

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14266

研究課題名(和文) ガス資源探掘のための海底地盤の力学的挙動の解明のための数値計算手法の開発

研究課題名(英文) Development of calculation procedure for resolving the mechanism of soil deformation in collecting gas resources under the sea bed

研究代表者

吉川 孝男 (Yoshikawa, Takao)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：50380572

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：汎用FE解析ソフトMSC.Marcの非定常熱伝導解析機能を用いて、圧力を温度に、間隙間の流量を熱量に、透水係数を熱伝導率に、間隙水の圧縮率を比熱に読み替えることで地層の間隙水の移動について計算した。また、個別要素法を利用し、間隙間の水の移動と間隙内の水の圧力の変化について、透水係数を用いて計算する手法についても検討し、計算プログラムを作成した。両者の計算結果が一致することも確認済みである。また、透水試験結果とシミュレーション計算結果と比較して、数値シミュレーションの精度確認を行った。得られた間隙の圧力分布の時間変化を、個別要素法における土壌を表す粒子に与えて、地層の変形挙動を追跡した。

研究成果の概要(英文)：The hydraulic fracturing technique of geological layer has been developed for collecting shale gas and shale oil, and it has become to be possible to collect the resources which cannot be utilizing before. In this paper, the mechanism of the fracture behavior of geological layer or rock stratum is investigate by numerical simulation utilizing the general purpose FE software and home-made program applying DEM. At first, the change of pressure distribution is calculated by simulating the flow of water in geological layer when the high pressurized water is installed at bottom of the production well. In this simulation, the diffusion problem of water due to the pressure gradient is replaced by the heat diffusion problem. Then, the validity of this simulation is tried to verify through experiment. Moreover, the pressure distribution obtained by FEM is loaded into DEM program and the fracture behavior of geological layer due to pressure gradient is simulated.

研究分野：船体構造強度

 キーワード：間隙水 海底地盤 水圧破壊 コールベットメタン メタンgハイドレート シェールガス 資源採取  
シミュレーション技術

## 1. 研究開始当初の背景

海底下で石油ガスを採掘する際には、資源量のみならず地中におけるガス成分の浸透率の大小が採取量に大きく影響する。このため、シェールガスの採取では、水圧破壊（高水圧を負荷して地層にき裂を生じさせる技術）によって浸透率の向上を図り、従来資源化できなかったシェールガスが資源化できるようになってきている。この技術では高水圧を負荷することによって生成したき裂内に、砂状の物質を圧入することによって高い浸透率を確保しつつ、き裂が再び閉じないようにしている。これらの挙動は、対象となる地層、ならびにその力学的な特性（初期応力、粒径分布、かさ密度、ガス密度、間隙水の量など）によって変化するものと考えられるが、それらの値がわかれば数値計算を用いてどの程度の間隔で水圧破壊を実施すればよいか、また、砂状物質を効率的にき裂内に挿入するにはどのような手法が有用かを推定することが可能となるものとする。残念ながら現在のところわが国では有望なシェールガスは見つかってはいるが、申請者は（一般財団法人）九州地域活性化センターなどととも、九州地区での海底資源開発の実現性に関する調査を H25 年度に行い、九州近海（特に西彼杵沖）での CBM（石炭由来メタンガス）の採取がメタンハイドレードなどに先駆けて国産のエネルギー資源として採取可能であるとの調査報告を行っている。（九州地区には水深 150～200m の海底下 200～300m の低深度域に炭層が多くあり、海外で実用化しつつある CBM の採掘が国内でも可能である。）その CBM の採取においても炭層内のメタンガスの浸透率を如何に正確に評価できるかが重要であり、また、浸透率を向上させるためにシェールガス採取でも行われる炭層内の水圧破壊とその影響評価を正確に行うことが採算性向上に必要不可欠な技術である。

## 2. 研究の目的

海底下のエネルギー資源の採取に際して、生産井を地層内に挿入した際の間隙水や資源ガス（メタンガスなど）の移動・拡散現象、ならびにガスと水の混合状態とガスハイドレートとの相変化などを精度よく予測することが、採取できる資源量を精度よく推定するうえで重要となる。本研究では、海底土壌を粒状体でモデル化できる個別要素法プログラムをベースに、間隙水やガス成分の土壌内

での移動・拡散現象を評価できる新しい解析手法を開発する。さらに、地層内の圧力分布と温度分布を併せて時刻歴で計算できるようにし、上記の相変化を追跡できるようにする。また個別要素法の特徴を生かして、地層のガスの浸透率を向上させるために適用する水圧破壊もシミュレートできる機能を追加し、開発プログラムを海底ガス資源の採取量評価に役立てる。

