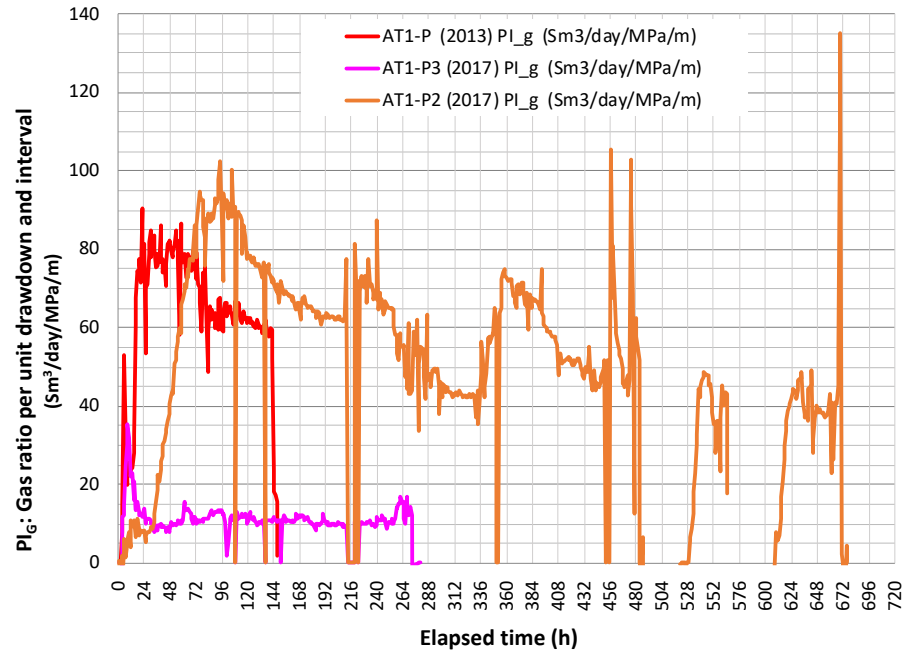


物理検層データから見えるハイドレート賦存の不均質性

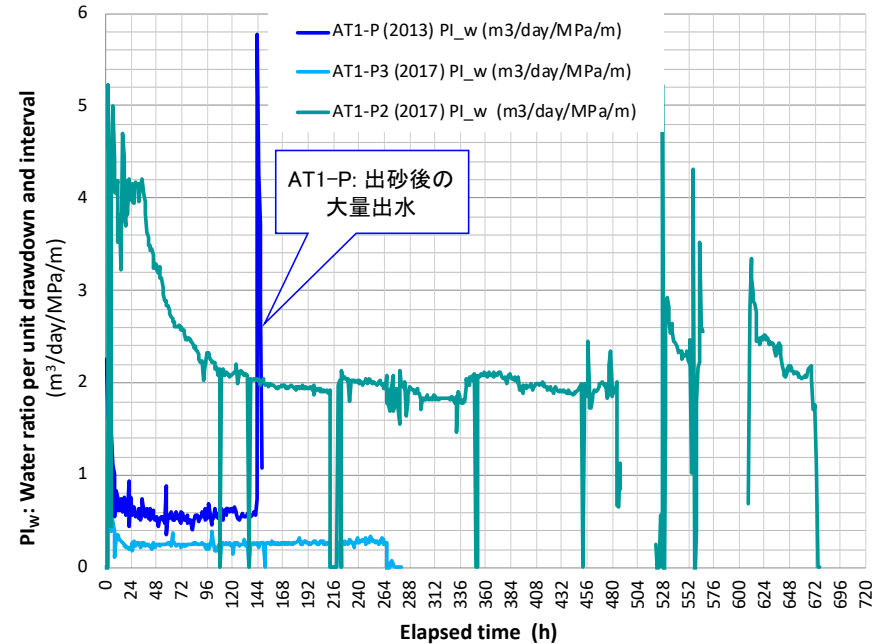
現実の貯留層とその応答

—3つの坑井 (P (2013), P3, P2 (2017))の減圧に対する応答の違い

$Q_g/(\Delta P \Delta z)$



