

「日本海の表層型メタンハイドレートの資源化について」

松本 良 氏 （明治大学ガスハイドレート研究所 特任教授）

と き：平成 27 年 11 月 11 日（水）

ところ：ホテルニューオータニ ザ・メイン「麗の間」

講師のご紹介

1 略 歴

1972年 東京大学理学部卒業

東京大学大学院理学系研究科（地質学専攻）進学

1974年 東京大学理学部助手

1985年 東京大学講師（理学部）

1990年 東京大学助教授（理学部）

1992年 東京大学教授（理学系研究科 地球惑星科学専攻）

2012年 東京大学名誉教授

明治大学 研究・知財戦略機構 特任教授

同機構内にガスハイドレート研究所設立（同代表）

2 専門分野

地質学・堆積学・地球化学

3 著 書

『エネルギー革命メタンハイドレート』（飛鳥新社 2009年）

『惑星地球の進化』（共著、放送大学教育振興会 2007年）

『メタンハイドレート 21世紀の巨大天然ガス資源』（共著、日経サイエンス社
1994年）など多数

4 調査・研究

明治大学ガスハイドレート研究所や（独）産業技術総合研究所、連携する大学などで構成される「表層ガスハイドレート研究コンソーシアム」において、調査の中心的な役割を担っている。平成26年度は、同コンソーシアムにおいて6つの調査航海を実施し、日本海の表層型メタンハイドレートの資源量把握のための分布調査を行うなど、日本海側でのメタンハイドレート採掘の実現に向け、着実に研究を進めている。

ご紹介いただきました松本です。今日は、皆さん、日本海のハイドレートに関心を持っていただき、かつ私に講演の機会を与えていただきまして、大変ありがとうございます。

今日お話しする内容は、全体の3分の2程度は私が東大にいるころにした学術調査の成果であり、残りの3分の1が明治大学でハイドレート研究所をつくってからの調査結果、この中には、多くは経産省のプロジェクトを受託した成果が含まれているという構成になっています。

話の大部分の内容、今日使うスライドは、皆さんのお手元のハンドアウトにございますが、幾つかはないものもありますので、またその都度ご説明いたします。

1. メタンハイドレートとは

メタンハイドレートとは、氷状の固体物質です。しばしば「シャーベット状」などと言う人がいますが、そんなことは決してなくて、非常に硬くてハンマーでたたいて壊すほどのかちんかちんの氷です。これが海底下、深い所に存在するのですが、船の上に持ってくると途中で一部壊れるので、一見シャーベット状に見えることもあります。

図1の左下に書いてあるのが結晶構造ですが、水色の水の分子とメタンの分子がこのようなきれいな構造で固体状の氷を作っています。164m³のメタンガスがわずか1m³ほどのメタンハイドレートに取り込まれており、体積は164分の1になります。非常に圧縮されて固体ハイドレートを作っており、つまり、大量のガスをため込む貯留槽であるということが言えます。これが海底の堆積物質に存在するということが分かってきました。

実際、図1の下にある写真が採れたものです。

メタンハイドレートというと、特殊なメタン、特殊なガスとお考えの方もおられるのですが、実はそうではなくて、これは普通の天然ガスと同じものです。図2に示すように、起源は、海底に動

物プランクトン、植物プランクトン、あるいは周辺の陸地に由来する植物が堆積して、最初、海底から数十から数百 m の間は微生物によって分解されます。これが微生物分解ガスといって、大部分はメタンガスです。徐々にゆっくりとした反応でガスができます。

さらに埋没していくと、温度が通常は 100°C 程度以上になるとガスや油ができます。それができるのが日本海では海底から 1000m ぐらい、太平洋では地層の温度が低いので 4000~5000m まで埋没しないとガスはできませんが、日本海では 1000m ほどでガスができます。これを熱分解ガスといいます。

この熱分解ガスが日本海や日本海側の内陸部に点々と存在する天然ガス鉱床の起源になっており、天然ガス鉱床ができるのは、地表、あるいは海底から 1000m、2000m ということになります。

