

地盤の変形シミュレーション

～地盤力学とメタンハイドレート海洋開発～

木元小百合
工学研究科 社会基盤工学専攻
地盤力学分野

地盤材料の特徴

土(地盤): 地球の地殻の表層をなす、固結～半固結の堆積物・・・岩石、礫、砂、粘土

1. 土粒子および間隙流体(水や空気)からなる混合体
2. 粒状材料(土粒子)
3. 自然界で形成される

固体 or 流体？
連続体 or 離散体？

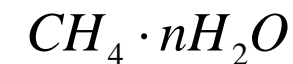


地盤力学の応用

- 社会基盤構造物(インフラストラクチャー)の基礎
道路、鉄道、港湾、ダム、河川堤防、埋立地 etc.
- 自然災害
豪雨、地震
- 地盤環境
地下水汚染、埋立処分 etc.
- 新エネルギー開発
メタンハイドレート、CO₂地中貯留

メタンハイドレートとは

水分子が籠(かご)状の結晶構造を作り, その中にメタンガスを閉じ込めている



- : H原子
- : C原子
- : O原子

水分子が水素結合してつくったかご状構造の中に, ガス分子が入ったものをガスハイドレートという

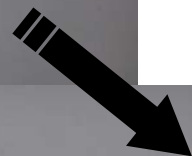
地盤中のハイドレート



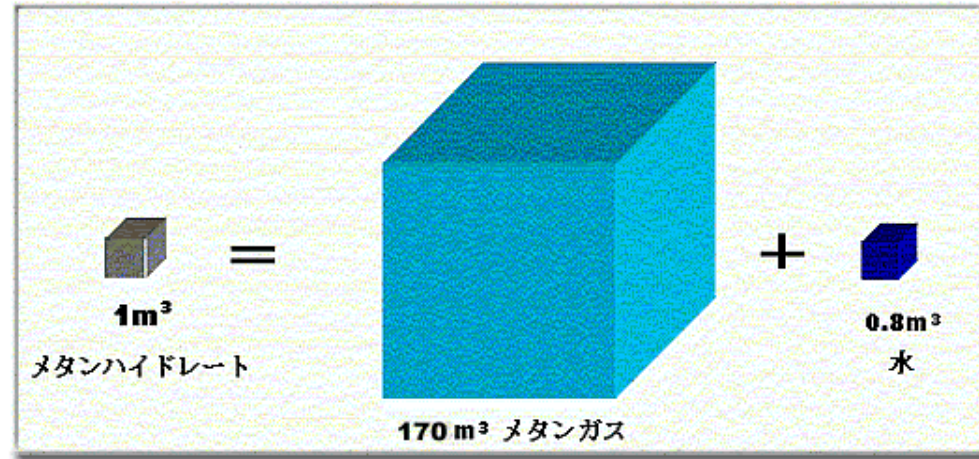
(木元撮影2008.9, バイカル湖)

- ・常温常圧下では自然に分解
- ・触ると冷たい

見た目はドライアイスに近いが・・・

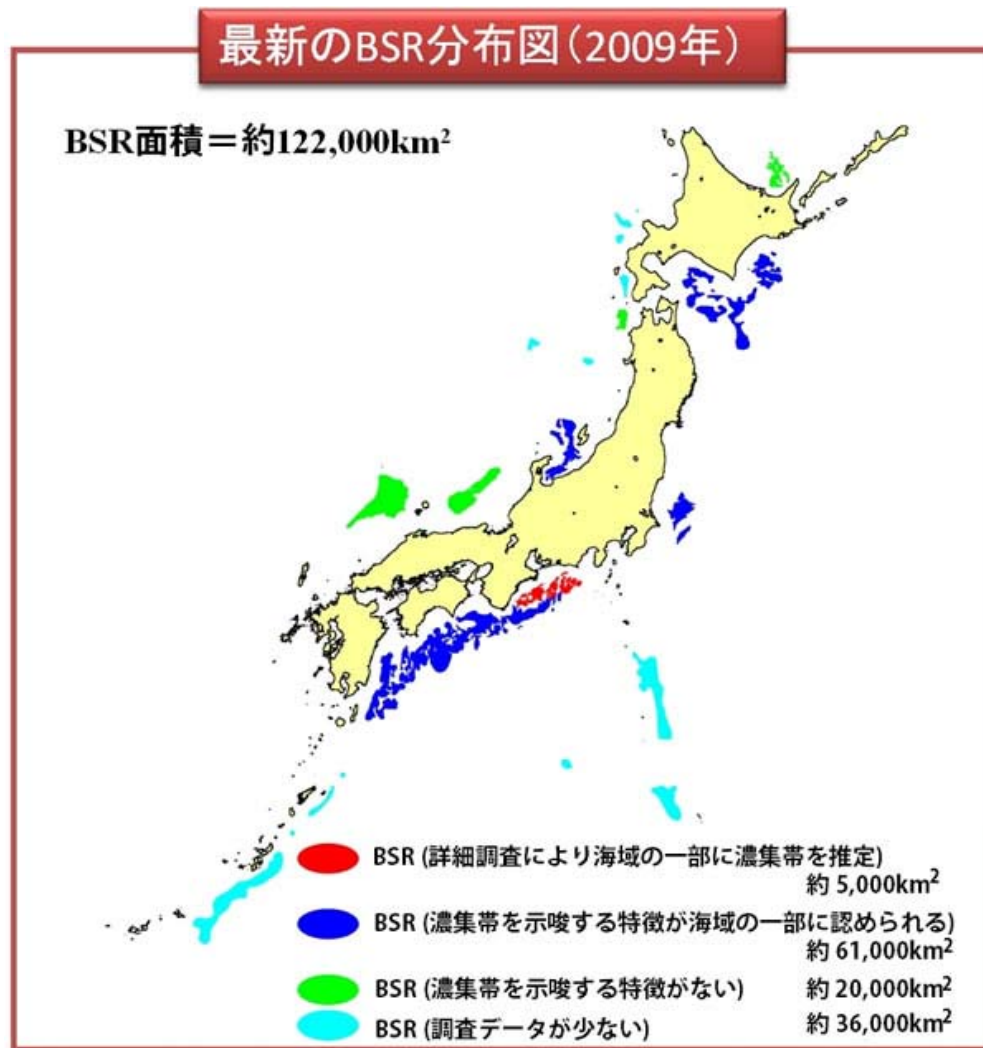


メタンハイドレート中のメタンガスの量は？



1m³のメタンハイドレートが1気圧の下で分解すると約170m³のメタンガスと約0.8m³の水に分解する。逆に言えば、大量のメタンガスをメタンハイドレートにすれば、1/170の体積に縮めることができる。

メタンハイドレートの分布 (1)