$Q_w/(\Delta P \Delta z)$

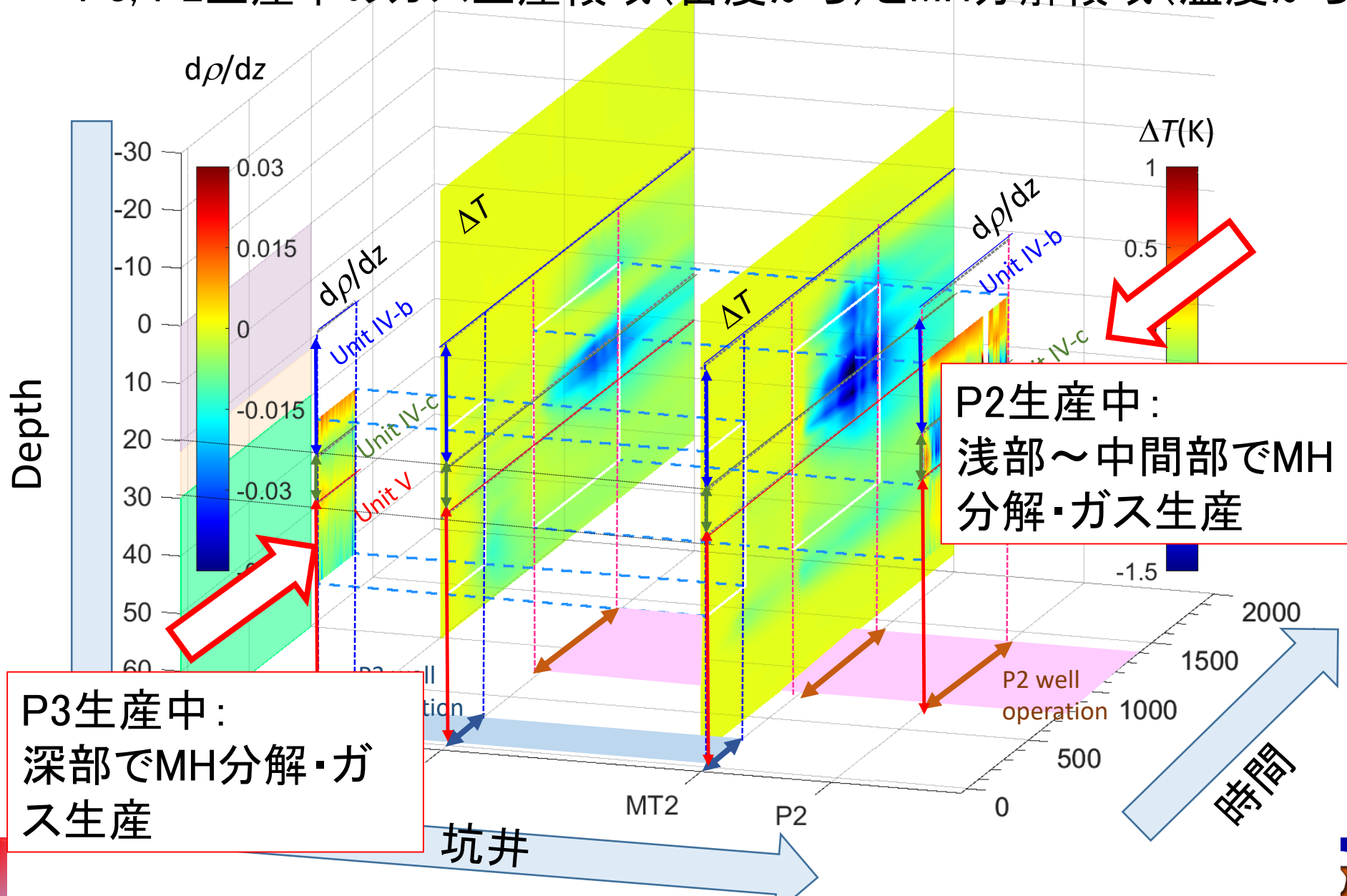


減圧1 MPa, 仕上げ区間1 mあたりのガス・水生産レート。

- ガスに対しては、PとP2は似ている。
- 水に対しては、PとP3は似ている。
- いずれの井戸でも、予想された徐々に増えるという傾向は見られない。
- P 井では出砂後に大量に水が生産された。