適当な地質構造がないとガスはたまらずガス鉱床はできないのですが、そうするとガスが漏れて逸脱し、浅い所へ上がってきて、最後は海底から逃げてしまうと従来考えられていました。しかし、海底から 100m~200m の所まで上がってくると、温度・圧力の関係で、このガスが水と反応して氷状の結晶を作ってしまうのです。そういう事実が分かってきたのはこの数十年で、それ以前は海底からガスが漏れているとしていたのですが、実は下から逃げてきたガスが最後の最後にまたトラップされるということが分かったわけです。これがメタンハイドレートです。

では、実際に日本海ではどんな所にあるのかということで、実験室でどういう温度・圧力条件でできるのかという実験は多くされています。図 3 にグリーンで書いた点が、ハイドレートが安定に存在する限界の温度圧力です。この図では下向きに圧力が高くなっていて、横向きが温度です。ブルーが日本海の水温で、表層では 25~26°C ありますが、深くなるにつれて急激に冷たくなり、300m で 2°C ぐらい、600m だと 0.5°C ぐらいと非常に冷たい水なのです。これが日本海でハイドレートができる一つの要因ともなっています。ここで言いますと、ぎりぎり約 300m より深い所に行くと、ようやくハイ

ドレートが安定に存在する条件に入ります。

水深 900m の海底を考えると、海底下の地層中では、赤い線に沿って温度が上昇し、海底から約 130m までが、地層の中でハイドレートが存在し得る範囲ということが言えます（図 3）。水深 300m 程度より深い海水も温度・圧力的にはメタンハイドレートの安定領域に入りますが、海水中ではメタンがほとんどありませんから、実際にハイドレートができるのは、海底下、百数十 m ということ可以说るわけです。これがメタンハイドレートの分布し得る所ということが言えます。これは水深が 900m の場合です。

水深が浅くなると、分布する範囲はどんどん薄くなって行って、例えば水深が 400m だと、存在する所は 10m などと、ごくごく薄くなります。経験的に私たちの調査から言いますと、日本海では、大体水深 500m より深くないとハイドレートは安定には存在していないということが言えます。

日本海での分布可能範囲を示したのが図 4 ですが、赤い線がおおよそ水深 500m の境界深度です。隠岐トラフは、鳥取、兵庫、京都、沖合の 500m より深い、有機物がたくさんたまった海で、ここは十分に対象海域になります。富山湾から上越沖、佐渡の沖合は、非常に立派な海盆です。ここは 500m から 1000~2000m で、有機物が大量にたまっています。それからもう一つ大きい海盆、最上トラフとありますが、山形、秋田、それから一部、青森沖に狭長な深い海があり、ここにも十分に有機物がたまっています。

実はこういう所はいずれも既存の、在来型と申しますが、天然ガスや石油も一部出る所で、それと重複しています。これは最初にお見せしたように、もともと起源は同じであって、それが深い所でうまくトラップされれば天然ガス鉱床になるけれども、逃げてしまつて上に来たものはハイドレートとしてトラップされるという関係になっているわけです。

北海道の周辺にも点々とハイドレートが分布する場所があり、調査対象としています。

2. 日本海の表層型メタンハイドレート

初めに、表層型メタンハイドレートはどんなものかということをご理解いただくために、学術調査についてお話しします。

私たちが調査を始めたのは今から 11 年前の 2004 年、日本海の上越沖です。図 5 の右の写真のピストンコアラという装置、頭に 1 t の重りが付いたステンレスパイプ (6m) を海底に落とします。非常に単純な、いかにも学術調査っぽい調査ですが、これを海底にあちこち落として、このパイプの中にハイドレートが入ってくればいいというものです。ブラインドショット、いわばめくら撃ちで、どこに落ちるか分からないけれども、腕力でやるわけです。時には左のように、12m の長いパイプを落とすこともあります。これはしばしば曲がってしまっていて上がってこないということもあり、苦労もあります。