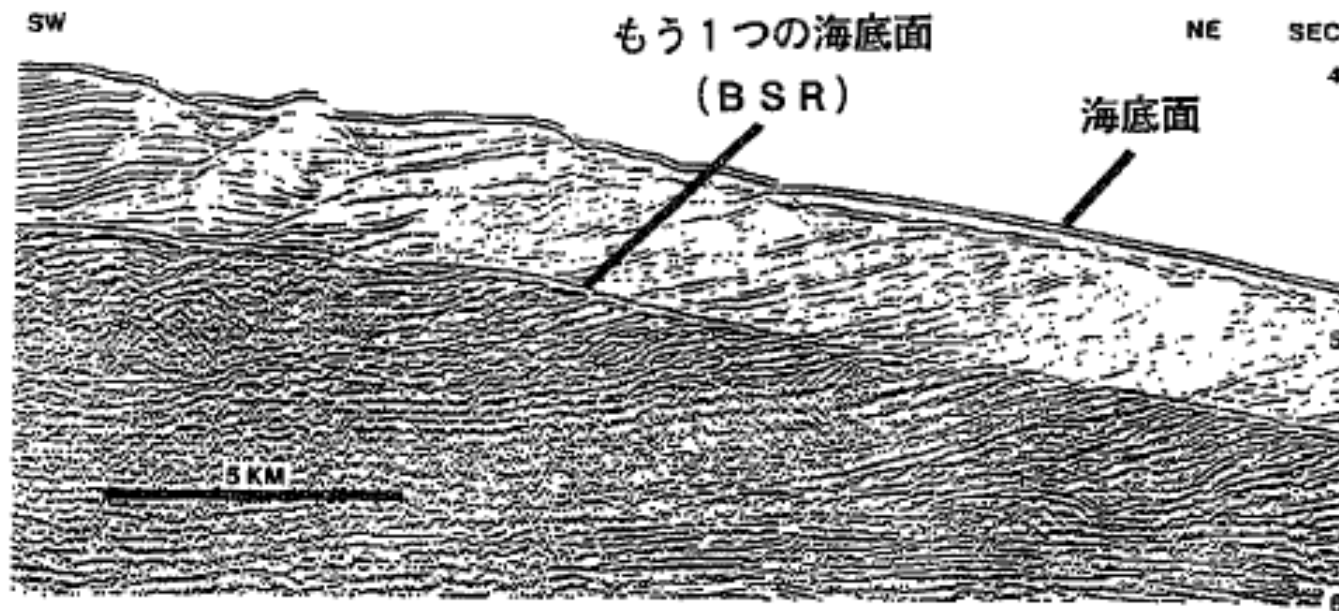
日本周辺海域

- ・地震探査によるBSR
(海底擬似反射面)
- ・深水掘削のコア試料

Copyright © MH21Research Consortium

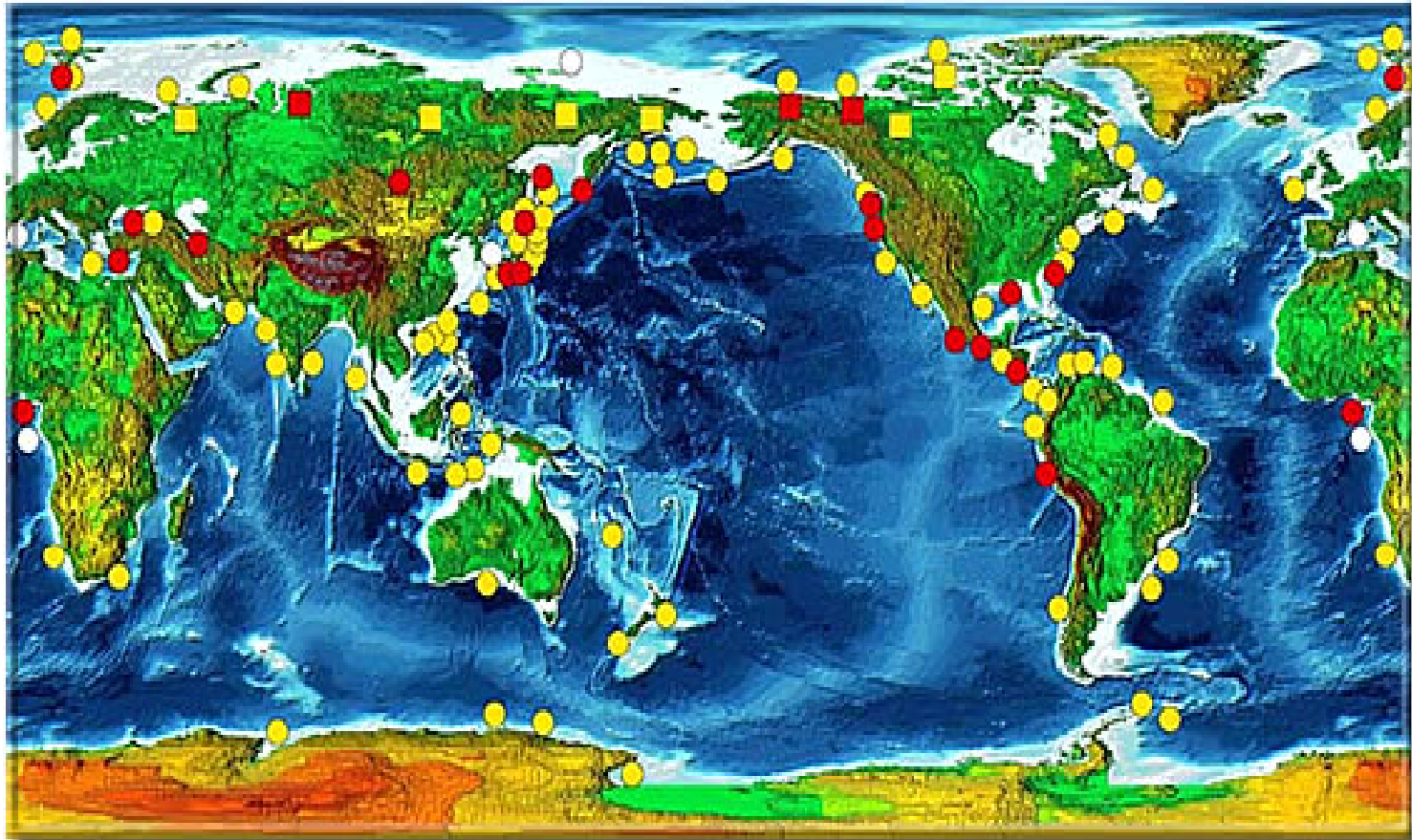
Mh21 research consortium: <http://www.mh21japan.gr.jp/>

地質ニュース510号、1997年2月 もう一つの海底面 BSR 倉本真一



第1図 Shipley et al. (1979)によって示された2重海底面。北東方向に傾斜して見える海底面と、メタンハイドレート層の基底を示しているとされる擬似的な海底面(図中に「もう一つの海底面(BSR)」と表示)が明確に示されている。Shipley et al. (1979)に加筆。

メタンハイドレートの分布(2)



●● Ocean and lakes

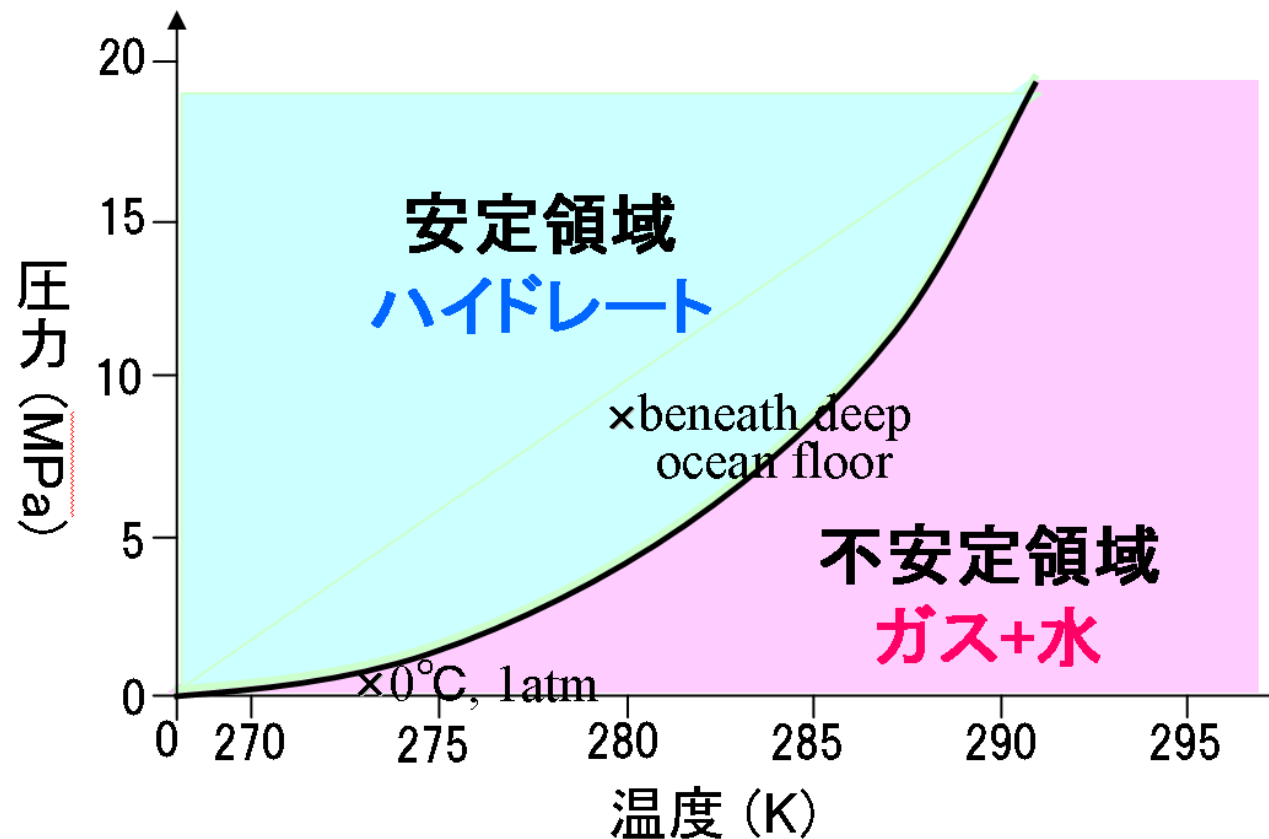
●■ Gas Hydrate Sample

■● Land(Permafrost)