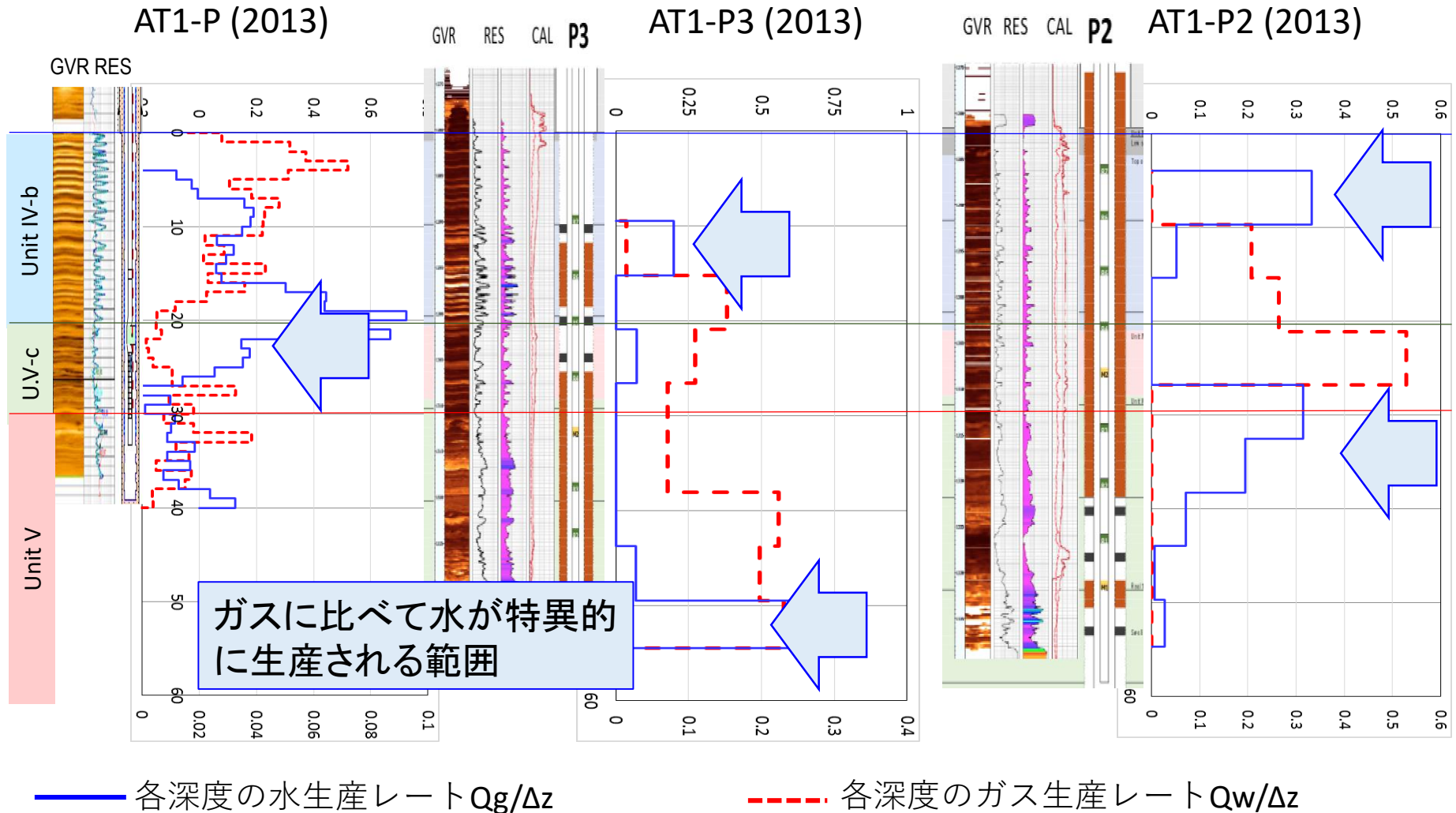
現実の貯留層とその応答

—P3, P2生産中のガス生産領域(密度から)とMH分解領域(温度から)



現実の貯留層とその応答

—P, P3, P2生産中のガス・水生産レート深度分布(密度・温度から)