2004 年 8 月 1 日に最初のメタンハイドレートを回収しました。船中大騒ぎで、大変感激したことを覚えています。回収された氷状のハイドレートは船上で分解してプチプチと発泡し、火を付けると良く燃えます。2004 年以降、ピストンコアラを用いた学術調査によって、日本海のあちこちからハイドレートが採取されています。

この調査では長さが 6~7m のパイプを使いますので、調査深度は当然そこまでの範囲で、それより下は分かりません。6m、7m、あるいは 10m までは、適切な場所 (ハイドレートマウンド、ガストムニー) に落とせば必ずハイドレートが採れることは分かってきました。その構造がどういう所であるのか、ハイドレートが集まっているのはどういう所であるのかを調べるために、自律巡航型探査機 (AUV) という、葉巻型の潜水艇を海底に降ろしました (図 6)。投入前に調査ルートプログラミングしておく、あとは勝手に海底直上を走って海底直下の情報を収集します。船からの海底調査では、水深 1000m だと 1000m の遠方から調査をするのですが、AUV 探査機を使うと、海底から数 10m というごく上を走りますので、分解能の高い

データを取得できます。

AUV 調査で得られた詳細海底地形図で、海底の穴ぼこや山が見つかります。山と穴ぼこがある場所にピストンコアを落とすと必ずと言っていいほどメタンハイドレートが採れます。

図7の左の断面図は AUV 調査で海底直下の地質構造です。海底から 100m ほどまでの構造が詳細に分かります。海底にほぼ平行なこの線は地層の面です。その地層を切る白く抜けた構造があります。海底面は少しごつごつとしていてスムーズではありません。こういう所にメタンハイドレートがあります。小さい山を「ハイドレートマウンド」と呼んでいます。高さはせいぜい 10m 程度で、直径は数百 m です。この長さが 500m ですから、ここだと大きさが 400~500m ほどの緩い山、丘がここに 있습니다。

その下の白く抜けた所を「ガストムニー」といいます。これは全部ガスというわけではありません。地層がちゃんとあることは掘削調査で確かめてあります。ガストムニーの中の地層のごく小さな隙間にはガスや流体が詰まっています。流体が多いために音の反射がきれいに戻ってこなくて、それで白く抜けてしまうわけです。「ブランキングゾーン」と一般的な名前ではいいますが、これをわれわれはガストムニーと呼んでいます。ガストムニーの最上部にハイドレートが濃集するということが分かってきました。図7の右の図は、ガストムニーを模式的に描いたものです。直径数百 m のガストムニー構造があり、この中を通してガスが供給され、浅い所にハイドレートが密集します。このイメージ図が、学術調査で明らかになったもので、表層型メタンハイドレート概念の確立と言っていいと思います。

ガストムニーの白く抜けている所に何があるか分かりません。これを知るには、ここに穴を掘らないといけません。しかし、海底掘削というのは大変な作業になります。当時、学術調査で対象にできたのは十数 m ほどまで、それより下は不明というところでした。

表層型メタンハイドレートが存在する海域には、違ったタイプ、

つまり砂層型メタンハイドレートが存在することもあります。メタンハイドレートというと南海トラフのものだけと皆さんお考えかもしれませんが、表層型メタンハイドレートが確認されたため、それ以降、南海トラフのものは砂層型メタンハイドレートと呼ばれるようになっていきます。

砂層型は深い所、海底から 300m ぐらいの所に砂があれば、その砂の隙間にハイドレートが形成されるというものです。

海底はそういうごつごつした山があり、その直下にメタンハイドレートがある。何とか直接観察したい。そこで、無人探査機 ROV を使って海底を見に行ったのが図 8 です。海底のごつごつした山にできた谷の崖です。崖にはこのように白い塊がレンズ状に分布しています。これは厚さが 30~40cm で、長さが 50~60cm から 1m あるようなレンズ状の白い塊が壁に露出しているのです。これは海底から 2~3m の所で、この崖は全体で 4~5m ありますので、そういう厚さ、海底の直上の浅い所に塊状のハイドレートが積み重なるように存在するということが、こうして目で見えたわけです。