## 3. 研究の方法

ばら積み貨物船の動揺時の鉋石圧評価のために開発した個別要素法による解析手法をベースに

1) 地層内の間隙に存在する水ならびにガスの移動・拡散挙動

2) 水圧破壊による地層内のき裂発生挙動

などをシミュレートできる計算方法を検討、開発し、この機能を個別要素法プログラムに新たに組み込むことによって、最適な生産井の間隔、生産時に投入すべき熱量の予測、資源ガスの生産量の推定が可能な解析技術を構築する。また、解析に必要な物性値を取得するための試験を行うとともに、地層の水圧破壊を模擬した試験を実施し、開発したシミュレーション技術を用いた計算結果と比較することによって、その有用性を確認する。

## 4. 研究成果

(1) 地層内の間隙水ならびにガスの拡散・移動のシミュレーション手法の構築

透水試験の実施

地層内の間隙水ならびにガスの移動・拡散挙動のシミュレーション手法における基礎データを得るために、Fig.1 と Fig.2 に示す定水位透水試験方法を考案し、海底土壌を模擬した地層内の透水圧試験を実施し、対象とした模擬地層の籐水圧を計測した。試験では、まず越流口から排出される水量を確認しながら、一定の水位を保つように透水円筒カラー内に水を注入し、越流する水量の変化を計測する。この際、透水円筒カラーと越流水槽の水位差から、供試体に作用するヘッド差を評価する。

計測結果を Table 1 に示す。4 回の計測結果の平均から、今回の試験で使用した模擬土壌の透水係数は  $5.81 \times 10^{-2} \text{cm/s}$  という結果を得た。この値は、クレーガによる粒径と透水係数の関係と比較して適切であると判断した。

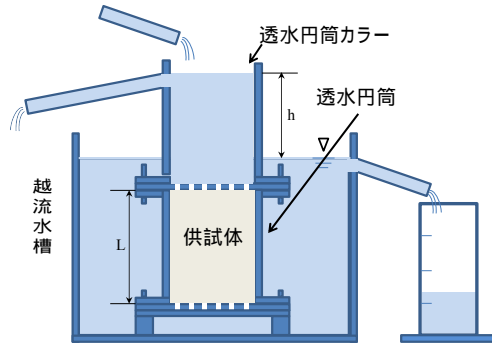


Fig. 1 定水位透水試験概略図

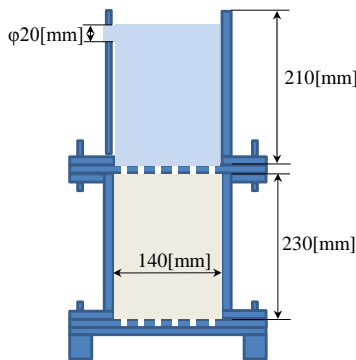


Fig. 2 透水試験装置の主要寸法

Table 1 透水試験における計億結果

測定 No.		1	2	3	4
測定開始時刻	$t_1$	13:36:00	13:40:00	13:43:00	13:46:00
測定終了時刻	$t_2$	13:37:00	13:41:00	13:44:00	13:47:00
測定時間	$(t_2 - t_1)[s]$	60	60	60	60
水位差	$h[cm]$	14.2	14.1	13.9	13.9
透水量	$Q[cm^3]$	515	505	500	500
T に対する透水係数	$K_T[cm/s]$	0.0667	0.0659	0.0662	0.0662
測定時の水温	$T[ ]$	20	20	20	20.5
温度補正係数	$\tau / \tau_{15}$	0.88	0.88	0.88	0.8695
15 に対する透水係数	$K_{15}[cm/s]$	0.0587	0.0580	0.0582	0.0575

### シミュレーション手法の構築

本研究では地層内の間隙に存在する水ならびにガスの移動・拡散挙動のシミュレーション方法として以下の2方法について検討を行った。

- 1) 地層内の間隙に存在する水の移動・拡散現象を汎用 FEM 解析手法の熱伝導解析機能における物性値を読み替えて計算する方法
- 2) 個別要素法を用いて土壌の粒子をモデル化し、粒子間の間隙水の移動を直接的に求めて水圧変化を求める手法