●■ Inferred Gas

Mh21 research consortium: <http://www.mh21japan.gr.jp/>

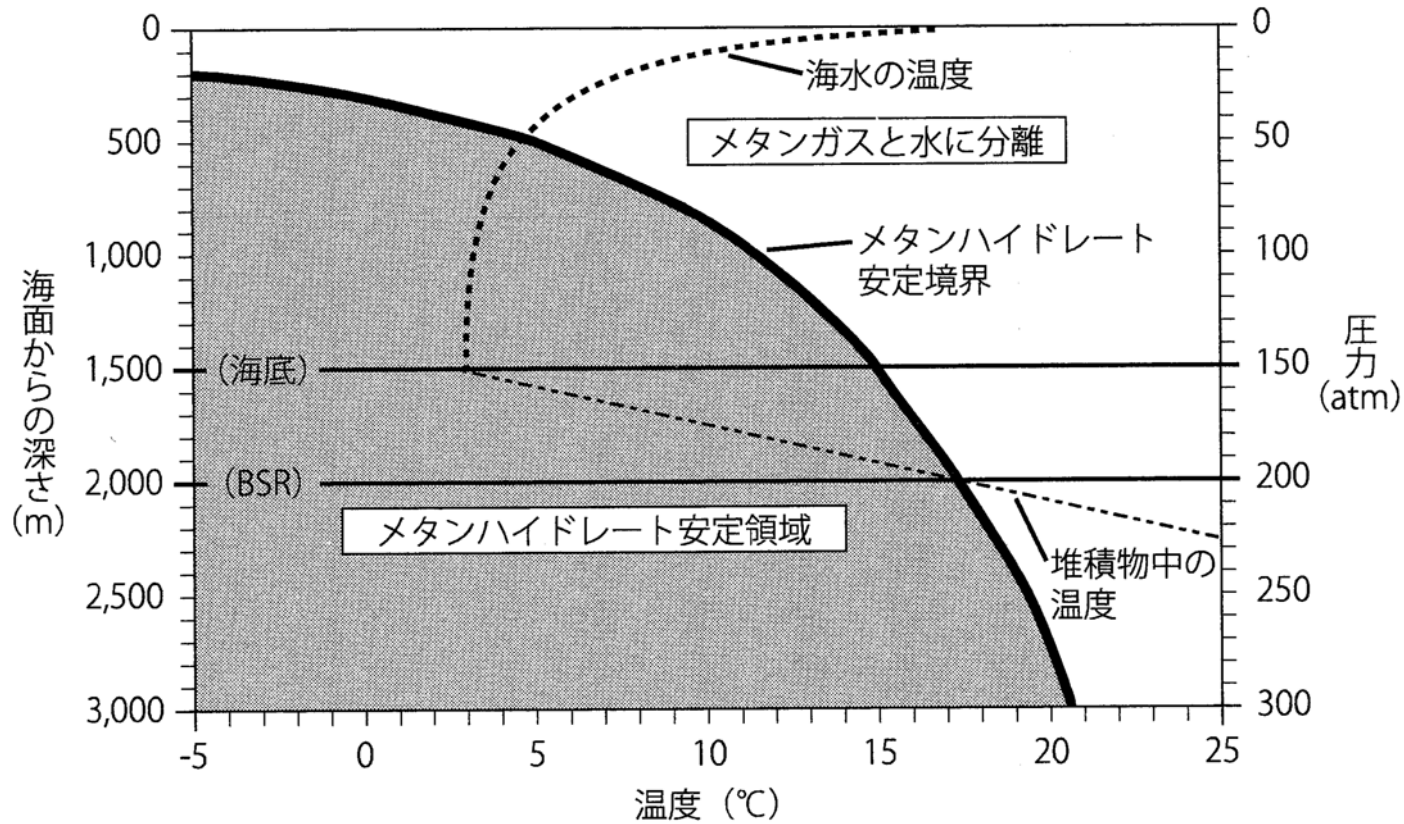
ハイドレート平衡曲線



ハイドレートは低温、高圧の条件下で固体として存在
自然界では、永久凍土下や大水深海底面下

海洋環境での安定領域

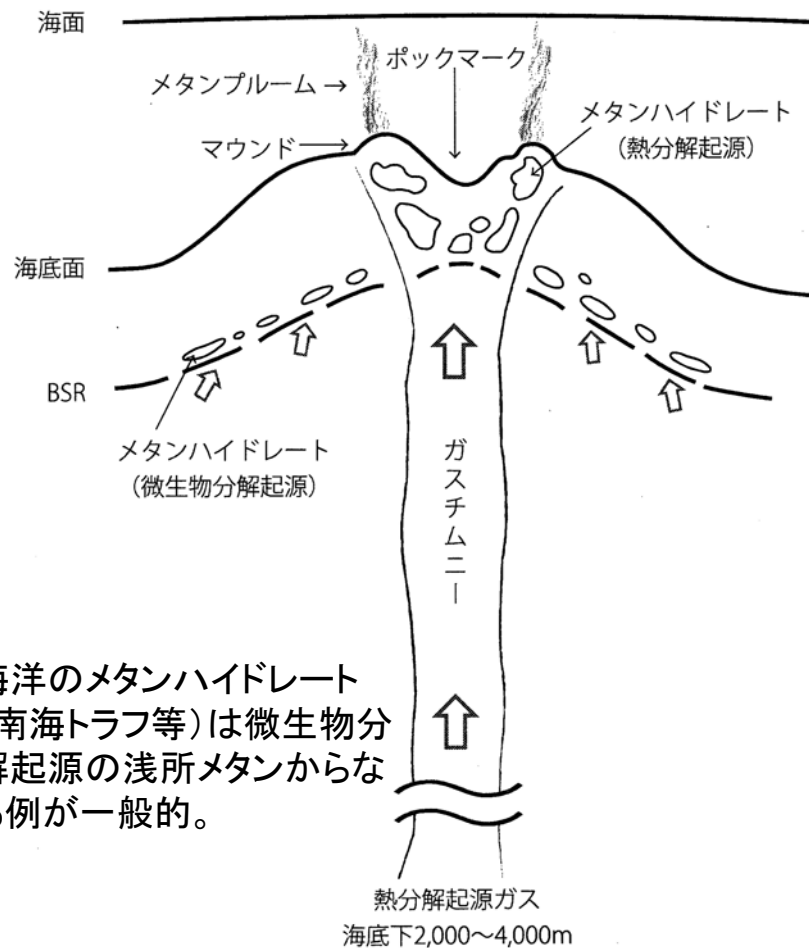
図1 海洋環境でメタンハイドレートが安定的に存在する領域



「エネルギー革命メタンハイドレート」 松本 良(飛鳥新社)

ハイドレートの生成と集積

図2 海洋におけるメタンハイドレートの集積



海洋のメタンハイドレート
(南海トラフ等)は微生物分
解起源の浅所メタンからな
る例が一般的。

動植物の遺骸(有機物)の集積

↓
微生物(メタン生成菌)や熱に
よってメタンガスに分解

↓
適当な温度・圧力条件下で水分
子と結合しハイドレート化

ハイドレートが集積する条件

1. 有機物(動植物の遺骸)→陸地近く
2. 低温高圧
3. スペース

メタンハイドレートの資源量

東部南海トラフ海域のメタンハイドレート濃集帯のメタン量は日本の現在の消費ガス量の約7年分(5,739億m³)

表 5-2 東部南海トラフ海域のメタンハイドレート層のメタンガス原始資源量の算定結果

分類	メタンガス原始資源量 (億m ³)		
	P90	Pmean	P10
メタンハイドレート濃集帯	1,769	5,739	11,148
メタンハイドレート賦存層	1,067	5,676	12,208
合計	2,836	11,415	23,356

P90：この値より大きい量が賦存する確率が90%以上と推定される量

Pmean：この値より大きい量が賦存する確率が50%以上と推定される量、平均値に相当する。

P10：この値より大きい量が賦存する確率が10%以上と推定される量

Mh21 research consortium: フェーズI成果報告(2008)

*) 原始資源量 × 回収率 = 可採埋蔵量

メタンガスの利用



地層中に存在するガスハイドレートを分解させるとメタンガスを主とする炭化水素と水に分離

-メタンガスの利用法-

- 電力
- 都市ガス
- 燃料電池*
- 天然ガス自動車

*燃料電池・・・水の電気分解の逆反応を利用

メタンガスの環境への影響

- メタンガスが燃焼すると地球温暖化の原因となる二酸化炭素を排出するが、放出量は石炭を100とすると石油は80、天然ガスは57と少ない
- 天然ガスを燃焼させても硫黄酸化物(SO_x)がほとんど排出されず、窒素酸化物(NO_x)の排出量も石油や石炭に比べて少ない
- しかし、メタン自身は二酸化炭素の21倍(100年という期間で見た場合)もの強さをもつ地球温暖化物質であり、メタンが大気中に放出されるのは好ましくない。ただし、二酸化炭素が大気中で分解されるまでに50～100年程度かかるのに比べて、メタンは12年程度で分解される。

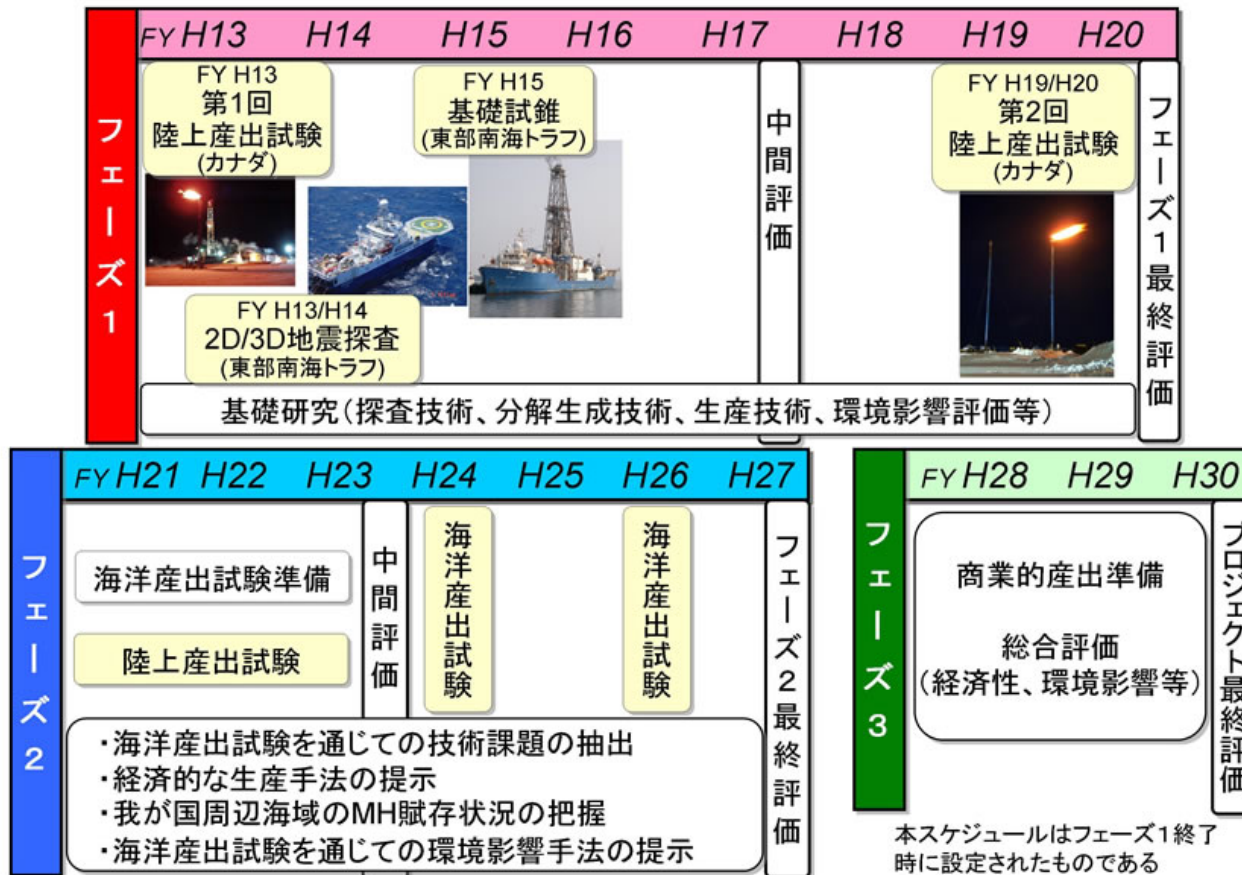
メタンハイドレート研究の歴史

- 1934年 シベリアなど寒冷地域で**天然ガスパイプライン**の閉塞を認識
- 1965年 シベリアでハイドレート層発見 ↳ 寒冷地のやっかいもの
- 1970年 Blake Ridge(フロリダ半島北東)の**BSR**研究(ハイドレート層の下限?)
- 1982年 メキシコ湾でハイドレートを含むコア採取
- 1991年 チリ沖でBSRを意図的に掘りぬいた最初の坑井
- 1999年 **基礎試錘「南海トラフ」**にてハイドレートコア採取
- 2002年 Malik(アラスカ)で**陸上産出試験**(日本,カナダ,アメリカ,ドイツ,インドの共同研究)
- 2004年 **基礎試錘「東海沖一熊野灘」**でハイドレート調査
- 2008年 アラスカにて減圧法による陸上でのハイドレートの**連続産出に成功**
- 2011年度 南海トラフの海洋産出試験候補地にて掘削開始(予定)
- 2021年度 **世界初の海洋産出試験(予定)**

メタンハイドレート開発計画

メタンハイドレート資源開発コンソーシアム(MH21)

我が国におけるメタンハイドレート開発計画



Copyright © MH21Research Consortium

2012年度
海洋産出試験

2018年(H30)
商業化?

