

表層型メタンハイドレートの起源と資源化の可能性

松本 良

80年代以降永久凍土域や深海底堆積物中に水分子が作る籠構造中にメタンが取り込まれた包接化合物、メタンハイドレートが広く分布することが分かってきた。化学物質としてのメタンハイドレートは19世紀には知られており生成条件について多くの室内実験がなされているが、自然界からの発見は20世紀後まで待たねはならなかった。温度圧力変化に敏感な巨大炭素リザーバーの発見は、(1)地球環境変動との関わり、(2)地滑りなどの地質災害要因、(3)新たな天然ガス資源など多様な視点から注目を集めており科学コミュニティへのインパクトも大きい。ここでは、最近話題の、日本海表層型メタンハイドレートについてその起源と地質的背景、資源ポテンシャルについて紹介する。

1はじめに
メタンと水から成るメタンハイドレートは海底に堆積した生物の遺骸を起源としており、石炭や石油、天然ガスと同じ化石燃料です。石油、石炭が数千年も前から人類に利用されてきたのと違い、天然のメタンハイドレートは20世紀になって発見されました。資源としての利用が期待されている海洋のメタンハイドレートの調査が本格的に始まったのは1995年です(松本、1996; 松本、2009; Matsumoto、2000, 2005)。1970年頃から始まる学術的深海掘削調査(DSDP、ODP)により、深海底堆積物中にメタンハイドレートが広く分布する可能性が指摘されると、地球表層の巨大かつ不安定な炭素リザーバーとして環境変動・気候変動の側面から注目され、2000年代初めには、地球環境の劇的な変動と絶滅イベントの主たる要因ではないか、という研究が多数報告されています。一方、国や民間の開発会社は資源としての可能性に期待しました。なかでエネルギー資源に乏しい我が国では早い段階から国のプロジェクトが動き始め、1995年に開発可能性調査(FS)、2001年に南海トラフ域で長期探査プロジェクトをスタートさせ、2013年3月には海底下約300メートルに広がるメタンハイドレート含有層(砂層型メタンハイドレート)からのメタンの試験生産に成功しました。□2001年に南海トラフで調査が始まった3年後に、著者(当時東大地球惑星科学専攻)を中心とする研究グループは日本海で、南海トラフとは異なるタイプのメタンハイドレートを確認し、引き続く一連の調査研究活動をスタートさせました。海底近くから回収され一部は海底に露出(図1)していることから、これを表層型メタンハイドレートと呼び、南海トラフのものは区別しました(Matsumoto、2005; 松本他、2009)。学術研究活動の成果を受け、経済産業省・資源エネルギー庁は、2013年、日本海に分布する表

層型メタンハイドレートがエネルギー資源となりうるか否か評価するための調査プロジェクトをスタートさせ、産総研とともに著者(明治大学ガスハイドレート研究所)のグループが実際の調査を担当することとなりました。本講演では(1)メタンハイドレートの起源と地球科学的意義、(2)資源ポテンシャル、(3)現在進行中の日本海表層型ハイドレートの資源量把握調査の概要について紹介します。