1) の方法では、(1)式の熱伝導方程式と(2)式の

2) 間隙水の時間移動を表す方程式の関係から、Table 2 に示す読み替えを行うと、間隙が水で満たされた後の計算が可能となる。

$$3) \quad \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$k \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \rho \alpha \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2)$$

ここに、 $\lambda$  ; 熱伝導率,  $\rho$  ; 密度,  $c$  ; 比熱

6) しかしながら、間隙が水で満たされる以前の水の移動はそのままでは計算できない。そこで、以下のような方法を考案した。

圧力分布を求める方程式では、熱伝導方程式における熱伝導率が大きく比熱が小さいので瞬時に定常状態に達する。しかし、実際の土中の水の流れを考えると瞬時に定常状態になることは考えられないので圧縮率  $\alpha$  の値をうまく設定することで実際の水の流れに近い解析ができるようにする。

(1)式の熱伝導方程式における右辺  $Q = \rho c \Delta T$  は微小体積(単位体積)が蓄えることのできる熱量を表す。また、(2)式の間隙水の時間移動を表す方程式の右辺  $Q = \rho \alpha \Delta P$  [N/mm<sup>3</sup>]は微小体積(単位体積)に流入する水の質量を表す。ここでいう微小体積とは土の粒子と間隙を含む体積のことである。仮に微小体積がすべて間隙であれば水の密度から  $Q = 9.8 \times 10^{-6}$  [N/mm<sup>3</sup>]と表すことができるが、例えば間隙率の測定値が 31.9%であるとすると  $Q$  の値は  $Q = 3.13 \times 10^{-6}$  [N/mm<sup>3</sup>]となり、供試体のある単位体積 1[mm<sup>3</sup>]には  $3.13 \times 10^{-6}$  [N]の水が流入するだけの容量があることとなる。

Fig. 3 は汎用 FEM ソフト MSC.Marc の熱解析機能で設定できる温度(圧力)と比熱(圧縮率)の関係を示したものであり、圧力が  $P_0$  以上になったときに間隙が水で満たされた状態を表し、 $0 < P < P_0$  の時に間隙に水が一部存在する状態を表している。

Fig. 3 の斜線部の面積が微小間隙体積(単位体積)に流入する水の質量  $Q$  であるので、この値が  $3.13 \times 10^{-6}$  [N/mm<sup>3</sup>]となったときに間隙が水で満たされたと考える。ここで、間隙が水で満たされるまでは間隙圧は大気圧(ここでは  $0$  [N/mm<sup>2</sup>]と設定)と等しいと仮定しているので、間隙がちょうど水で満たされたときの圧力である  $P_0$  の値は  $0$  に近い値に設定する必要がある。ここでは  $P_0 = 0.00001$  [N/mm<sup>2</sup>]とする。

これより、斜線部の面積を求める式

$$Q = \rho \int_0^{P_0} \alpha \frac{P_0 - P}{P_0} dp \quad (3)$$

から  $\alpha_0$  の値を設定することができる。ここから式(3)を解き図 3 中  $\alpha_0$  の値を求めると

$$\alpha_0 = 63843.4 \text{ [mm}^2/\text{N]}$$

となる。

また、水の圧縮率は通常は  $0.457 \times 10^{-3} [\text{mm}^2/\text{N}]$  である。本来圧縮率は間隙部に定義されるが FEM では要素全体に定義するので解析の条件が実際よりも大きな圧縮率を与えることになる。そこで間隙率 31.9% ということを考慮し、水の圧縮率を 0.319 倍した  $0.152 \times 10^{-3} [\text{mm}^2/\text{N}]$  を要素に定義する。