日本経済新聞

夕刊
4月8日
(火曜日)

発行所 日本経済新聞社
東京本社 〒100-8001(03)5561-4000
東京都千代田区大手町1-9-5
大阪本社 〒540-8588(06)6943-7111
大阪府中央区大手町1-1-1
名古屋本社 〒460-8569(052)6-3311
名古屋市中区栄4-16-33
札幌支社 〒060-8555(011)241-3300
福岡支社 〒815-8530(092)242-1611

ICチップで
ユニフォームを
個体管理

ユニフォームにICチップを埋入
自動検出システム



WEX
新日本ウエックス(株)
登録ISO14001 品質ISO9001
保証取得

☎0120-1-181
http://www.wex.co.jp/

◇布石
自分で自分を裁く外に判断
した、といふ珍しいサイン
で藤田真澄投手が巨人入団
したのは一昨秋だった。こ
れぞプロ、という通説の鮮や
かさで、次の目標に挑んだ。

波音
大リーグ。この時を得て、明
若いから外国人選手と話しな
し、英語を勉強してきた。二
球先、三球先を眺め配球した
てきた投手は人生の布石を打
つのもついで。
一勝の夢かならず引退を告
げ、降板

世界初の連続産出

石油天然ガス 構 2018年商業化めざす

次世代燃料「メタンハイドレート」

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（OGMC）は次世代エネルギーと期待されるメタンハイドレートを海中から連続して産出する実験に世界で初めて成功した。急激な原油高や将来のエネルギー不足を懸念、中国など世界各国がメタンハイドレートの早期の商業生産を競っている。日本は最大の産地である採掘技術の開発を先行し、2018年ごろの商業化を目指す。「資源小国」である日本にとってエネルギー自給率の向上につながる可能性が出てきた。

メタンハイドレートの埋蔵が推定・確認されている海域



メタンハイドレートはの海底に天然ガス十四年間の使用量の約百年分に相当する。推定七、四兆立方メートルの世界最大埋蔵量の圧力を下げることで固体し、商業生産を視野に〇年後をめどに商業生産の重きを定める。法律専門家が刑事裁判に加

メタンハイドレートは、水とメタンガスが凍りついてできる氷状の固体で、地下に埋蔵されている。埋蔵量は推定七、四兆立方メートルと推定される。メタンハイドレートを採掘する際には、天然ガスを抽出し、水と分離させる必要がある。OGMCは北極圏に位置するカナダ北西部の永久凍土帯にメタンハイドレートの埋蔵量を推定し、採掘実験を行っている。OGMCは、メタンハイドレートを採掘するための技術を開発し、2018年ごろに商業生産を開始する計画を立てている。

来年5月21日施行

裁判員制度 初公判 7月下旬にも

法務省は8日、市民が来年5月21日（土）午前10時、東京地裁で初公判に参加する。裁判員制度の施行期日。人々を驚かすほどの埋蔵量。OGMCは、メタンハイドレートを採掘するための技術を開発し、2018年ごろに商業生産を開始する計画を立てている。

裁判員制度の施行期日

2008年4月8日

世界各国の取り組み

〈アメリカ〉

エネルギー省(DOE)は、2006年に「An Interagency Road map for Methane Hydrate Research and Development」を公表し、DOEを中心とした政府・産業界からなる研究体制のもと研究を実施。アラスカの陸域においては、2007年に調査井を掘削。また、2009年にメキシコ湾にて砂層孔隙充填型メタンハイドレートを検層で確認。

〈インド〉

石油天然ガス省は、1997年に「Natural Gas Hydrate Program」を公表。2006年には、インド沖合で、39坑のメタンハイドレート調査井の掘削を実施し、メタンハイドレートを確認。

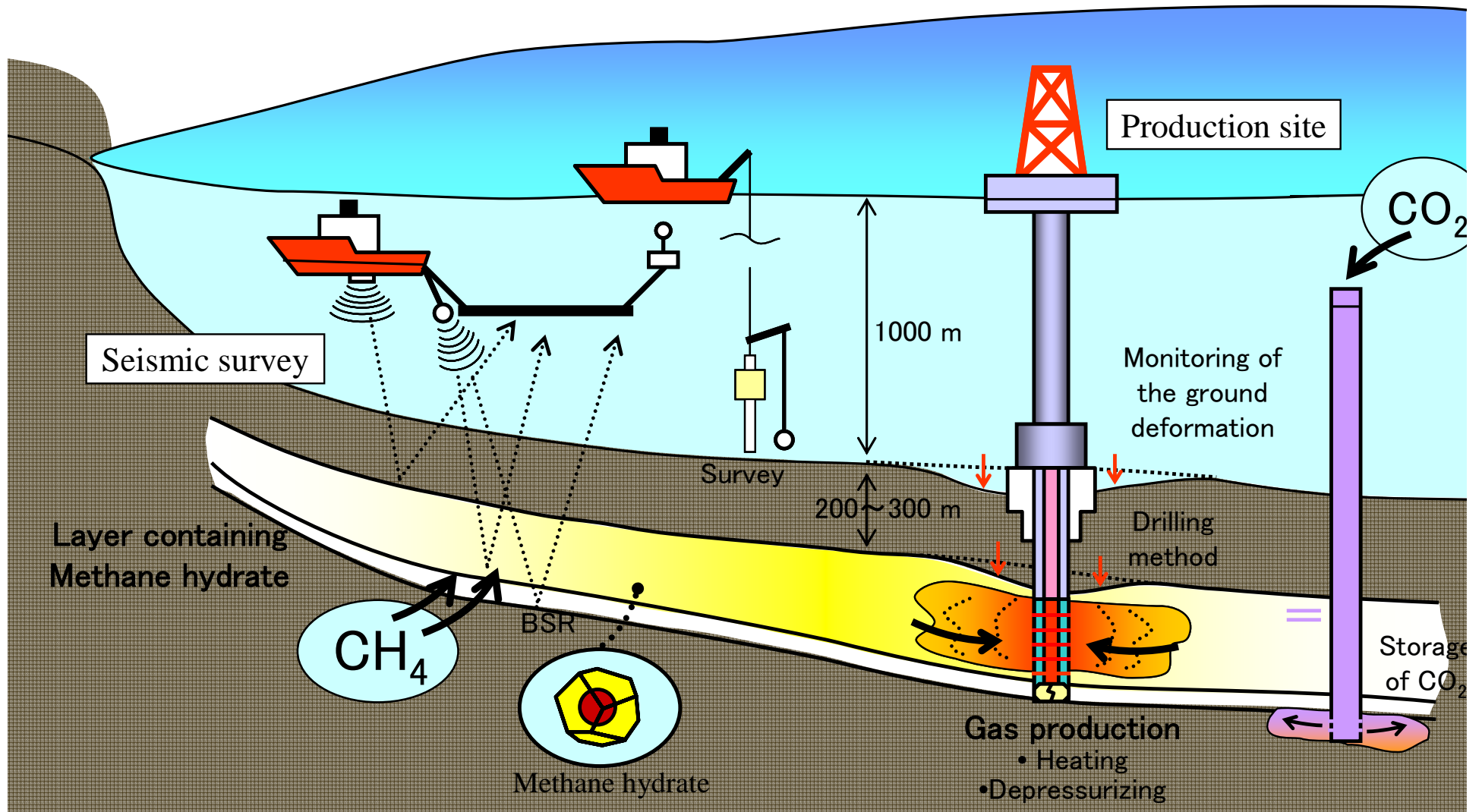
〈韓国〉

2005年The Gas Hydrate Development Projectに基づきGas Hydrate R&D Organization を設立。2007年、日本海でメタンハイドレートを発見。

〈中国〉

2001年および2006年の「5カ年計画」にてメタンハイドレート調査の実施が含まれる。2007年、南シナ海北部でメタンハイドレートを発見。2009年、南シナ海のメタンハイドレート研究を「973計画」(「国家重点基礎研究発展計画」)に組み込む。

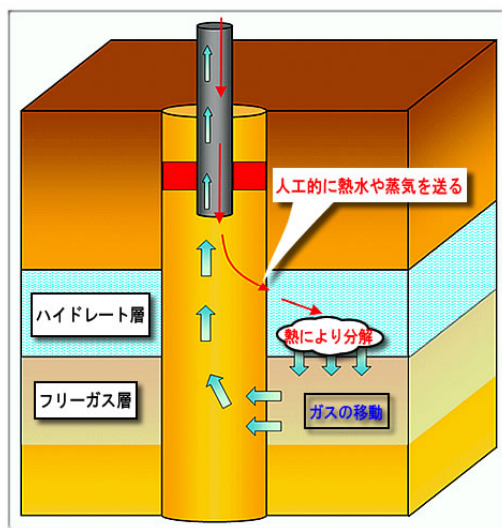
海洋におけるメタンハイドレート開発



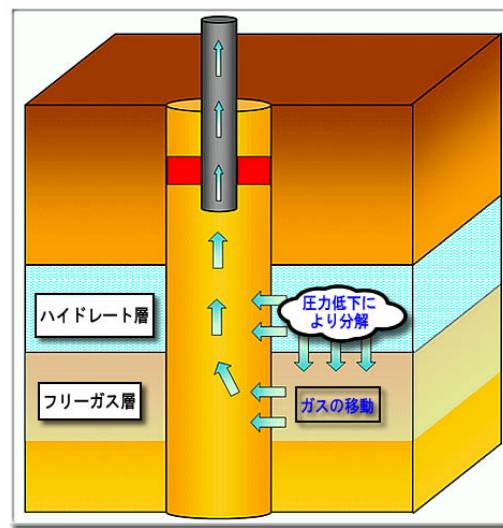
生産手法

メタンハイドレートは**固体**なので、**石油・天然ガス**などの**流体**と違って**自噴**はしない。ハイドレート中のメタンガスを取り出すには、メタンハイドレートを**なんらかの方法**を用いて**地層中で分解**させ、**流体**であるメタンガスに変換する必要がある。