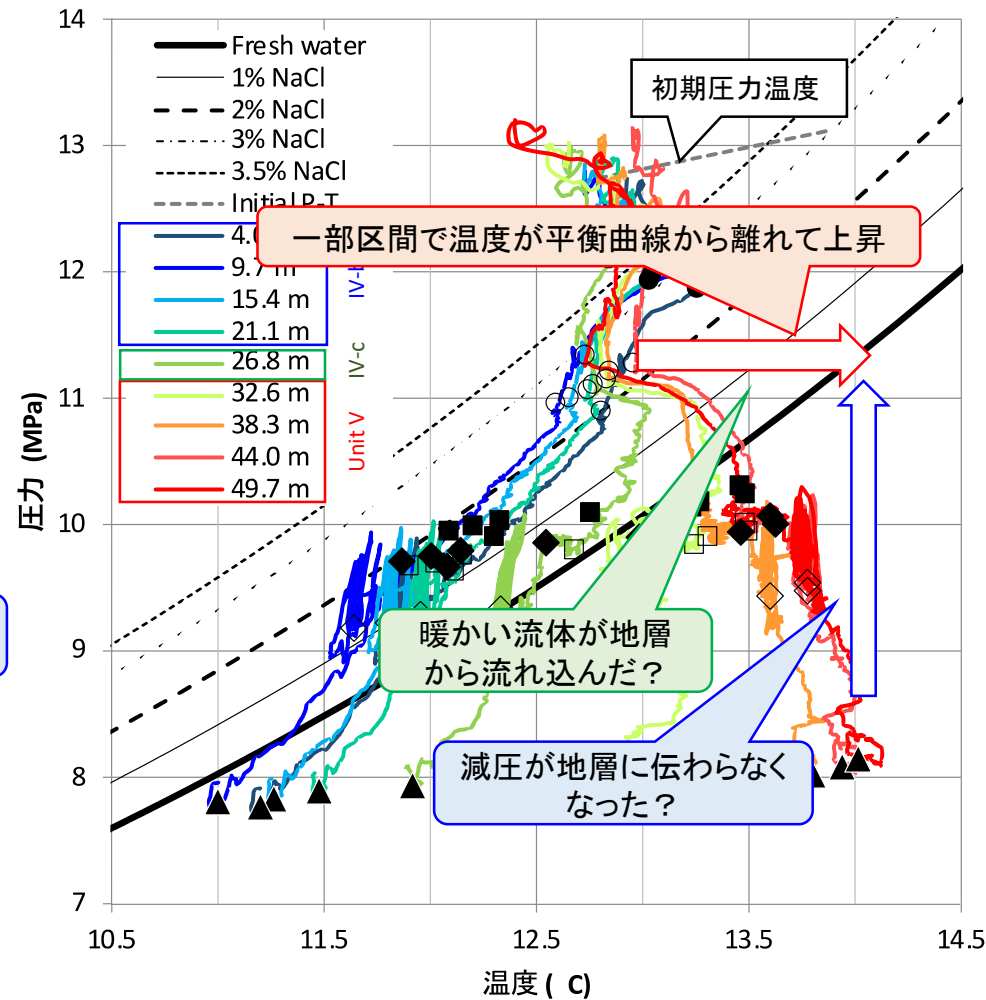
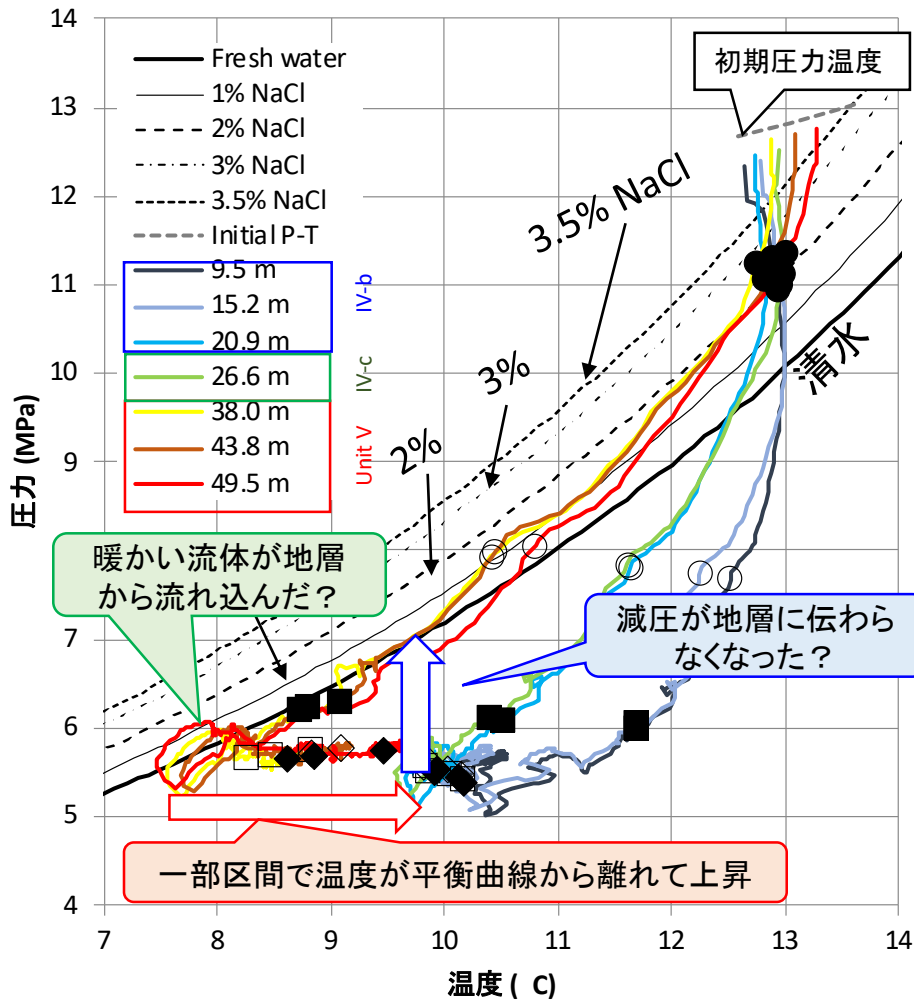


