

## 様式 C-19

# 科学研究費補助金研究成果報告書

平成21年 5月13日現在

研究種目：基盤研究 B

研究期間：2007 年度 ～ 2008 年度

課題番号：19360086

研究課題名（和文）

海底資源メタンハイドレート回収システムにおける自己ガスリフト効果の検討

研究課題名（英文）

Study on Self Gas-Lift Effects of Methane Hydrate Recovery System

研究代表者

峯元 雅樹 (MINEMOTO MASAKI)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：10315103

研究成果の概要：

深海底からのメタンハイドレートを回収するシステムとしてガスリフト法を提案し、その実用化及び高性能化を大型実験装置および数値解析により検討した。H19年度には、塔長5.5m、管径23cmのガスリフト装置を作成し、吹き込みガス量と上昇液流量の関係を測定した。従来の申請者等が行った管径10cmの装置に対して最大で約7倍の流量が得られることが分かった。また、比重1.4のプラスチック球を模擬ハイドレートに見立てて下部タンクに約500個配置したところ、上昇流と共に吸い上げ・回収が可能であることを確認した。H20年度には管径5cmのガスリフト装置を追加作製し、液空塔速度は管径の違いによらず、ほぼガス空塔速度の関数としてあらわすことができることが分かった。これらの実験結果を独自に開発した一次元の二相流解析コードとの比較を行った結果、低流量領域では若干のずれが生じるものの、実験結果と数値解析結果は定量的に一致した。さらに回収管下端部の最適形状を決定するため、差分法に乱流モデルを組み込んだ流動解析と、離散粒子法を用いた模擬ハイドレートの粒子挙動解析の連成解析コードを開発し、回収されるメタンハイドレートの挙動及び回収性能を予想した。その結果、実機規模（管径1m）の回収管下端形状は45度程度の傘形状とすることで、最も効率よくハイドレート塊を回収可能であることを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
20年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
年度			
総計	9,100,000	2,730,000	11,830,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：流体工学

キーワード：混相流、メタンハイドレート、ガスリフト方式、数値解析

## 1. 研究開始当初の背景

我国は資源に乏しく、中でもエネルギー資源は大部分を海外に頼っている。近年、メタンガスが日本近海の 1000m 以上の深海底に水と結合した固体のメタンハイドレート（MH）の形で大量に存在することが明らかになっており、将来の有望なエネルギー資源として注目されている。このメタンハイドレートは固体であるため、メタンや原油のような回収方法は適用できず、現在温水注入法、減圧法、インヒビター法あるいはガスリフト法などが提案されているが、いずれも一長一短があり最適方式の決定までには至っていない。評価のポイントはハイドレート回収に要するエネルギーが少ないこと、システムを安定して運転できること、安全であることなどが考えられるが、申請者らはこの中でも必要な熱源や動力源を少なくでき、かつ安定した運転が可能と期待されるガスリフト法に注目した。ガスリフト法は、図 1 に示すように回収管を海面から海底に降ろし、回収管途中に圧縮した気体を吹き込むことで海水の上昇流を発生させ、上昇流に巻き込まれた固体ハイドレートを回収する方法である。このガスリフト方式では、固体状のメタンハイドレートを含む土砂塊をそのまま回収管内に吸い込むため、地層内でのメタンガスの周囲への拡散を考慮する必要がなく、吹き込むガスに回収したメタンガスの一部を用いるとすると、経済的にも優れた回収システムとなりうる利点がある。

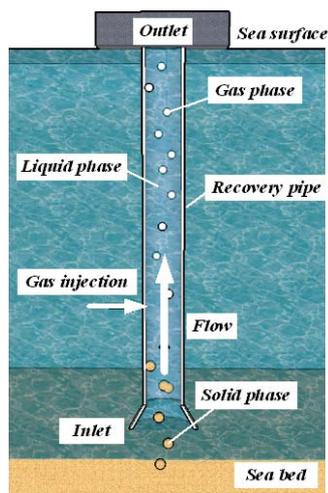


図 1 ガスリフト法概念図

これまで回収管内全体のマクロな流動と

ハイドレートの分解・ガス化に注目したミクロな流動を連成させた数値計算と実験より以下の成果を得ている。

- ハイドレート静止時の分解速度データの取得。
- 回収管長 4m 程度、管径 0.1m の小型実験装置より、安定した模擬ハイドレートの吸い上げが可能であることの確認。
- 数値シミュレーションにより、実機サイズの装置運用が経済的に成り立つことの確認および最適操作条件の推定。