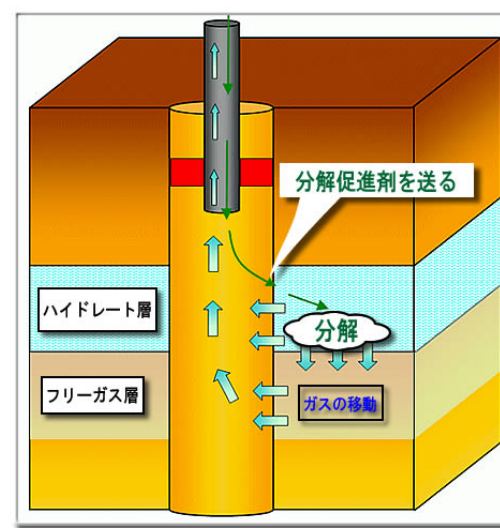
熱刺激法



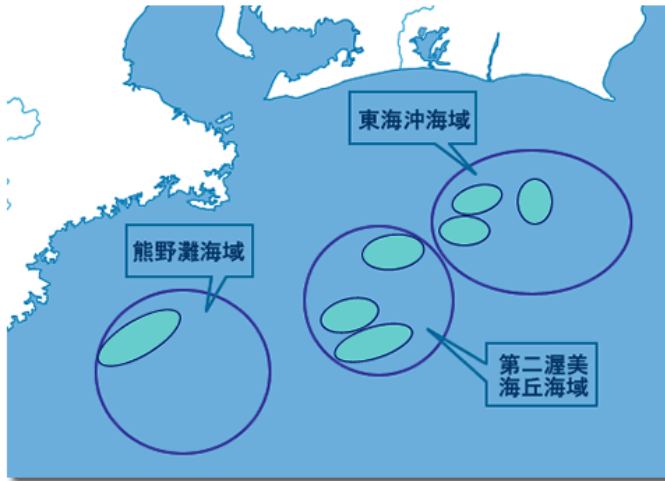
減圧法



分解促進剤注入法



南海トラフのハイドレート層



石油・天然ガスとは違い、海底面下200～400メートルの軟らかい堆積物(砂・シルト)中に存在

南海トラフでは砂泥互層内の砂層中に存在



バイカル湖のハイドレート



(木元撮影2008.9)

- Malenky

Blake Ridge

Shrimp crawling
over a gas hydrate
outcropping on the
Blake Ridge



NOAA: The Deep East Expedition - Blake Ridge
Photos from NOAA Alvin dive
www.netl.doe.gov

© NERC All rights reserved

メタンを食べる微生物マットにカニや海老が集まる？

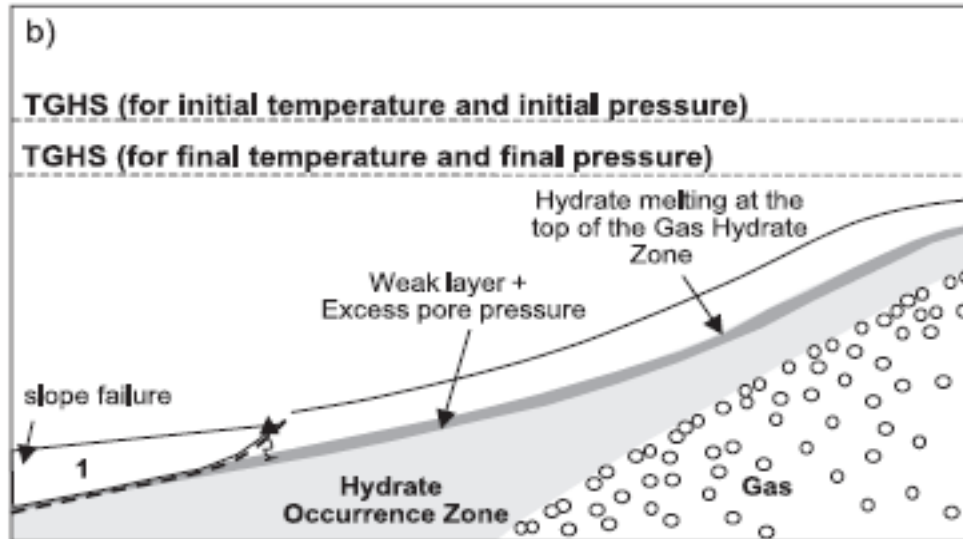
ハイドレート分解時の地盤の不安定化

- ・軟らかい堆積物(砂・シルト)
- ・分解するとハイドレートによる固結を失う
- ・分解時にガスが発生し間隙が高圧になる可能性
- ・不飽和状態
- ・熱の移動を伴う反応
- ・局所的に変形

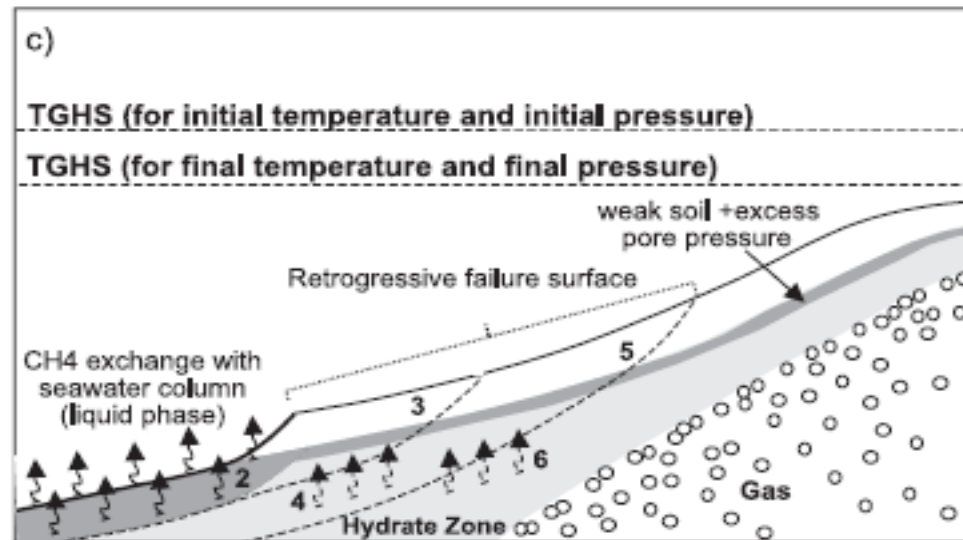
MH分解による地盤環境への影響

- ⇒地盤沈下・地すべり
- ⇒メタンガス漏洩により温暖化加速
- ⇒海洋の生態系への影響

海底地すべり



Effect of gas hydrates melting on seafloor slope instability
N. Sultan, P. Cochonata, J.-P. Fouchera, J. Mie
Marine Geology
213 (2004) 379– 40 1

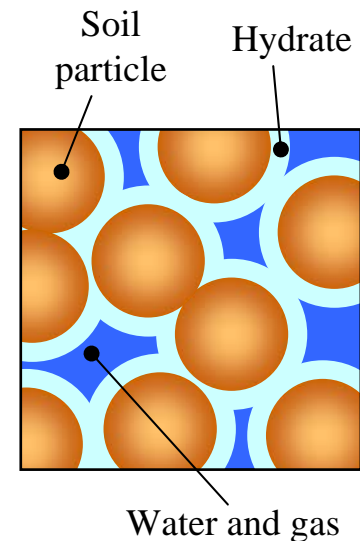


ストレッガの地すべり
(ノルウェー沖)

研究の目的

- ・海洋メタンハイドレートは海底面下 200～300 m の未固結地盤中(砂, シルト質, 粘土からなる互層)に存在
- ・ガス生産時には加熱法あるいは減圧法により, 地盤中で固体から流体に分解