ガスに比べて水が特異的に生産される範囲

現実の貯留層とその応答

—P3, P2生産中の生産井の温度圧力と相平衡曲線

第2回海洋産出試験において、メタンハイドレート分解の際に温度が平衡曲線に沿って変動しない(温度が上昇する)現象を確認した。

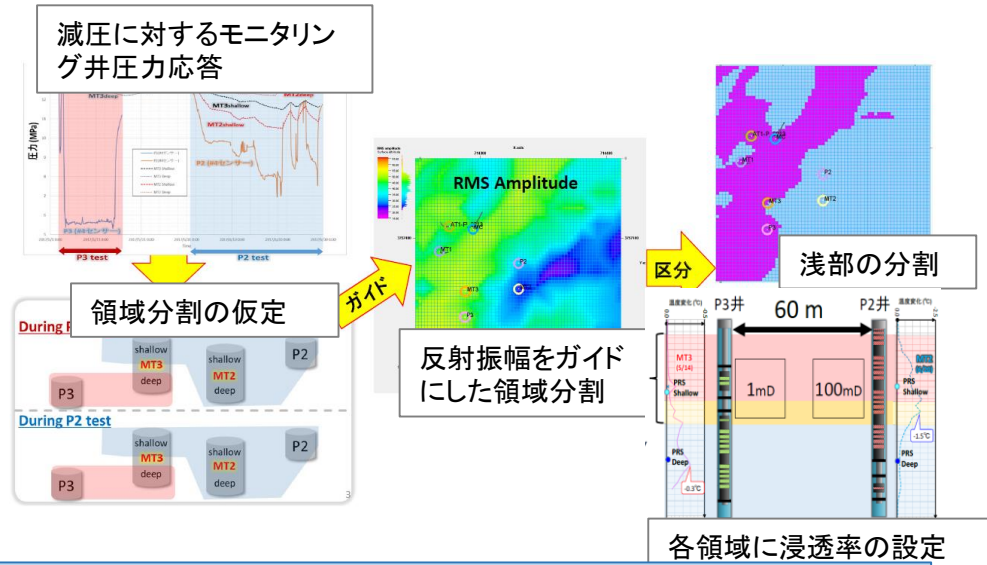


現実の貯留層とその応答

—2つのシナリオを想定

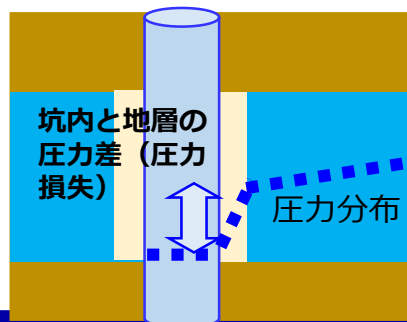
不均質性シナリオ

- モニタリング井の圧力応答と地震探査データから、高浸透率と低浸透率の領域に分割

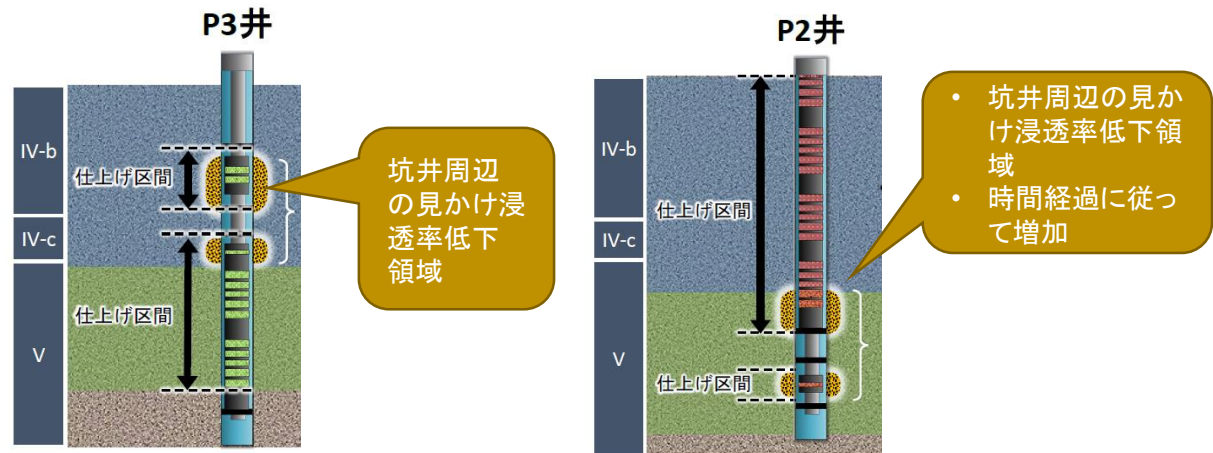