しかし、本手法の経済性・安定性をさらに高めるためには、配管内部および配管下部の気固液三相流の挙動、ハイドレート上昇時の分解速度データ、吸い込み口近傍の流体と固体ハイドレートの挙動およびスケールアップの影響などをさらに精度良く見積もる必要があることが分かった。

## 2. 研究の目的

本研究では、上記の課題を踏まえて特に以下の 2 点を重点的に検討する。

### 1. 回収管の管長・管径が数値計算結果の妥当性に与える影響の検討

申請者の作成した気固液三相流数値シミュレーションコードでは、固体のハイドレートが分解・ガス化し、配管内を上昇する際の圧力変化によって膨張する挙動を解析できる。解析結果は回収管長 4m 程度、管径 0.1m の小型実験装置による試験による良い一致を得ている。しかし、実際に想定される配管長は 1000m、管径は 1m 程度と予想され、管径の影響および配管内の圧力変化が支配的な場合の解析結果の妥当性の検証が必要であると考え、さらに大型の装置による検証を行う。

### 2. 管下端の最適形状の決定

ガスリフト方式では、海底の岩盤下にあるメタンハイドレート貯留層に掘削機などで機械的擾乱を与えて粉碎し、0.1 m 以下の固体となったメタンハイドレートを吸い上げることを想定している。この方法では、坑井での熱損失がほとんどないことや、分解に必要なエネルギーが少ないことが利点となる。しかし、この方法を今後具体化していくためには、回収管の下端の形状などを工夫し、効率よくメタンハイドレートを吸い上げる必要がある。そこで、回収管下端部の流れの可視化と流動解析を行い、回収管下部の最適形状や操作条件を求める。

以上の実験と解析により、コスト最小化のための最適ガス吹き込み位置・気泡径・回収管径の検討ガス化したメタンの駆動源としての利用可能性の検討を行い、深海底からのメタンハイドレート高効率回収システムを提案することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 大型装置による実験

図2 (a), (b)にガスリフト実験装置の概略と写真を示す。上昇(回収)管(I)と、下降管(II)が、その上端・下端で水槽によって接続された構造をしている。実験は回収管の直径が0.05m, 0.1m, 0.23m, 管長Lが約5.5mについて行なった。回収管には1m間隔で、合計4箇所の壁面に圧縮空気吹き込み用のポートが設置してあり、コンプレッサで加圧した空気マスフローメータ(IV)で流量を測定した後、このポートより吹き込む。上昇流の流量は回収管の下部に設置した電磁流量計(V)で測定した。さらに、吹き込み後定常時の静水面をはかるために、別途専用のパイプ(III)を設置し、この水位より浸水率 $\gamma$ を $L_s/L$ と定義した。

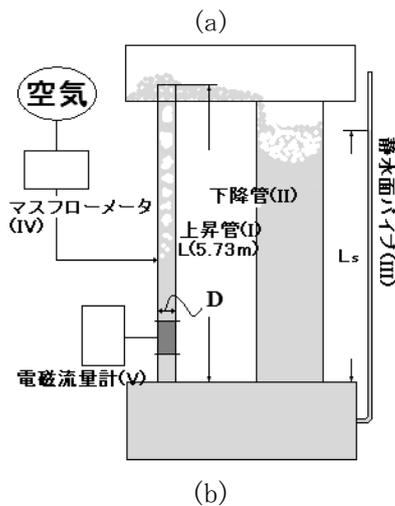


図2 実験装置の概念図と写真

また、下部の水槽には、ハイドレートを模擬した密度 $1100\text{kg/m}^3$ と $1400\text{kg/m}^3$ 、直径10mmのプラスチック球を約500個充填し、回収管入口部より吸入される様子を観察した。