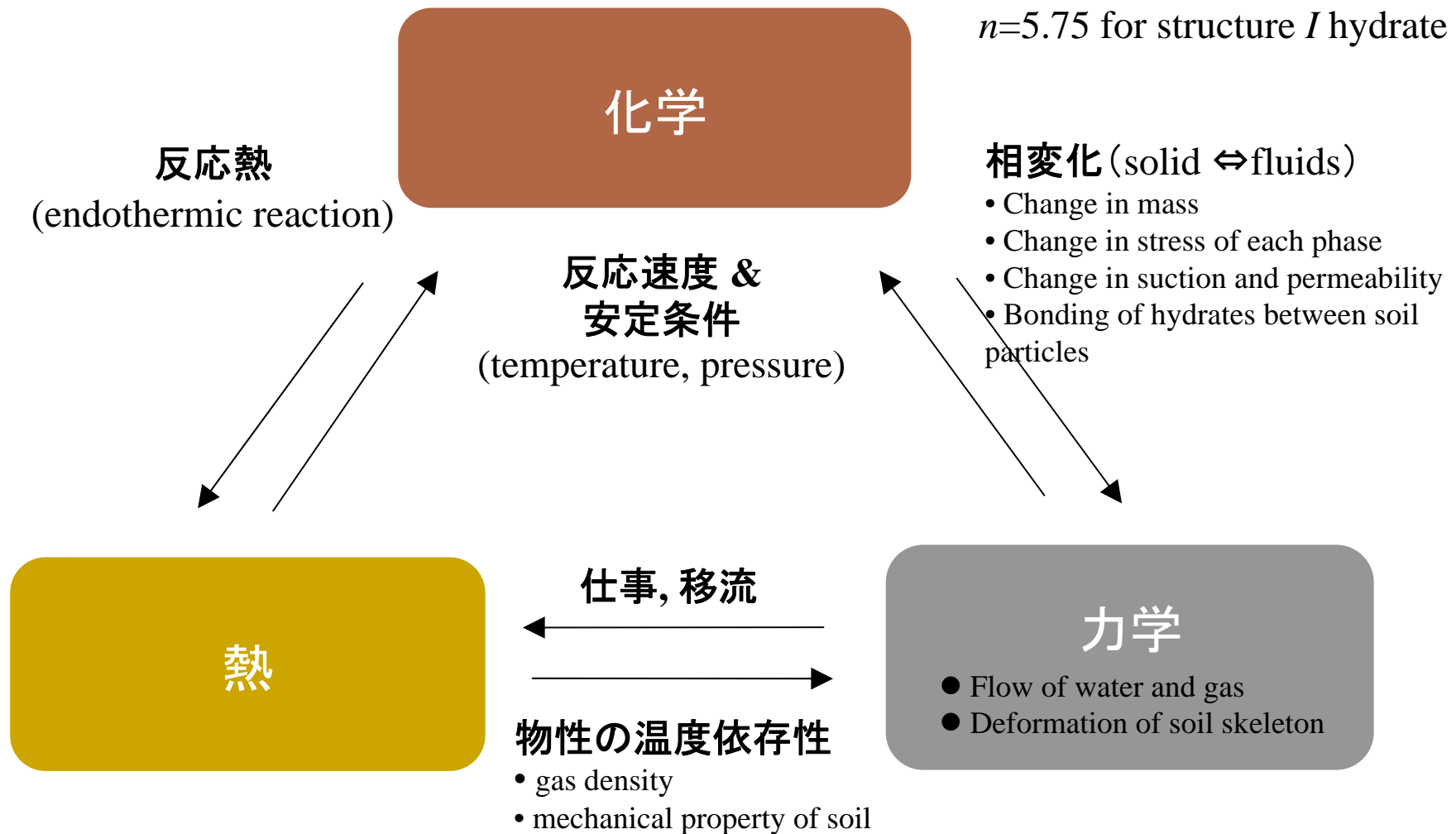
■ガス生産時の海底地盤変形を予測



化学-熱-力学連成挙動



$n=5.75$ for structure I hydrate



ハイドレート分解現象の支配方程式

・場の方程式

・固相の質量保存則

・液相の質量保存則

・気相の質量保存則

・運動量保存則

・エネルギー保存則

・構成式(材料の応力-ひずみ関係式)

土骨格の構成式

サクション-飽和度関係式

化学反応式



偏微分方程式の数値解法

支配方程式となる偏微分方程式
(つりあい式、質量保存式など)
+境界条件, 初期条件
を数値的(近似的)に解く

代表的なものとして,

- ・差分法(領域に格子を配置, 微分を差分で近似)
- ・有限要素法(領域を要素に分割, 要素上で近似関数)
- ・境界要素法(解析対象の境界を要素分割)

↓
FEM:解析領域を三角形や四角形要素に分割、各要素で解を多項式で近似。
支配方程式の弱形式を解く。

モデル化における仮定

0. 地盤を多相混合体(多種の連続体の重ね合わせ)とする
 1. 土粒子と水は非圧縮である
 2. メタンガスは理想気体として扱い, 水への溶解は無視する
 3. ガスと水の流れは独立であり, それぞれダルシー則に従う
 4. 土骨格とハイドレートは一体となって運動する
 5. 運動力保存則において加速度項は無視する

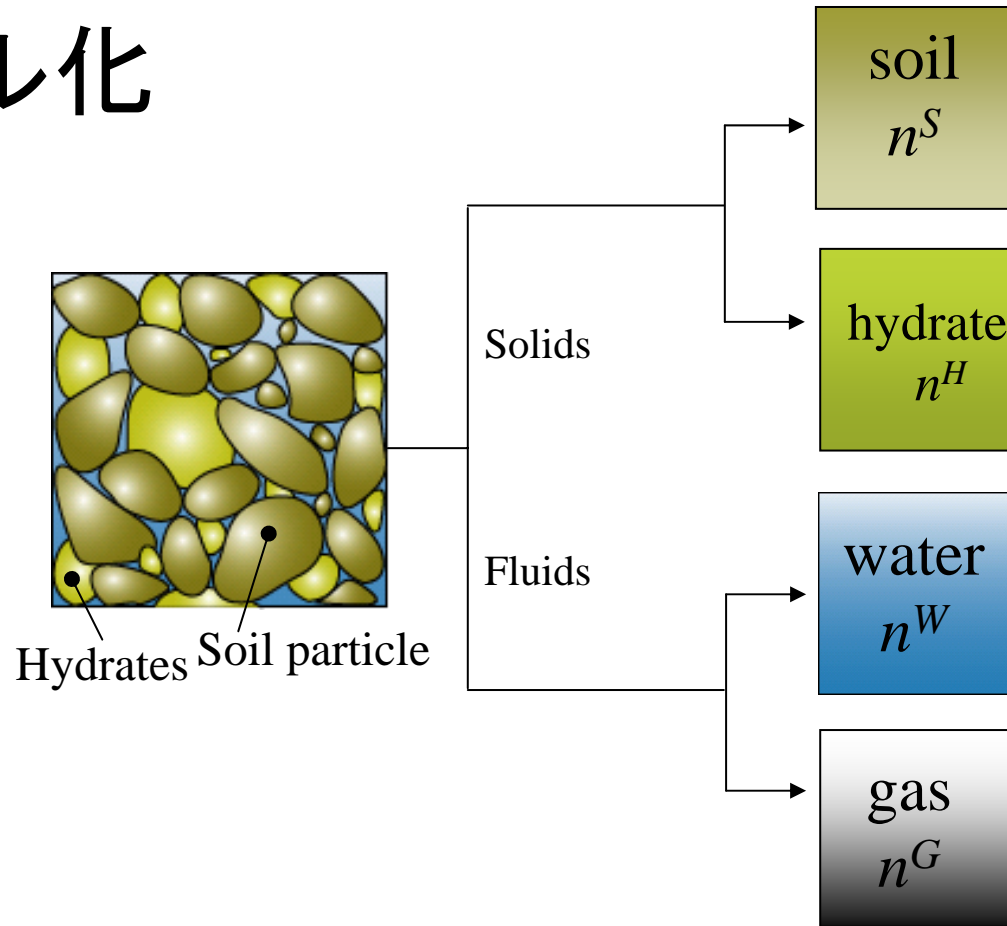
地盤のモデル化

$$n^\alpha = \frac{V^\alpha}{V}$$

($\alpha = S, W, G, H$)

Volume ratio of each phase

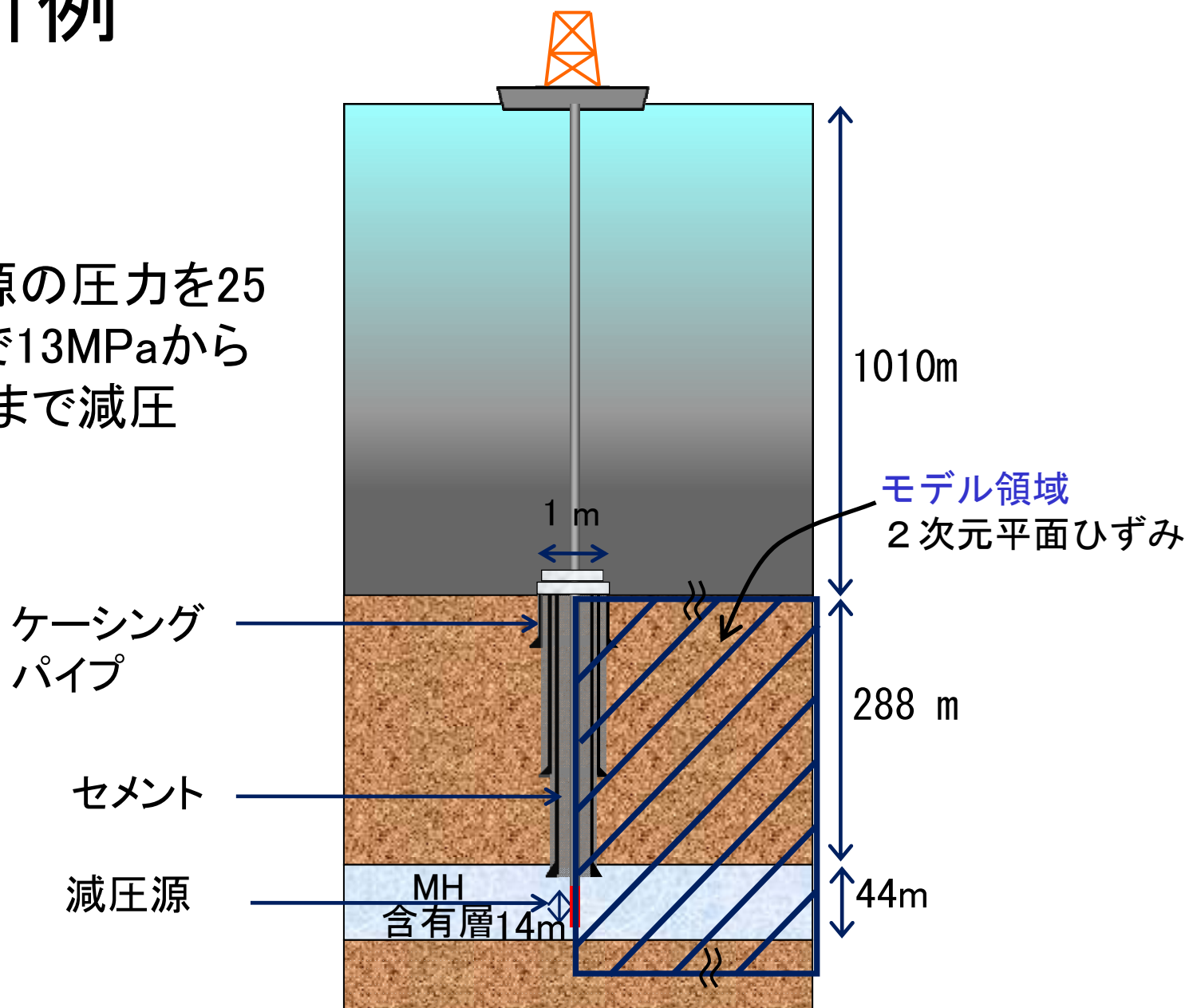
$$\sum_{\alpha} n^\alpha = 1$$



Phase		Compressibility of material	Deformation / Flow
土骨格	S } SH H }	ハイドレート&土粒子：非圧縮 土骨格：圧縮性	弾粘塑性モデル
ハイドレート			
水	W	非圧縮	ダルシー則
ガス	G	圧縮性：理想気体	ダルシー則