「スキン」シナリオ

- 流動に対する何らかの抵抗によって生じる圧力損失＝スキン
- 坑内を減圧をしても地層側が減圧されなくなる



初期浸透率の異なる2つの領域が存在する



坑井周辺の流動に対する圧力損失(「スキン」)が存在する

現実の貯留層とその応答

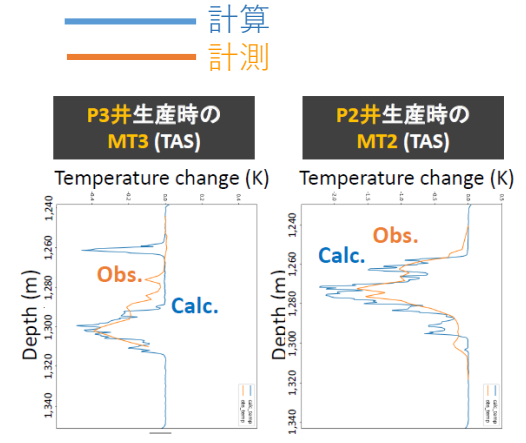
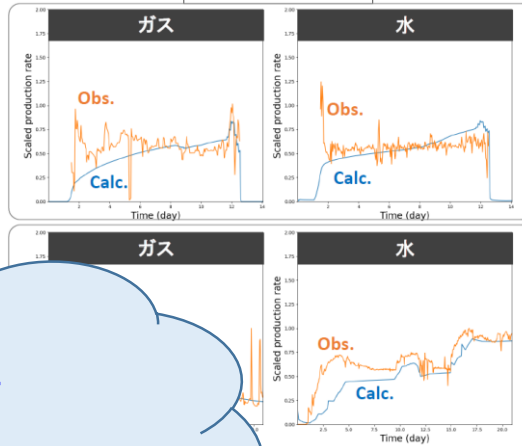
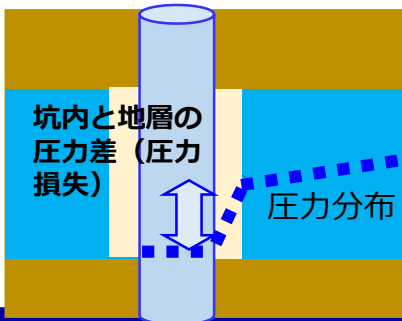
—2つのシナリオを想定：初期浸透率等をマッチングパラメーターとしてヒストリーマッチング