□2 海洋のメタンハイドレート

メタンハイドレート

とはメタンガス(CH_4)と水(H_2O)が低温高压状態で結合して出来た氷状の固体物質であり、地表条件では安定に存在できません。地球上でメタンハイドレートが安定に存在出来る場所は、深海底堆積物の中や北極海の周辺やチベット高原のような永久凍土が発達する地域です。図2にメタンハイドレートが安定に存在する領域を示します。海洋環境におけるメタンハイドレートの安定性を示すため、圧力の軸は便宜的に海面からの深度でとってあります。安定領域は水の塩分で異なりますが、ここに示すカーブは海水中でのものです。海水温は表層では20-30°Cありますが深層水は0.5°C-3°C程度と大変低温です。図2は日本海のハイドレート分布域を想定しており、深層水は0.3°Cと極めて低温ですが、地温勾配は10°C/100mで、若い日本海を反映して熱流量は南海トラフ域の5倍もあります。この図から水深1,000mでは海底下130m以浅でハイドレートが安定に存在できることか分かります。海水中では水深300m以深で安定と言えますが、海水はメタンに未飽和のため海水中にメタンハイドレートが生成することはありません。□海底下130m以深では過剰なメタンが存在してもメタンハイドレートになれず堆積物中に気泡として存在することになります。その結果、深度130mを境界として気泡(ガス)の多い堆積物(>130m)とメタンハイドレートを含有する堆積物(<130m)が接することになります。この明瞭な物質境界は音響的物理探査手法(地震探査)で把握することが出来ます。この境界をハイドレートの安定領域基底(BGHS)と呼び、地震探査断面上に出現する境界面(線)を海底疑似反射面(BSR)と呼びます。BSRは南海トラフの砂層型のような深いタイプのハイドレート鉱床の探査指標になります。

3 メタンの起源

生物遺骸は海底から数百メ

ートルまでの間はバクテリアなどの微生物によって分解されてメタンガスを発生し、さらに埋没が進み地温が100°C以上にまで上昇すると熱分解を起こして石油を作り、メタン(C1)、エタン(C2)、プロパン(C3)を発生します。比較的浅いところで微生物によって生成するガスを微生物分解起源、深部で生成するガスを熱分解起源と呼びます。微生物分解ガスは殆どがメタンからなり、メタンの炭素同位体は-60‰より軽く時に-100‰を

示すこともあります。熱分解起源ガスはメタンの他にエタン、プロパンを含み、メタンの炭素同位体は-30 ‰から-50 ‰であり、ふつう分子比 $C1/(C2+C3)$ とメタンの炭素同位体比から起源を判定する方法が使われます。大変興味深いことに、比較的深いところに発達した南海トラフの砂層型が微生物起源から成るのにたいし、日本海の表層型には熱分解起源ガスの寄与が顕著に認められます。これは日本海海底の高い熱流量が関係していると言えます。

□□

4 劇的環境変動シナリオ:メタンハイドレート仮説

メ

タンハイドレートの劇的環境変動シナリオはメタンハイドレートが持つ2つの性質、(1) 地球表層域における炭素 13 に乏しい巨大な炭素リザーバーであること(図 3)、(2) 温度圧力変動に敏感に応答することに由来します。メタンハイドレートの総量については様々な推定値が報告されていますが、炭素量として1万ギガトン(Kvenvolden et al., 1994, 2000 など)がもっともらしい数字としてしばしば引用されます。大気炭素の20倍ほどの炭素が海底下数100 mという地圏表層部に存在すると想定されます。海水温の数°Cの上昇により海底下の安定領域は数10 m薄くなり、安定領域が縮減した分だけのメタンハイドレートが不安定化、大量のメタンが海洋—大気に放出されます。海洋の貧酸素化、大気に酸化炭素およびメタン濃度の上昇、温暖化の促進、更なるメタンハイドレートの分解と事態は進行し劇的変動と大量絶滅に至るとというのがメタンハイドレート仮説です。大量絶滅に伴い海洋の溶存炭素が著しい負異常を示すことが、このシナリオの地質学的証拠です。引き金となったのは火山活動かもしれないし穏やかな温暖化かもしれませんが、一度分解が始まると正のフィードバックによって変動が加速するというのが、このシナリオのポイントです。メタンハイドレート仮説が最も良く適用されそうなのは地質記録からの検証が可能な5,500万年前のイベント(図 4)ですが(Dickens et al., 1995, 1997)、同様のシナリオがジュラ紀、白亜紀の変動にも適用され(Jenkyns et al., 1995; Hasselbo et al., 2000)ています。さらに地球史の最大の絶滅事変であるペルム紀/三畳紀変動の要因と考える研究者も少なくありません(図 5)。メタンハイドレート仮説は地質学的、実証的研究が難しいこともあり、やや下火になっていますが、地球と生命の共進化を考える上で重要な鍵であることは間違いなく、新たな実証の手がかりを見つけて研究考察を深める必要があると考えます。