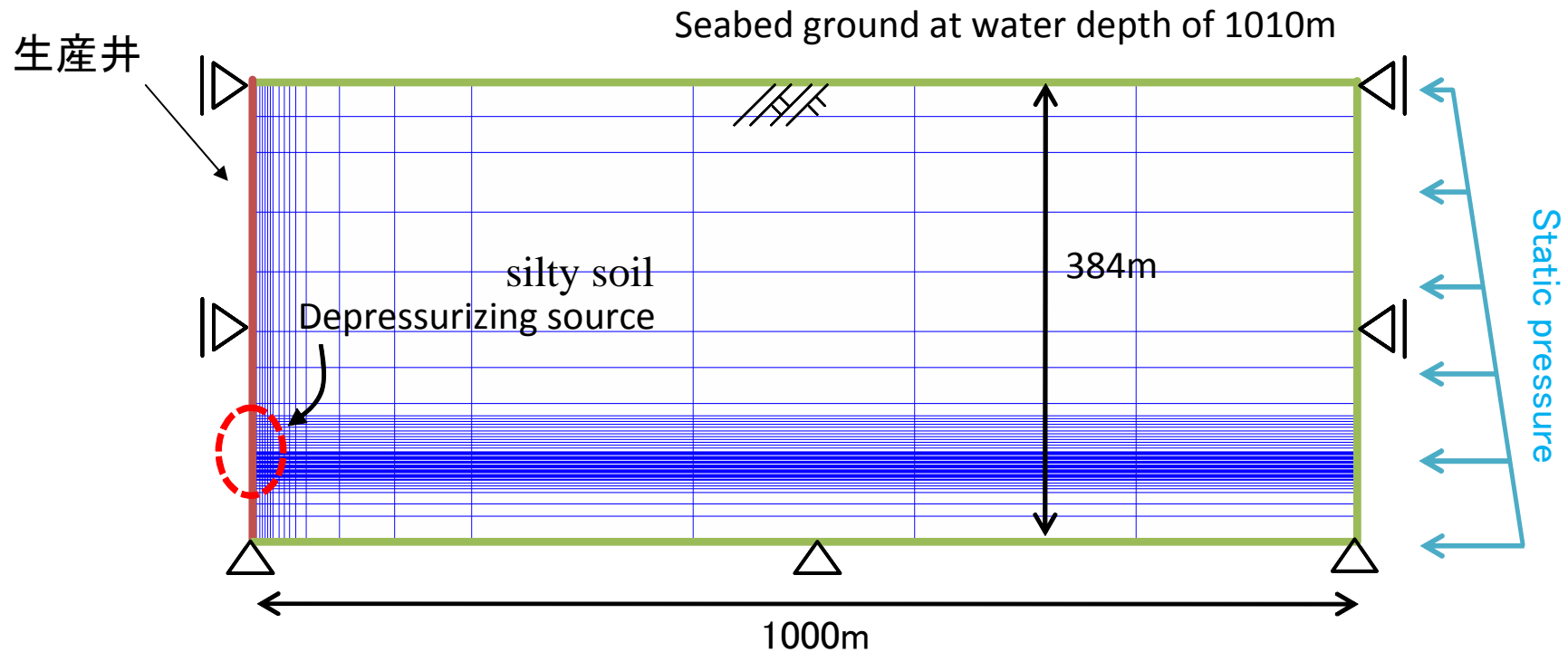
解析例

減圧源の圧力を25
時間で13MPaから
6MPaまで減圧



解析モデルと境界条件

2次元平面ひずみ



— 非排気-非排水,
断熱境界

— 排気-排水,
断熱境界

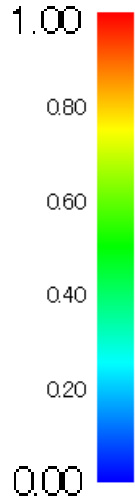
Soil: シルト質粘土
水深: 1010 m
地表面からの深さ: 384 m

MH残存度分布

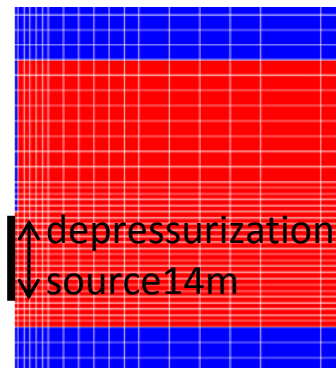
$$\frac{N_H}{N_{H0}}$$

N_H : 現在のMH物質質量 (kmol)

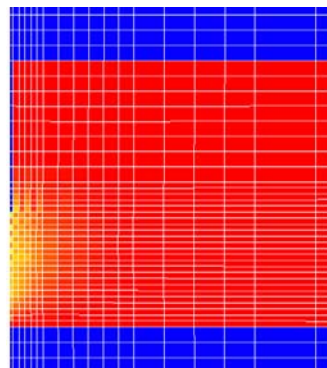
N_{H0} : 初期のMH物質質量 (kmol)



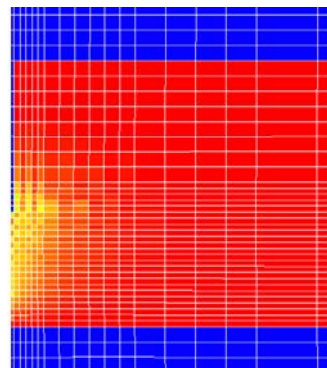
(e) 720hours(30days)



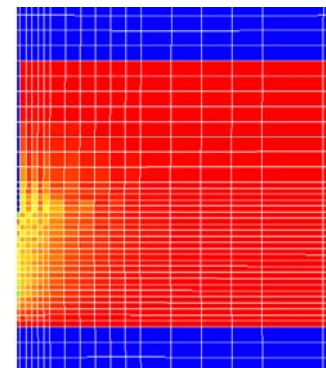
(a) initial state



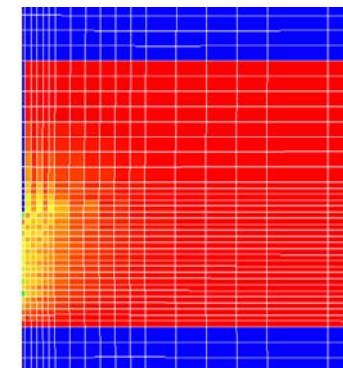
(b) 25hours



(c) 50hours

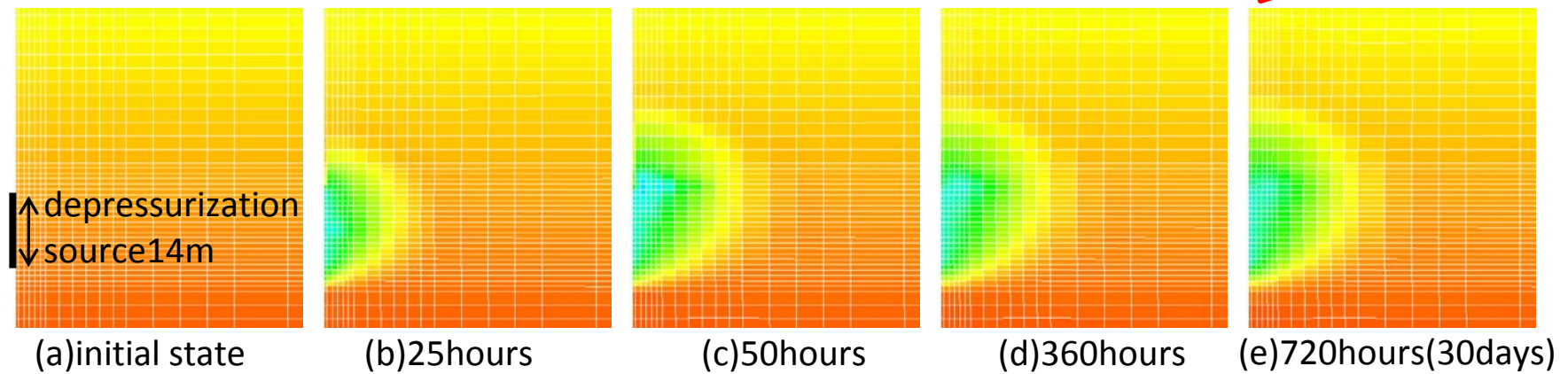
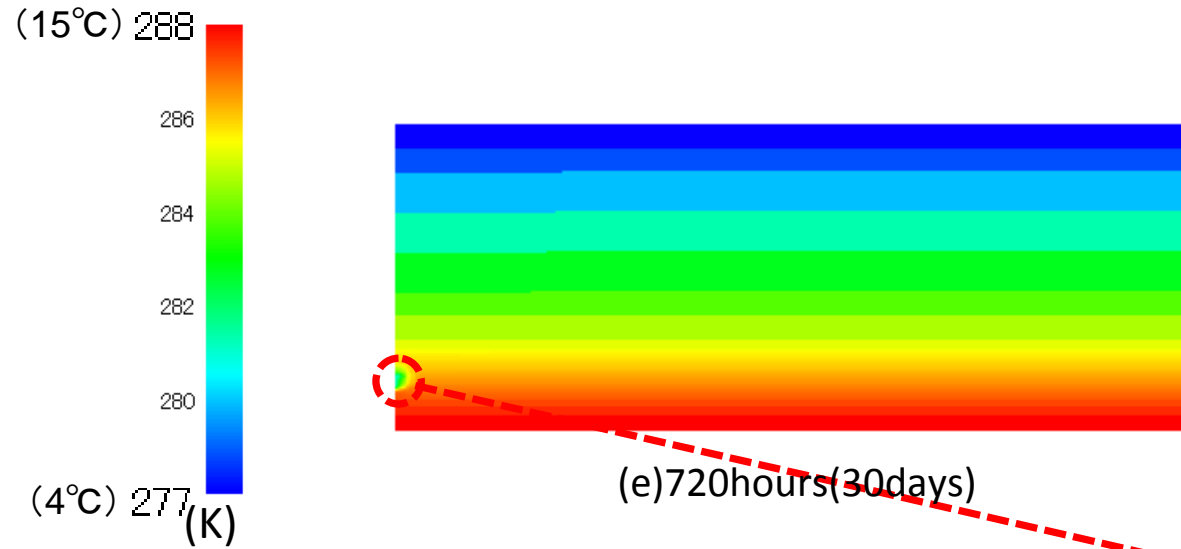