不均質性シナリオ

- モニタリング井の圧力応答と地震探査データから、高温浸透率と低温浸透率の割合

- 両シナリオで一定の整合性
 - 浸透率モデルの現実性
 - 検層評価結果との違いの理由
 - スキンの実態

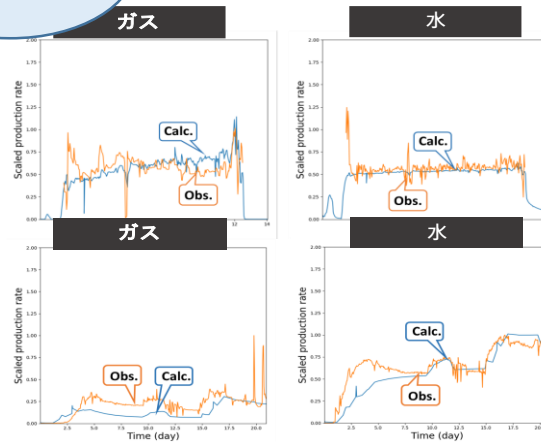
- 加圧によって生じる圧力分布
- 坑内を減圧しても地層側が減圧されなくなる



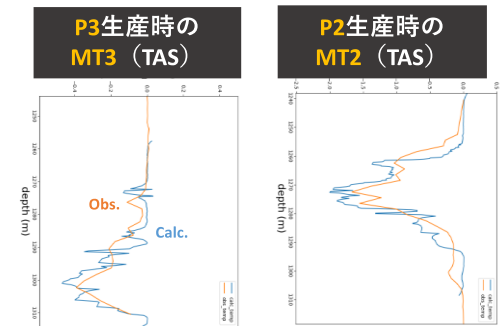
・水生産レート

モニタリング井の温度

浸透率の異なる2つの領域が存在する



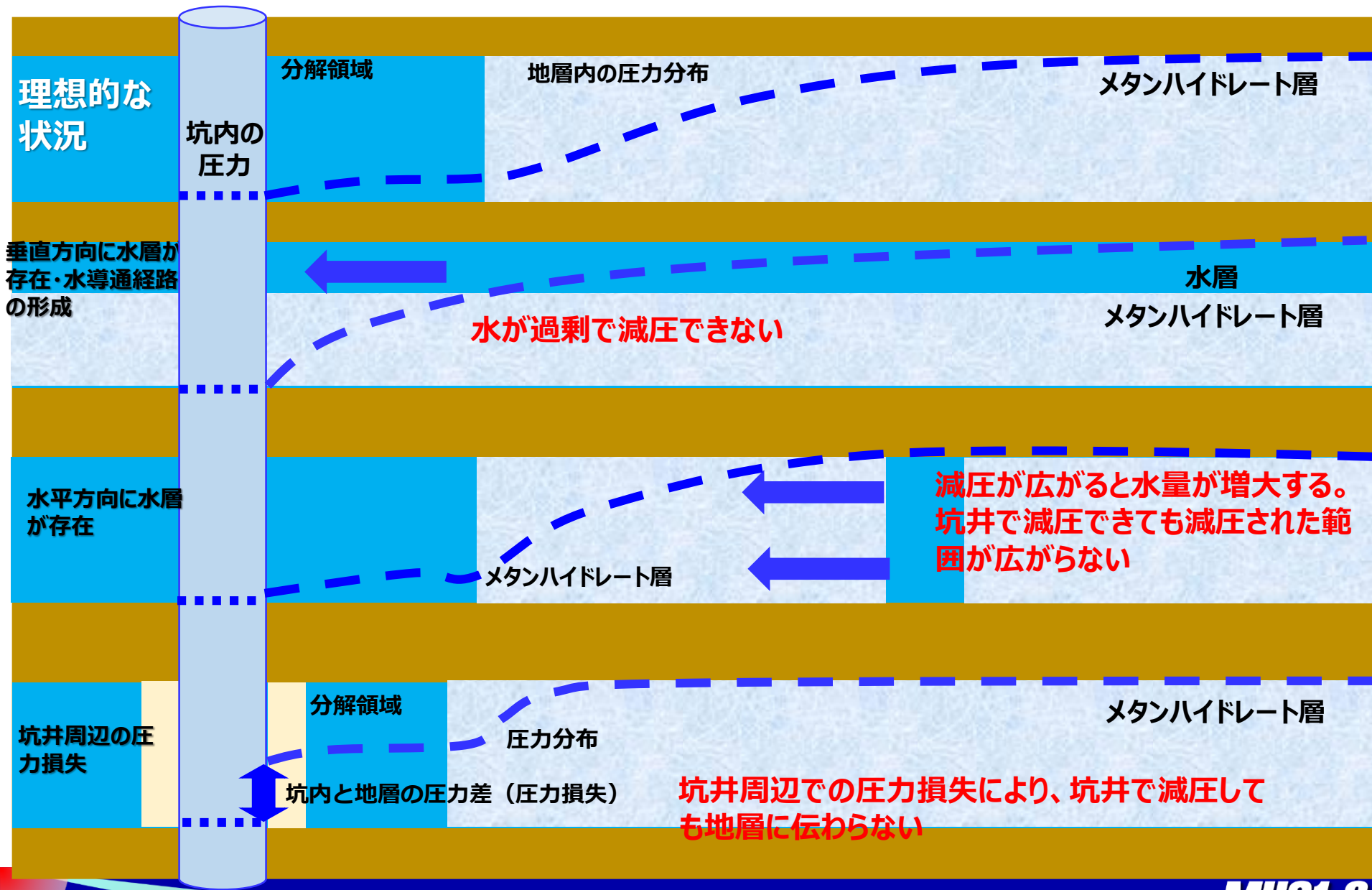
各坑井のガス・水生産レート



モニタリング井の温度

坑井周辺の流動に対する圧力損失(「スキン」)が存在する

モデルと現実、どこが違うか：あり得る状況→解決策



技術課題の解決に向けた今後の取組

要因分析

計測データ

(ガス・水生産レート、生産井・モニタリング井の温度・圧力データ)

貯留層モデルと物理モデルに基づく予測

(モデルの修正によるヒストリーマッチング)