5 資源としてのメタンハイドレート

海

底堆積物中での分布の様子、生成の仕方、起源から、日本周辺海域に見られるメタンハイドレートは2つのタイプに分けることができます(図 6)。一つを「砂層型」、もう一つを「表層型」とよびます。

南海トラフの砂層型メタンハイドレート 砂層型はその名の通り砂層中に生成するもので、太平洋(南海トラフ)のものがこれにあたります。深部あるいは周辺から供給される微生物起源ガスがBSR深度付近に発達する砂層中にハイドレート微粒子を形成し“凍った砂層”として農集帯を作っています。鉱床としての規模は砂層の発達状態とBSRとの関係に規制されることとなります。「砂層型」は2001年に始まったMH21と呼ばれるメタハイプロジェクトのターゲットです。

日本海の表層型メタンハイドレート 日本海では、海底下数10mまでの泥質堆積物中に厚さ数mm-数10cm、時には数メートルの塊状・層状ハイドレートが発達します。これを「表層型」と呼びます。構成粒子が小さく、したがって隙間も小さく水やガスが流通しにくい泥質堆積物中に、数センチメートルから数メートルの大きなメタンハイドレートが産します。砂層型のようにもともと存在した隙間を充填しながら集積したと言うモデルでは説明出来ません。ごく小さな結晶を核とし、周囲の粘土粒子を押しつけてながら結晶成長が続いたものと考えられます。寒冷地における霜柱の成長や凍土の発達によって建物が傾く凍上現象を連想すれば良いでしょう。表層型ハイドレートの濃集帯は直径数100m、高さ数m~10数mの低い丘(ハイドレートマウンド)を作ります。ハイドレートマウンドは緩やかで単調な丘のこともあるし、表面に数m以上の凹凸が発達することもあります。いずれの場合も、マウンド上には白色変色体と呼ばれるバクテリアのコロニー(バクテリアマット)や炭酸塩鉱物を作る堅い層(炭酸塩クラスト)が見られ、稀にメタンの泡が噴き出すこともあります。表層型ハイドレートのガスの起源としては、微生物起源メタンのほかに熱分解起源ガスの寄与が大きかったことがガス組成と同位体組成から明らかにされています。図7に示すのは、音響探査法(サブボトムプロファイラー)によって明らかにしたハイドレートマウンド直下の地質構造です。海底に平行な筋は堆積層を示します。ハイドレート濃集帯の直下では白く抜けて堆積層が見えません。ガスや水の含有量が高いと音波が反射せずに減衰してしまいブランキングと呼ばれる白抜きの反射イメージを残します。マウンド直下のブランキング構造はガスおよびガス含有流体の存在を示すもので、この部分をガスチムニーと呼ぶこととします。日本海でメタンハイドレートが回収された海底はその直下に常にガスチムニー構造が発達しており、ガスチムニー構造を経た深部メタンの供給が、表層型メタンハイドレートの濃集=メタンハイドレート鉱床を形成している、と結論できます。

6 表層型メタンハイドレートの資源探査 資源エネルギー庁は2013年(平成25年度)「海洋基本計画」に基づき表層型メタンハイドレートの資源量を3年程度で把握する調査プロジェクトをスタートさせ、

明治大学ガスハイドレート研究所は産総研とともに調査を実施しています。調査チームでは、これまでの学術研究から明らかされた事実を踏まえ、資源評価のためには、(1) ガスチムニー構造の分布(位置、数、サイズ)を明らかにすること、(2) ガスチムニー構造中のメタンハイドレート量(体積%)を見積もることを最重点課題と考え、効率的な調査を集中的に展開しています。