(d) 360hours

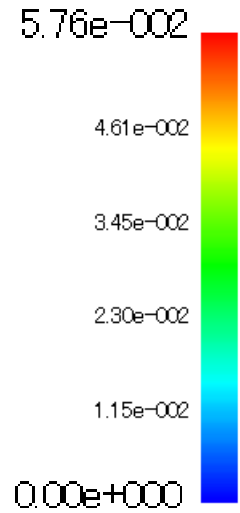


(e) 720hours(30days)

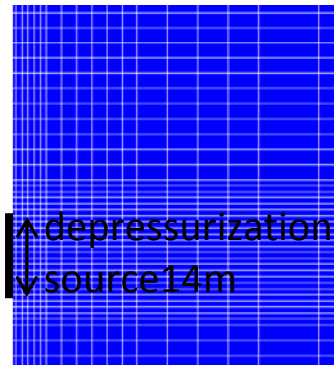
温度分布图



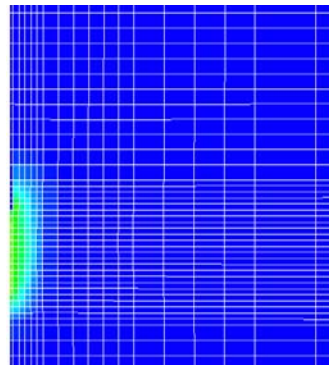
蓄積粘塑性偏差ひずみ分布図



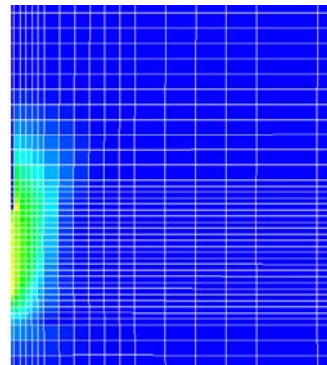
(e) 720hours (30days)



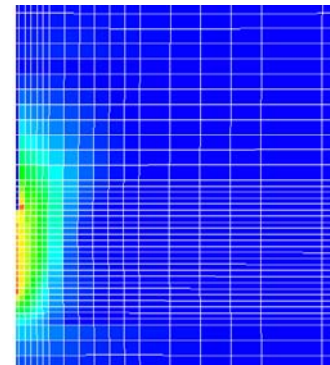
(a) initial state



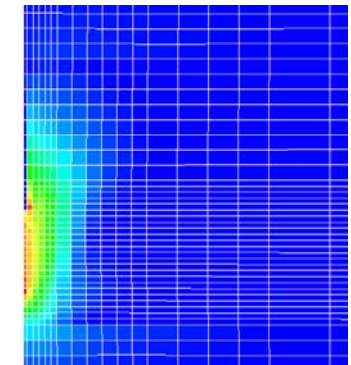
(b) 25hours



(c) 50hours

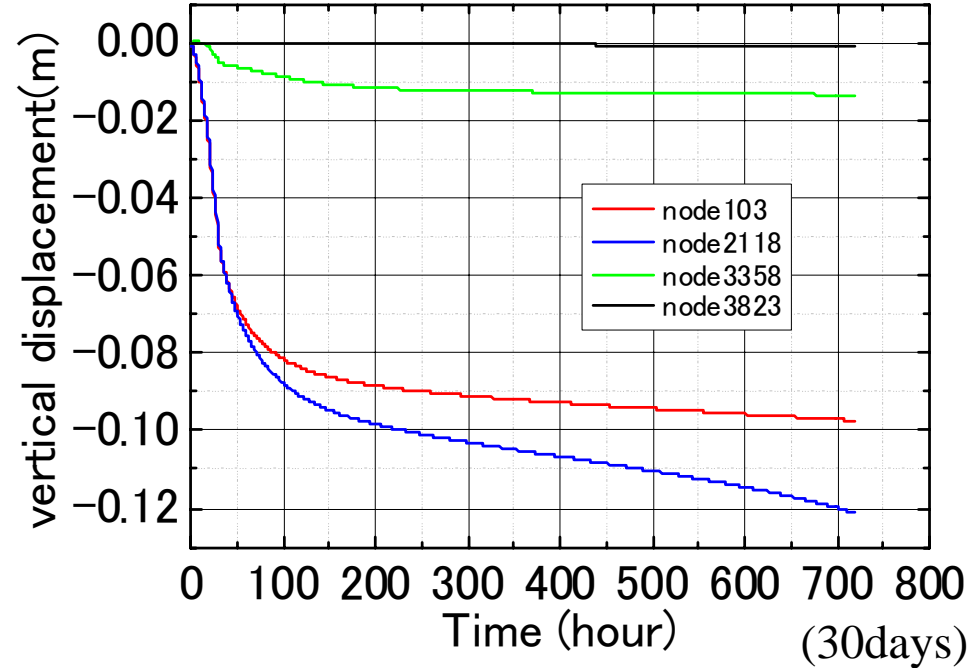
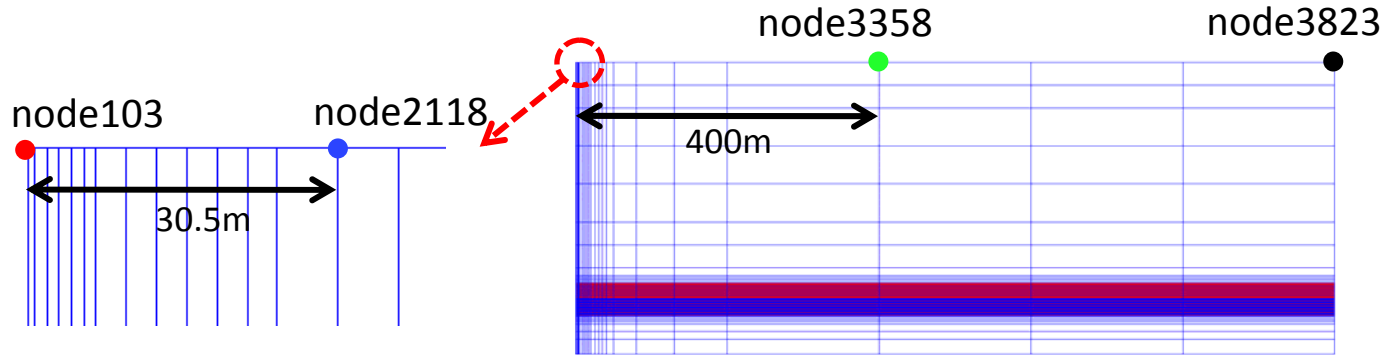


(d) 360hours

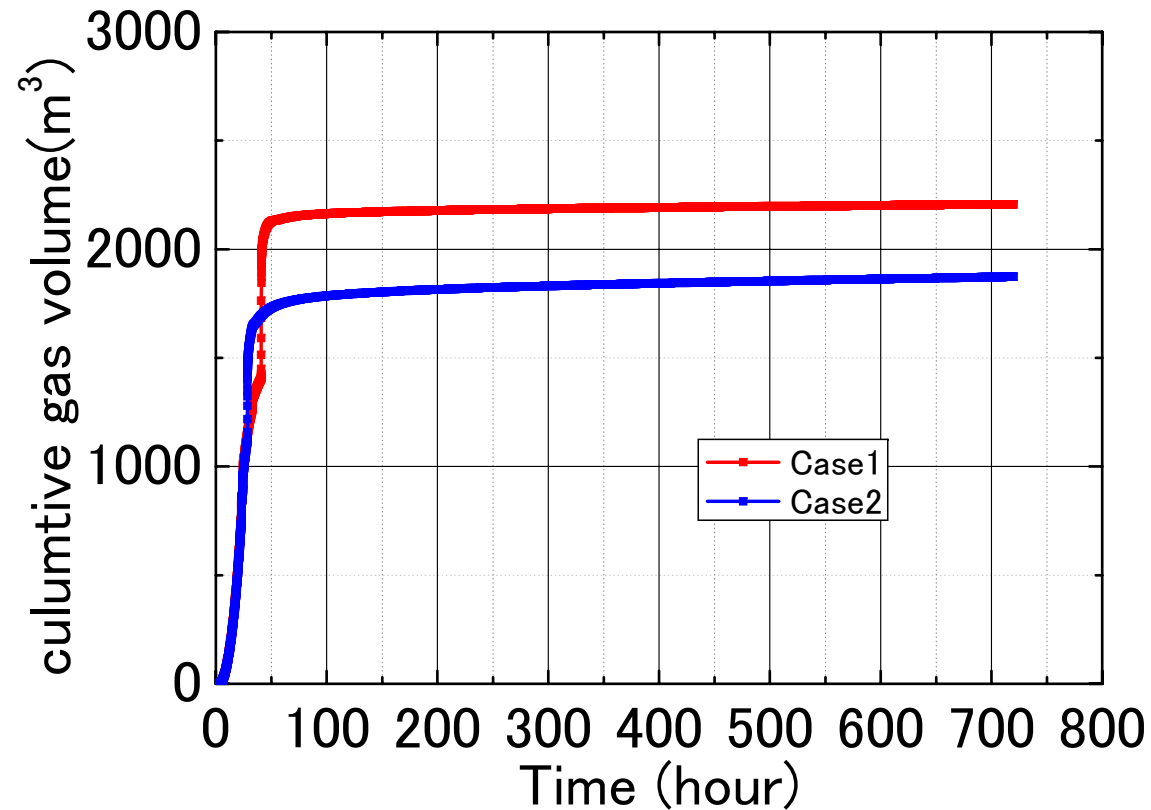


(e) 720hours (30days)

時間-沈下曲線(地表面)



生産ガス量(単位奥行きあたり)



*Gas volume is for 1 meters depth in plane.

Case1: Without cementing

Case2: Considering cementing

これからの課題

✦2次元モデルを用いて海洋メタンハイドレート生産時の力学的挙動をシミュレーションした。

✦シミュレーション結果より、減圧法による分解時の圧力変化、相変化、強度変化に伴って地盤変形が生じることが予測される。

Future works

- 3次元解析
- 室内実験との比較による解析モデルの検証
- ハイドレートの再生成、氷生成
- 分解速度式の検討
- 地震時の挙動

レポート課題

メタンハイドレート資源開発に向けて検討しておくべき課題について述べてください。

- 環境への影響（地盤、海洋、大気など）
- 効率よく取り出すには
- 経済性

提出期限：12月21日（水）