海底でみるメタンハイドレートは、氷のように透明感があります。硬いので、潜水艇のマニピュレーターでいくらやってもなかなか壊れない。ハイドレートは水より軽いので、海底から離脱すると海中を浮上します。

海底ではメタンハイドレートが生成し、時々崩壊して浮かび上がる。恐らくそういうことが自然現象として起きていると想像できます。出来ては壊れ、出来ては壊れるということです。

ROV 無人探査機では、海底からメタンが吹き出している様子も観察できました。海底にハイドレートがあって、ピストンコアラで採れるような所に潜航してみますとメタンが噴いていることが有ります。これをメタンブルームと呼んでいます。

なぜ日本海かということをお話ししたいと思います。表層付近に密集しているハイドレートは、日本海で調査をしたから日本海にあるわけではなく、地質的な背景からいって日本海にしかない、いく

ら頑張っても太平洋にはないだろうと言えます。それには日本海や日本列島の形成が密接に関係しています。日本列島は 2500 万年より前には、ユーラシア大陸にくっついていて、ユーラシア大陸の一部だったわけです。これが 2500 万年ほど前から少しずつ割れ始めて、日本海が小さな狭い湖になり、さらに広がって太平洋に向かって移動して、現在の姿になったということはお聞きになったかと思いますが、そういうヒストリーが日本海に大量の有機物を堆積して、高い温度によって有機物を熟成させ、ガスを作り、さらにその地層の変形がハイドレートを浅い所にトラップしたことに繋がります。さまざまな地質現象が日本海にハイドレート、あるいは天然ガスを作る要因になっていたということです。

日本海が開くには、深部からマグマが上がってくる必要があって、海底はもともと熱かったわけです。若い日本海、熱い海底、これが大きなポイントになります。

割れ目ができて有機物がたまり、それが天然ガスの原因になりました。今から 1500 万年ほど前には、既に日本海が出来上がっていますが、そういう中で有機物が大量に埋没しました。

地質学的には最近の 200～300 万年前になると、ユーラシアの一部のアムールプレートという部分が日本海に向かって動き始めて、日本海の東の縁に境界ができ、この境界に沿って日本海と日本列島を押し付けました。この押しつぶしのときに、褶曲と断層ができました。その構造が深部のガスを有効に浅い所までもたらし、しかも、その褶曲がガスをトラップしたということになっているわけです。

これが日本海に石油・天然ガスが多く、かつハイドレートもできやすいという地質的な背景で、これはまさに日本海の歴史、日本列島の歴史が日本海の石油・天然ガス、メタンハイドレートを作ったということが言えるわけです。

3. 表層型メタンハイドレート資源の探査

ここまでの学術調査で分かった、なぜ日本海であるか、日本海の

表層ハイドレートがどんなものであるかというお話です。経済産業省は、それまで太平洋・南海トラフの砂層型メタンハイドレートに集中していたのですが、日本海の表層型もひょっとしたら資源になるのではないかと考えたのでしょう、2013年に「海洋基本計画」の閣議決定を受け「表層型メタンハイドレート資源量把握計画」を発足させました。表層型メタンハイドレートの資源量把握を目指して、平成25年から3年程度。今年がその3年目になるのですが、この3年間で資源量がどれくらいか、ポテンシャルがあるのか、ないのかの調査が展開されています。

資源エネルギー庁から産総研を通して明治大学が再委託を受け、産総研とともに調査を実施しています。調査は、構造調査や地質調査、環境アセスメントという3つのグループをつくり、それまで学術調査を展開していた大学研究者に産総研を加えた形で進めています。