上記手法を用いて計算した圧力、および流量の時間履歴を Fig.4 と Fig.5 に示す。

Table 2 パラメーター換算表

熱伝導方程式		圧力分布
熱伝導率 $\lambda$		透水計数 $k$
温度 $T$		圧力 $P$
比熱 $c$		圧縮率 $\alpha$

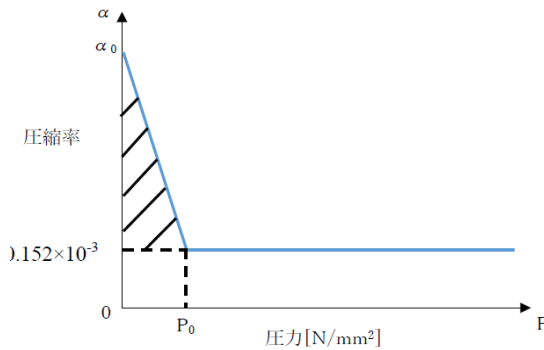


Fig.3 圧力 - 圧縮率関係図

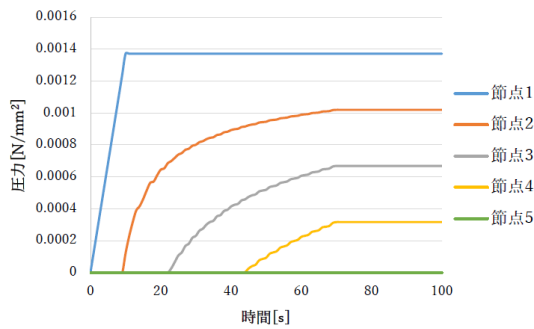


Fig.4 圧力の時間履歴の計算結果

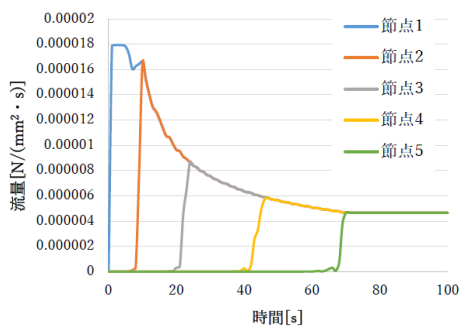


Fig.5 流量の時間履歴の計算結果

### 圧力拡散シミュレーションについて

Fig.6 に示すような圧力の拡散実験を予定しており、これのシミュレーション計算を実施している。Fig.6 は掘削井戸から地盤に水圧をかけて地盤内の圧力がどのように時間変化していくかを調べる試験である。乾いた土を入れた容器底部からパイプを通して高さ  $H[\text{m}]$  のヘッド差により水が拡散する試験を行う。Fig.8 は、Fig.7 に示した測定点での圧力の時間変化を示している

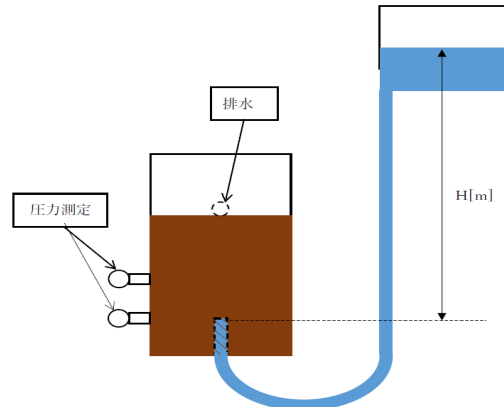


Fig.6 圧力拡散概要

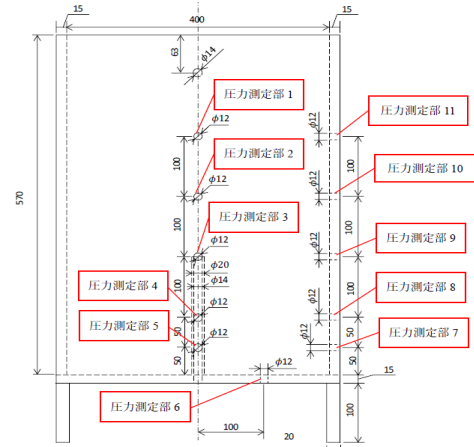


Fig.7 圧力測定位置

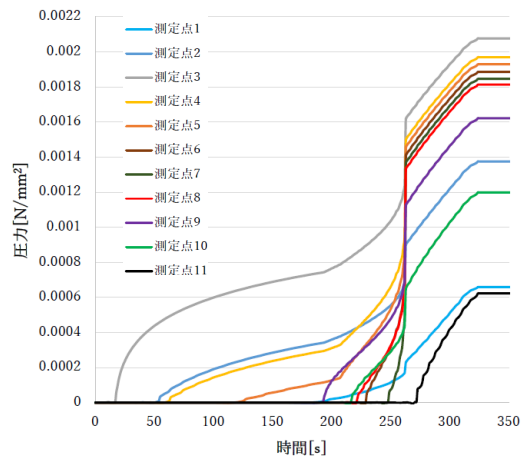


Fig.8 圧力計設置位置における圧力履歴

次に、(2)の手法の説明を以下に行う。

まず、地層内の粒子分布を Fig.9 に示すように個別要素法を用いて円形粒子の集合にモデル化する。この際、粒子径は平均粒子径を中心にランダムに変化させる。粒子の配置に応じて、間隙の面積、隣接間隙間の流路面積と流路長を求め、これらを用いて間隙間を流れる水の流量を (4)、(5)式を用いて計算する。

$$Q = \frac{(P_l - P_k)}{L_{kl} \gamma_w} K \cdot S_{kl} \cdot \Delta t \cdot \dots (4)$$