#### (2) 数値解析

対象とする流動場は乱流で三次元性が顕著であるため、三次元円筒座標系格子を用いた非圧縮性解析を行った。基礎式に連続の式とNavier-Stokes方程式を用い、乱流の空間平均モデルのLESモデルを連立させて解いた。この流動場を計算しながら、メタンハイドレート塊を模擬した粒子挙動解析を行った。図3にモデルを示す。離散要素法(Discrete Element Method)を用い、球を仮定した粒子間の衝突に弾性バネ、粘性ダッシュポット、摩擦スライダの効果を検討に入れた。さらに粒子が流体から受けた力を流体側へフィードバックすることにより、粒子が流体に与える影響を考慮した。さらに、上記のより得られる、回収管下部で吸入されるハイドレートの割合に基づいて、ハイドレート分解を考慮に入れた非定常次元回収管内気固液三相流解析を回収管全体について行った。基礎方程式に物質収支式、運動量収支式、液相のエネルギー収支式、体積分率の関係式、気体の状態方程式を用い、当研究室の実験より得られたハイドレートの分解速度を考慮した。

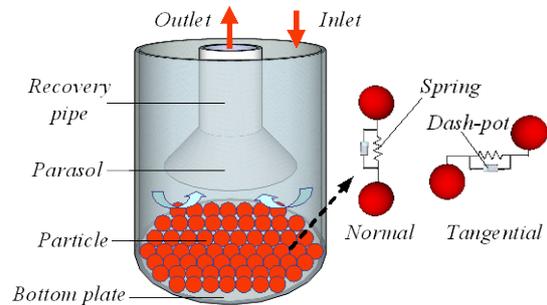


図3 回収管下端部の流動解析のモデル

### 4. 研究成果

#### (1) 大型装置による実験

図4に上昇流の空塔速度 $U_1$ と吹き込みガス空塔速度 $U_g$ の関係を、管直径と浸水率で整理したものを示す。空塔速度は測定した流量を回収管の断面積で割った値と定義した。図4から吹き込みガス流量の増加とともに、上昇流の速度が増加していることが分かる。異なる管径で同一の浸水率を比較すると、ややばらつきは大きいものの、ほぼ同一の線上にあることから、管径よりも、浸水率が上昇流の流速に与える影響が大きいことが分かった。また、管直径が0.23mで、ガス空塔速度 $U_g=0.98\text{ m/s}$ 時の下部水

槽内の模擬ハイドロートの挙動を図5に示す。図中の赤色と黒色の球が模擬ハイドロートで、回収管の下端部より吸入される様子が確認できた。

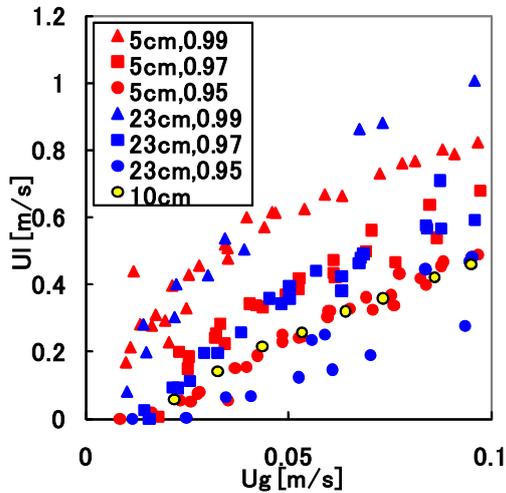


図4 上昇流の空塔速度  $U_1$  と吹き込みガス空塔速度  $U_g$  の関係



図5 下部水槽内の模擬ハイドロートの挙動

## (2) 数値解析

実機規模での回収性を予測するため、管径 1m のガスリフトシステムを想定して最適な回収管下端部形状の検討を行った。回収管下端部の形状はかさの角度  $45^\circ$ 、かさの高さ  $b=0.4\sim 0.8\text{m}$  とし、直径 0.1m、密度  $1500\text{kg/m}^3$  の粒子を回収管下端部から 0.3m の距離に 1層配置した。図6に回収結果の一例を示す。図中の矢印は流速ベクトルを表しており、粒子は管壁に沿って同心円状に回収されている。この数値解析結果の妥当性は別途行った実験との比較より確認した。図7に回収管下端部形状による管内に流入してくる固相割合  $r_s$  を示す。固相割合は実時間で 5秒間に回収された粒子数より求めた。管内流速  $u_{in}=6\text{m/s}$  以上では下端部形状による回収性能への影響は見られないが、