(1) ガスチムニーの分布調査は、日本海および北海道周辺で、天然ガスの生成する可能性の高い、海盆、トラフなど、堆積物が厚く発達した深い海を対象としました。これらの海域は、従来型の石油・天然ガスの生産地域に近い場合もあるし、これまで調査が進んでいない海域もあります。経産省・資源エネルギー庁のプロジェクトが開始する前の学術調査の段階では、上越沖の海盆に調査が集中され、この海域で30個程度のガスチムニーが確認されていましたが、2013年度、2014年度には西は対馬海盆、隠岐トラフから、富山トラフ、上越沖、最上トラフ、日高・胆振沖、日本海および北海道周辺海域で表層型ハイドレートが存在する可能性のある海域をカバーする約30,000平方キロメートルで音響調査を実施、ガスチムニー構造を約1,000個確認しました(経産省プレスリリース、2014年12月)。2015年度には残された分布可能海域を全てカバーする調査を実施しています。

(2) 掘削と地質試料のコアリングにより、ガスチムニー内部のメタンハイドレート量を確実に知ることができます(図8)。音響的手法で広い海域をカバーして調査出来るガスチムニー探索と違い、掘削—コアリングは一カ所に数日~1週間留まる必要があります、多数のガスチムニーの評価を短時間で進めることはできません。掘削調査は、まず始めに、地層の音響的(伝搬速度)、電気的性質(比抵抗)、自然ガンマ線強度などのパラメータの深度方向の変動測定をしておおよその地層分布を明らかにし、その次に、実際のコアリングを実施します。このような掘削により極めて高い精度でハイドレートの位置を確認することが可能です。26年度は4カ所で掘削調査を実施し、今年度はさらに多数の掘削—コアリングを実施しています。

7 まとめ：表層型メタンハイドレートからのガスの生産へ 資源開発は一般に、学術調査、資源探査、資源開発生産と3つのステップを踏むと言われています。表層型メタンハイドレートの資源プロジェクトは、いまだ第2段階にあります。今後の調査で、資源開発の対象になる程度にメタンハイドレート量、メタン量が多いことが確認されたあと、どのようにして採掘するか、そのための技術開発はどうあるべきか、などが検討し解決すべき課題は山積しています。表層型メタンハイドレートの産状や地質背景から、生産方法を考える際に鍵になるいくつかの要件が見えてきます。第1は、表層~浅層に濃集する傾向があり、鉞床を覆

う泥の層(石油や天然ガスではキャップロック帽石と呼び、石油やガスが上へ逃げるのを妨げる地層)が薄いという事実。この事は、南海トラフのように、鉱床が存在する場所で強制的にガス化し、パイプで回収するという、従来型石油、天然ガス鉱床で使われる方法の適用が難しいことを意味します。第2は、水より軽いメタンハイドレートが海底付近に密集していると言う事実。これまでの無人探査機による海底観察は、海底に大小のすり鉢型の穴を発見しました。これは、海底付近に濃集した塊状メタンハイドレートが、自己の浮力によって泥を押しつけて浮上して出来たものと説明されます。表層型メタンハイドレートの生産試験をデザインするまでには、その分布深度、濃集体のサイズや形態などの情報が不可欠で、今後数年の詳細調査が必須です。調査を加速し、数年以内には、南海トラフとは違った生産試験が実施されることを期待したいと思います。

□8 引用文献

Dickens,

G.R. et al., 1995, *Paleoceanography*, 10, 965-971.

Dickens, G R. et al., 1997, *Geology*, 25, 259-262.

Hasselbo S.P et al., 2000, *Nature*, 406, 392-395.

Jenkyns, H. C et al., 1995, *Amer.Jour.Science*, 299, 341-392.

Kvenvolden, K., 1994, *Annals N. Y. Academy of Science*, 715, 232-246.