調査をしているのは、図9に示す海域で、最初にお見せした水深500mより深い、有機物を含んだ地層がたくさんたまっている海盆です。学術調査は主に上越沖周辺を対象としていましたが、経済産業省のプロジェクトが始まり、対象とする海域は、全部しらみつぶしに調べようという計画を立てました。3年間でそれをやるのはなかなかしんどいことではありますが、日本海の表層ハイドレート資源量把握がきちんと言えるようにやろうと、そういう計画を立てました。

図9に書いてあるのは最初の2年間の2013～2014年度ですが、さらに2015年度を加えて、同じぐらいの範囲の調査をしています。どこを調査しているかということは、まだリリースされていませんのでここではお見せできませんが、初年度に1万km²、2年目に2万km²、3年目、今年には1万5000km²ほどの調査をしていますので、4万5000～5万km²の海域をカバーしています。

2014年度の調査で、多面的な調査を一斉にやっているというのがこの表層ハイドレート調査の特徴とも言えます。広域調査で、それ

こそポテンシャルのある所を全部しらみつぶしにやろうという調査です。どうやるかについては後で説明します。その中から選択した特に有望な所を広域詳細調査、同じような調査ですが、AUVを使った詳細調査です。

掘削調査が最後の仕上げで、昨年調査を始めました。今年も今回の目玉として掘削調査を実施しています。

(1) 初めに広域調査ですが、図 10 は富山湾、上越沖を示しています。ここに書いた線が測線で、これを走り回ります。3km の間隔で上から下まで全部カバーします。3km を走ると両方にビームが広がりますから、完全に海底をカバーできるわけです。そして海底の地形的な異常をキャッチします。地形的な異常があったら、そのポイントの真上に行って、さらに地下構造を詳細に調べるといふ二本立てです。地形調査は、完全にローラー作戦でしらみつぶしに調べ、その上で候補地となる地形異常があったら、そこをピンポイントで調べていくという方法です。

測線上に奇妙なへこみや山が見つかることがあります。そういう地形異常の所には、反射強度が強く、地図上に黒くシミのように見える場所もあります。ここは、海底が硬い所です。海底が硬くて地形的な異常がある所が優先度の高い、可能性のある所なのです。そういう所を精査すると海底下の構造が見えます。地層面を示す黒い筋、ガスや水の含有量が多く記録上は白く抜けたガストムニーなどです。このような構造が見えないこともあります。地形的異常だけということもあり、ガストムニーが認められる所もあるわけです。地形的な異常に基づいたスクリーニングをし、2 番目にこの海底地質調査をして確定します。こうやってこのガストムニーが発見されます。ガストムニーの中には、直径 2km、3km と非常に大きな構造がある場所も見つされていますが、多くは 500~1000m ほどです。

図 11 は、2013 年度と 2014 年度の 2 年間の調査結果です。最終的に確定したガストムニーの数は 971 個で、1000 個近くあります。この 1000 個というのは、実はかなり内輪の数字です。地形的な異常を

最初に見つけますが、時間的制約から地形的な異常の全てを精査できないので、その中から比較的海底が硬そうな所だけで精査します。2年間で4408箇所の特異構造を発見したが、精査したのが1680。そのうち58%の971個でガスチムニーを確認。この時点で未調査が2734残っています。まだ可能性が十分あり、ここを精査すればさらに500や1000は見つかる可能性があります。そうすると、日本海で、昨年までの2年間だけでも1000を優に超えます。今年をこれに加えると、ガスチムニーの数としては相当の量になるということが想像できます。

ガスチムニー型の表層ハイドレートは、集積はしているけれども量は微々たるものであろうというような意見もありましたが、これは日本海全域にわたって非常に広く分布しているということが分かったわけです。

(2) 次の調査は海底掘削調査で、2014年度はJOGMECの「白嶺」という船を使って調査しました。水深約1000mから100mほど、ガスチムニーの中を掘るわけです。

調査の仕方には二つあるのですが、一つは堆積物そのものを採るのではなくて、地層の電氣的な性質、音の性質、ガンマ線の強度というものを調べて、その異常からハイドレートがありそうな場所をディテクトします。これは一つの例としてガンマ線強度、電気抵抗を示しています。こういうパターンから、この辺にはハイドレートがありそうだということが言えます。これはあくまでもパラメーターとして推定できるということで、こういう所を狙って実際の掘削をします。