かさの高さ  $b=0.8\text{m}$ 、管内流速  $4\text{m/s}$  の条件では回収性能が大幅に低下している。管内流速の増加はコストの増加につながり、なるべく小さい管内流速で粒子を回収することが望まれるため、管径 1m のガスリフトシステムにおける最適な下端部形状は、かさの角度  $45^\circ$ 、かさの高さ  $0.4\sim 0.6\text{m}$  であり、その場合の固相割合は約 2.1%程度となることが分かった。

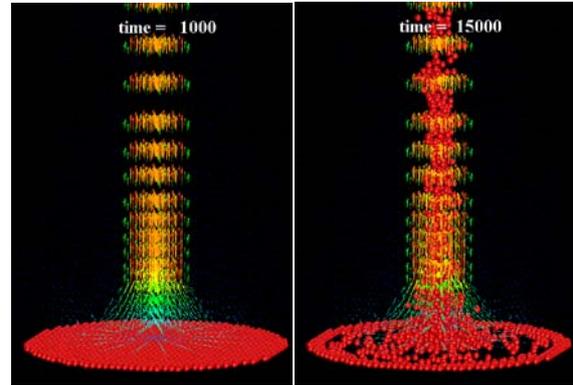


図6 解析結果の一例 ( $b=0.6\text{m}$ ,  $u_{in}=6\text{m/s}$ )

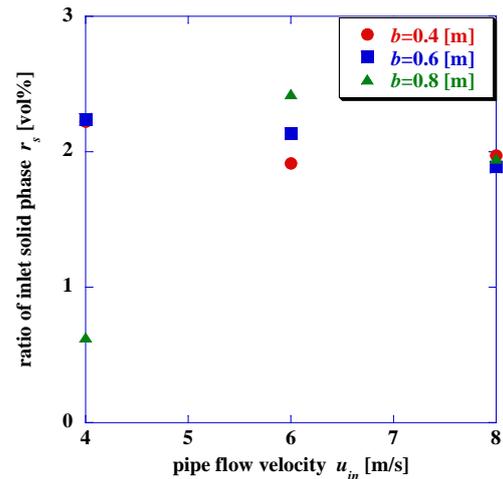


図7 かさの高さが回収性能に及ぼす影響

上述の解析より得られた管内に流入してくる固相割合を境界条件として、気固液三相流解析を行った。図8にエネルギー消費率  $r_{energy}$  を示す。ここでエネルギー消費率は、コンプレッサの所要動力を回収されたメタンガスより得られる電力量で割った値で定義した。このエネルギー消費率が小さい値を示すほど自己ガスリフト効果が期待でき、経済性に優れていることを示している。また、自己ガスリフト効果の影響をみるため、管内で固相が分解しない条件での結果も示している。ハイドロートの分解率は粒子径及び管内の滞在時間に依存し、管内流速が小さく粒子径が小さい条件において高い分解率を示すため、粒子径  $0.025\text{m}$ 、

管内流速 4m/s の条件ではガスを吹き込む必要はなく、自己ガスリフト効果のみでハイドレートが回収できることが分かった。以上の結果より、実機システムの操作条件として管内流速は 4m/s 程度が望ましいと考えられる。

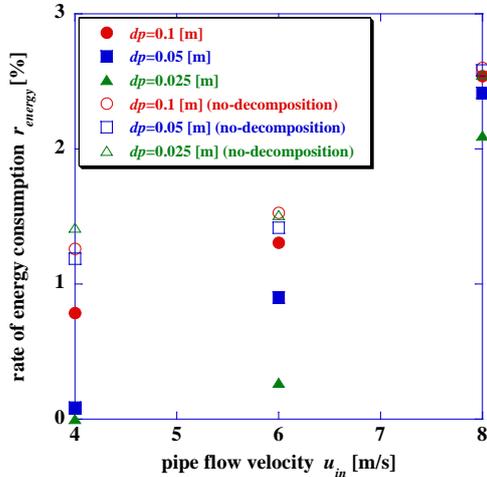


図8 エネルギー消費率と管内流速

表1に固相割合を2%とした場合の液・固相流速及びハイドレート分解率を示す。色のついた部分は管内流速 4m/s 以上の上昇流が発生する条件を示しており、斜線部分では自己ガスリフトのみで粒子が回収できない条件を示している。粒子径が小さくハイドレート含有率が高いほど自己ガスリフト効果が期待でき、管内流速 4m/s を達成するためには最大 0.025m までメタンハイドレートを砕く必要があると考えられる。