地震探査・検層・地質サンプルデータの総合化による貯留層モデル

事前防止策・事後対策に関する取組

水生産の過剰(不均質性)

帯水層・メタンハイドレート賦存状態の不均質に関する予測・検知

シミュレーションによる帯水層・メタンハイドレート賦存状態不均質の影響の評価

適切な坑井位置・仕上区間・生産システムの選択

遮水技術の適用

坑井周辺の圧力損失(スキン)

適切な出砂対策

坑井刺激技術
(坑井周辺の圧力損失を軽減する障害対策)

新たな技術の取り込み

検討の実例：遮水技術

Brine phase

Oil or gas phase

Small-sized nanoparticle

Large-sized nanoparticle

SiO₂ナノシリカエマルジョン：油・ガスに接触してエマルジョン形成

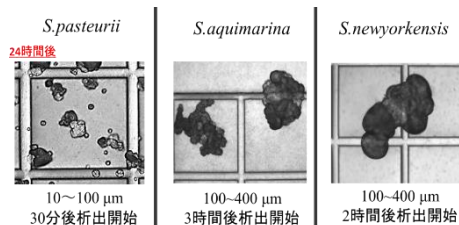
粉末タイプ

ベレットタイプ

主に ポリビニルアルコール系吸水性樹脂 (POVAL)
水圧破碎のdiverting agentなどとしてすでに使われている



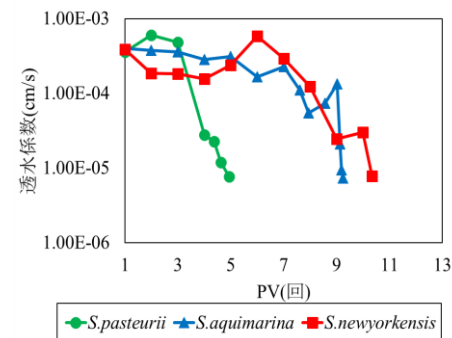
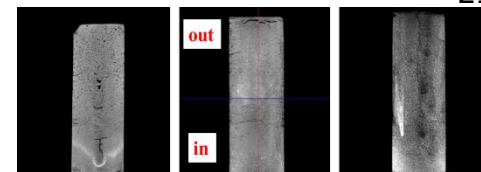
ちきゅう船上でのMICP用微生物採取



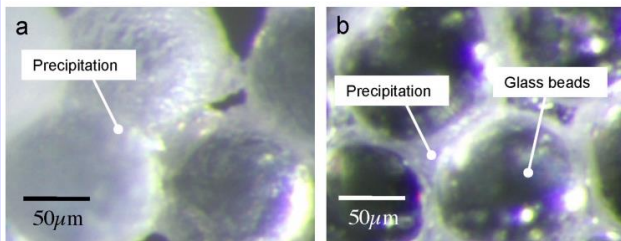
析出したカルサイト結晶 (S. newyorkensisが南海トラフで採取された微生物)

原位置の微生物によるカルサイト析出を用いた出砂対策

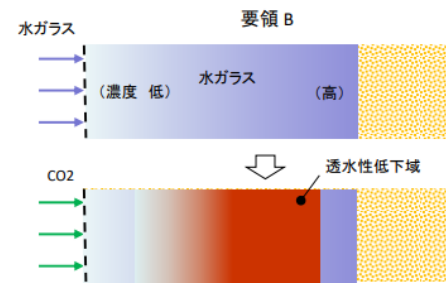
(広島大・畠 東部南海トラフで有用微生物の存在が確認されている)



コアに析出したカルサイトとMICPによる浸透率低下 (S. newyorkensisが南海トラフで採取された微生物)



水ガラスによる地層固化案 (東北大・伊藤)



圧入流体が液体であるため広域の固化が可能な可能性

まとめ

- 地下で何が起こっていたのか、モデルとモニタリングの組み合わせで見えてきた
- 課題を特定して、解決策を模索している
- 地下の状態の複雑さとその可視化は永遠の課題: フェーズ4でも模索を続ける
 - 陸上産出試験では、検層・コアリング、モニタリング、数値シミュレーションを総合的に実施(発表: 沖中・佐藤)
 - 圧力コアの取得(発表: 米田)、坑内地震探査(発表: 藤本)などを実施
 - 温度・圧力に加えて、音響と歪み測定センサーケーブル(DAS, DSS)を設置
 - 出砂対策装置の外側にもセンサーを置く
 - 解決策の実証も模索

本発表は、経済産業省の委託により実施しているメタンハイドレート研究開発事業において得られた成果に基づいています。