Kvenvolden, K., 2000, *Annals N. Y. Academy of Science*, 912, 17-22.

松本 良 1996 科学 66, 600-604.

Matsumoto, R., 2000, *Annals N.Y Academy of Science*, 912, 39-55.

Matsumoto, R., 2005, *Proc of ICGH-5, Trondheim*, 749-754. □

松本 良 2009, *地学雑誌* 118 (1) 7-42.

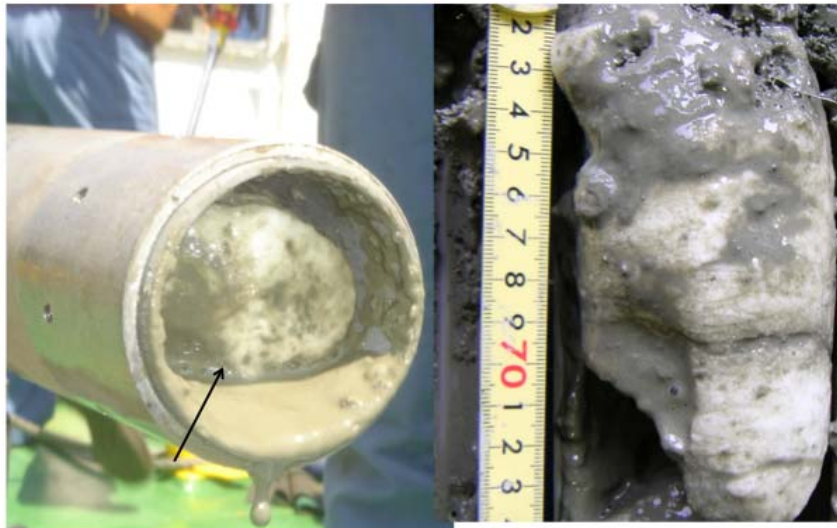
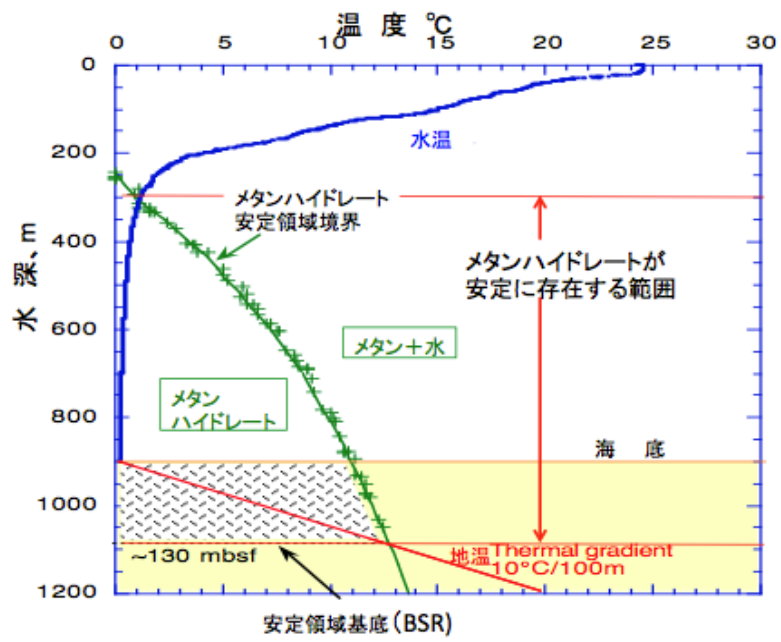