「白嶺」を使ったコアリング調査では、海底下からプラスチックライナーチューブに入ったコアが回収されます。回収されたメタンハイドレートは、白い塊として、時には数十cm、あるいは1mを超えます。図12のハイドレートは2014年度に回収した一番長いもので長さ(厚さ)が1.3m以上です。長さ1~2mのハイドレートのコアが採れたということは、2mぐらいのハイドレートの層が海底下に

あったということを示しています。これは去年の話です。今年はこれと同じような調査をさらに広く展開していますので、結果が間もなく、なるべく早く皆さんにお見せしたいと思っています。

メタンハイドレートは海底下のマウンドの中に詰まっています。このアナロジーが北極にあるのです。カナダのマッケンジー、北極海地方には、ピンゴという山の中に氷がたまっています（図 13）。これは水を吸い上げながら凍っていくのですが、これと同じような、ちょうどこういう光景が海底にあると考えるといいと思います。

4. 表層型メタンハイドレートの資源開発

最後に今後の見通し、資源についての話です。これまでの話でどんな状況にあるかということはお分かりいただけたと思います。ここからは私の考えをお話したいと思います。

一般に資源探査、資源調査というのは三つのフェーズがあります（図 14）。最初は学術調査、これは研究者が全くの好奇心で調査を始めます。その中に、時には有用鉱物があったり、これはいけるといふものがあることもあります。それを国が、場合によっては民間が聞き及んで資源量の探査をし、それで良ければ次の段階、試掘、あるいは生産試験という段階に入っていきます。

そこでうまくいけば商業生産にいくということですが、表層型メタンハイドレートについては、先ほど申し上げたように、資源量把握が2013～2015年の3年間程度でやるというフェーズ2にあります。フェーズ2での成果いかんによって、フェーズ3の試掘あるいは生産試験にいくかどうかが決まるのですが、まだこれは全く分かりません。一方、南海トラフの砂層型については、フェーズ2は終わり、今、フェーズ3に入って、生産試験を2013年にやり、さらに来年、再来年やるという話を聞いています。

別の視点で言いますと、エネルギー資源の開発について、石油・天然ガス、石炭がありますが、石炭は固体です。石油・天然ガスは流体ですから、これは流動する、場合によっては自噴する。そうい

うものの開発と固体の開発はおのずから違ってきます。メタンハイドレートはガスで、天然ガスの一つの形態ですから、これはどうしても頭の中では天然ガスの開発のような捉え方をしがちです。ところこれは固体ですから、石炭のような取り扱いも必要ではないかと思えます(図 15)。

固体ではあるけれども、それを強制的に流体化する、石炭もそういうことはありますが、それは砂層型がやっています。これは 300m の海底から固体として採ることは不可能なので、強制的に海底下でガスにしてしまいます。そのためにさまざまな工夫や仕掛けが必要で、困難もあるわけです。

それに対して、表層型は表層近くにありますが、そこでガスにしてしまったら海水に逃げてしまう。むしろ固体として回収することが一つの方法ではないでしょうか。それはそんなに突拍子な話ではありません。海底熱水鉱床、これは最近、沖縄トラフで随分前からやっていますし、もっと近いところではダイヤモンド漂砂鉱床、これも海底から吸い上げています。そういう技術を応用すれば、固体として回収することは可能でしょう。頭を転換して、メタンハイドレートはガスだからそのような方法でということは必ずしもないのではないかと思えます。

表層型メタンハイドレート開発は、現在はフェーズ 2 にあり、資源評価もまだ定まっていません。われわれとしては最大限、全ての海域における総量としてのハイドレート、かつ集中している場所については、どういう格好で入っているのかを詳細に明らかにするという 2 点を今年度中に行いたいと思っているところです。ご清聴ありがとうございます。