表1 液・固相流速及びハイドレート分解率

$\Phi_{hydrate}$ [vol%]	diameter of solid phase $dp$ [m]			
	0.01	0.025	0.05	0.1
50	$u_l=7.07\text{m/s}$ $u_s=6.72\text{m/s}$ $\Phi_{decomp}=100.0\%$	$u_l=5.25\text{m/s}$ $u_s=4.68\text{m/s}$ $\Phi_{decomp}=87.4\%$	$u_l=3.63\text{m/s}$ $u_s=2.81\text{m/s}$ $\Phi_{decomp}=64.6\%$	$u_l=2.14\text{m/s}$ $u_s=0.98\text{m/s}$ $\Phi_{decomp}=65.0\%$
30	$u_l=6.24\text{m/s}$ $u_s=5.80\text{m/s}$ $\Phi_{decomp}=100.0\%$	$u_l=5.02\text{m/s}$ $u_s=4.32\text{m/s}$ $\Phi_{decomp}=100.0\%$	$u_l=3.41\text{m/s}$ $u_s=2.41\text{m/s}$ $\Phi_{decomp}=91.0\%$	
10	$u_l=3.58\text{m/s}$ $u_s=3.06\text{m/s}$ $\Phi_{decomp}=100.0\%$	$u_l=3.42\text{m/s}$ $u_s=2.59\text{m/s}$ $\Phi_{decomp}=100.0\%$		

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計2件)

- ① 松隈洋介, 盛永準, 西村勇毅, 井上元, 峯元雅樹, ガスリフトによるメタンハイドレート回収システムにおける回収管下端形状の検討, 化学工学論文集, 33-6, pp.599-605, (2007), 有

- ② 峯元雅樹, 松隈洋介, ガスリフトによる海底からのメタンハイドレート回収システムの開発、計測と制御、47-10, pp.849-855, (2008)、無

〔学会発表〕 (計7件)

- ① 松隈洋介, 峯元雅樹, 井上元 ガスリフトによるメタンハイドレート回収における回収管内流動と回収管下端部形状の検討, 第16回日本エネルギー学会, 2007
- ② 三輪真裕, 松隈洋介, 井上元, 峯元雅樹, ガスリフトを利用したメタンハイドレート回収システム高性能化の研究, 化学工学会秋季大会, 2007
- ③ 井上宗一郎, ガスリフト方式によるメタンハイドレート回収の基礎的実験, 化学工学会学生発表会, 2008
- ④ S.HIRONAKA, M.MIWA, Y.MATSUKUMA, G.INOUE and M. MINEMOTO, Comparison between Experimental Data and Numerical Prediction on Two-Phase Flow in Riser Pipe of Gas Lift System, The 21st International Symposium on Chemical Engineering, 2008
- ⑤ Y.MATSUKUMA, G.INOUE and M. MINEMOTO, Study of Recovery System of Methane Hydrate Using Gas Lift Method, International Conference on Gas Hydrates 2008
- ⑥ 三輪 真裕, 井上 元, 松隈 洋介, 峯元 雅樹, DEMによるメタンハイドレート回収システムの流動・粒子挙動解析, 第45回九州地区化学関連支部合同九州大会, 2008
- ⑦ 三輪 真裕, 井上 元, 松隈 洋介, 峯元 雅樹, DEMによるメタンハイドレート回収システムの流動・粒子挙動解析, 第18回九州地区若手ケミカルエンジニア討論会

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

峯元 雅樹 (MINEMOTO MASAKI )  
九州大学・工学研究院・教授  
研究者番号：10315103

### (2) 研究分担者

松隈 洋介 (MATSUKUMA YOSUKE )  
九州大学・工学研究院・准教授  
研究者番号：70282241  
井上 元 (INOUE GEN )  
九州大学・工学研究院・助教  
研究者番号：40336003  
宮入 嘉夫 (MIYAIRI YOSHIO )  
九州共立大学・工学部・教授  
研究者番号：10309734