図1 ピストンコアで回収した日本海の表層型メタンハイドレート



第2図 海水中におけるメタンハイドレートの安定領域

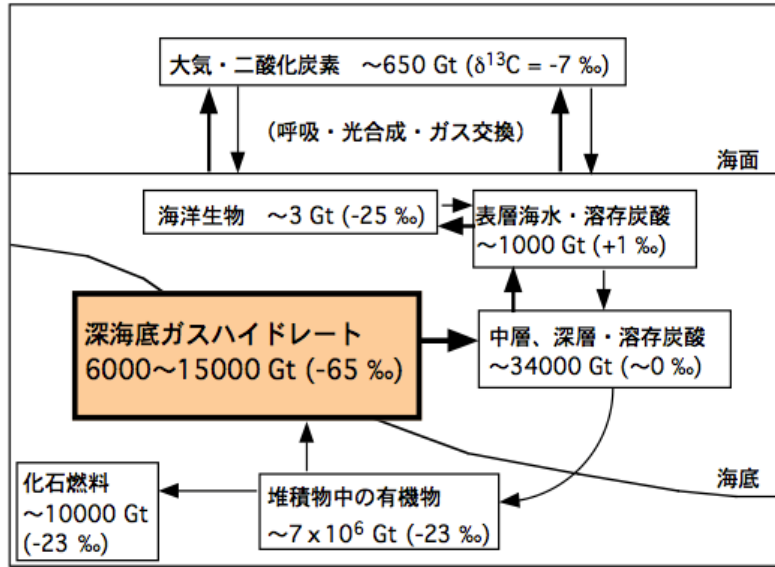


図3 地球表層部における炭素循環とメタンハイドレート(ガスハイドレート)

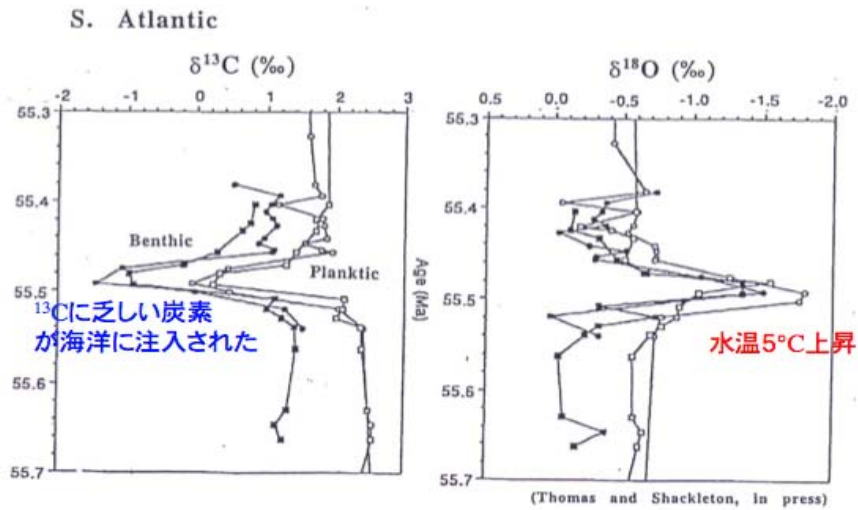


図4 PETM 5500万年前の劇的環境変動事象

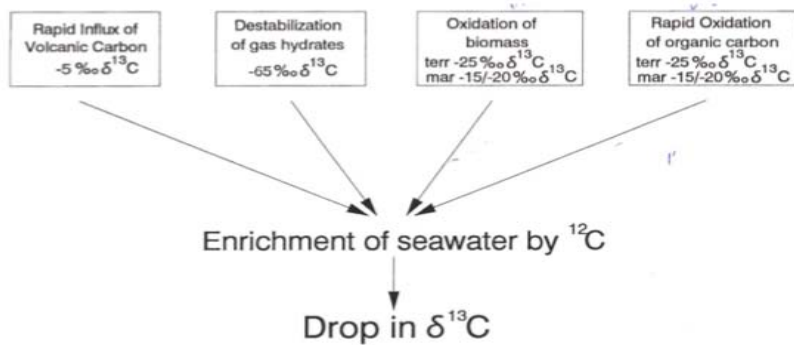


図5 P/T境界における同位体異常はメタンハイドレート分解で合理的に説明できる
 “Massive GH dissociation caused P/T boundary event”
 Douglas Eirwin, “Great Phanerozoic Crisis”
 (Columbia Univ. Press 1993)

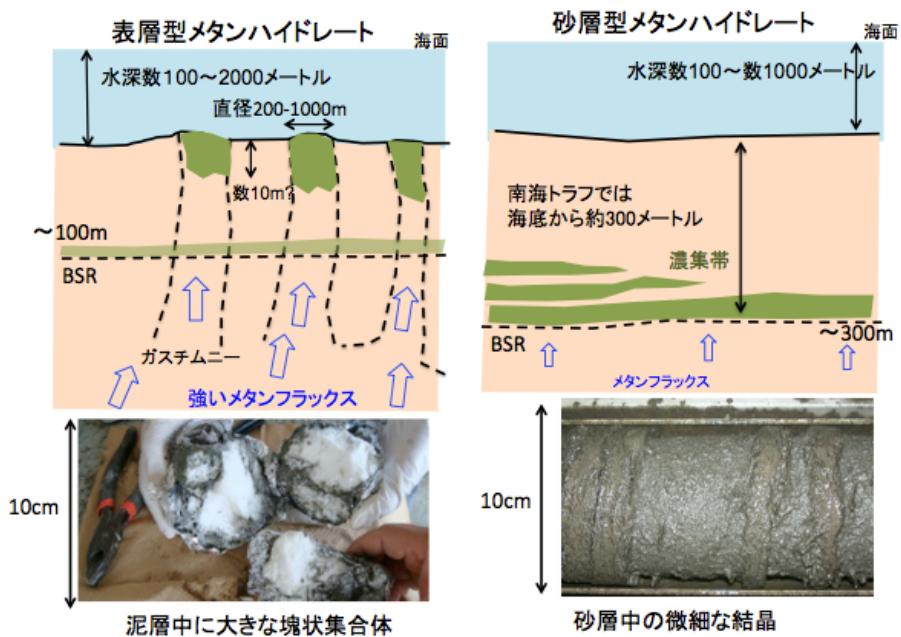


図6 海洋の2つのメタンハイドレート

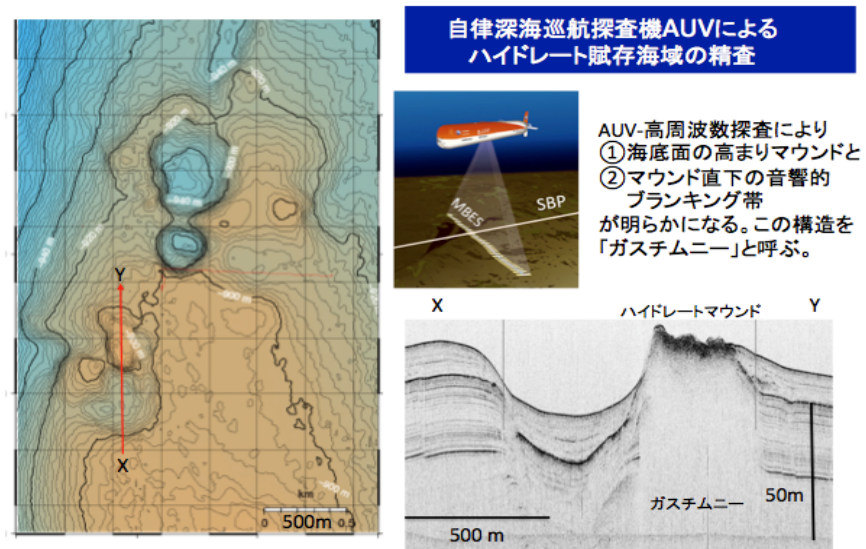


図7 表層型ハイドレートを胚胎するガスチムニー構造



図8 船上からの掘削によって回収された塊状メタンハイドレート