ここに、

$P_l, P_k$ ; 間隙 l, k の水圧 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $\gamma_w$ ; 水の単位体積重量 (N/mm<sup>3</sup>)  
 $K$ ; 透水係数 (mm/s),  $S_{kl}$ ; 流路断面積 (mm)  
 $L_{kl}$ ; 間隙 l, k 間流路長 (mm),  $\Delta t$ ; 時間間隔

更に間隙の水圧を以下の(5)式で計算する。

$$[P_i]_{t+\Delta t} = [P_i]_t + E_w \left[ \frac{\sum Q}{W_i} \right] \cdot \dots (5)$$

なお、本手法で求めた定水位透水試験における圧力および流量の時間履歴の計算結果は(1)の手法で求めた結果と一致していることを確認している。

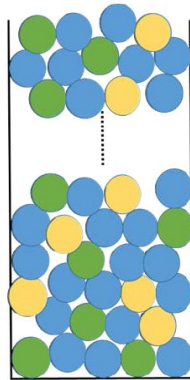


Fig.9 個別要素法を用いた粒子モデル化例

### (2)水圧破壊による地層内のき裂発生挙動の評価手法の構築

油井管などから地層内に加圧した水を投入し、割れ目を形成するシミュレーション手法を構築することが本研究の最終目的であり、地層内での割れ目の形成過程のシミュレーション技術について検討を行った。

まず、本研究では炭層内のき裂の大きさと分布を仮定し、この内部に圧力が加わった状態を個別要素法で再現することによって、き裂の成長、および合体の現象がシミュレート可能かを調べる。なお、炭層内のき裂は、地震探査法により炭層からの反射波を調べることによって、おおよその分布は調査可能であると考えられる。また、き裂の発生の限界圧に関しては対象とする炭層によって大きく変化するものと考えられ、その値を正確に評価するためには実験によるデータ取得が不可欠と考えられるが、本研究ではその値を仮定して計算を進める。

個別要素法プログラムでは粒子間に作用する力の大きさでき裂の発生の有無を判定し、き裂が発生すれば粒子間の結合条件を外すことによってき裂の進展挙動を計算できる。計算では、一旦き裂が成長した際にそれが進展し続けるにはどの程度の加圧水量が必要であるか、あるいは、生じるき裂の開口の大きさがどの程度になるかなどを予測する。また、加圧時の昇圧時間の長短によってき裂周囲の圧力分布に差異が生じると想定され、それによってどのように進展量に違いが生じるかなどを、間隙圧の時間変化をシミュレートすることによって調べ、動的加圧の効果などを定性的に調べる。これまでに、(1)で構築した地層内の間隙に存在する水ならびにガスの移動・拡散挙動のシミュレーション手法を用いて、地層内の圧力分布の履歴が求められるようになったが、求めた圧力を Fig.10 に模式的に示すように粒径の異なる円形粒子でモデル化した地層内の各粒子に作用させ、その変形挙動が計算できる個別要素法プログラムを構築した。個別要素法プログラムの概要については、以下の発表論文などを参考にされたい。

参考文献; Study on the ore pressure under the repeated rolling motion, Kenichiro Kashizako, Masahiro Maeda, Takao Yoshikawa, Proceedings of the 28th Asian Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, pp267-275, 2014

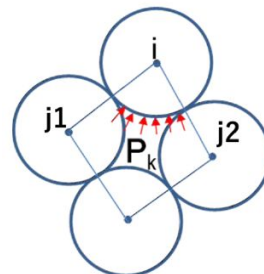


Fig.10 個々の粒子に間隙から作用する圧力

計算結果を H29 年度に実施予定の模擬地層を用いたき裂形成試験の結果と比較し、解析手法の妥当性を検証することを計画している。また、発生したき裂内に砂状の物質を圧入し、減圧時に再びき裂が閉じようとした際にもガスの流路を確保して浸透率の減少を防止する手法が採られるが、その効果についても、本研究で開発した機能を有する個別要素法プログラムで調べることができると考えている。

なお、これまでの研究成果については、2017 年 9 月開催の 31st Asian Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures にて発表の予定である。

5. 主な発表論文等  
 [雑誌論文](計 0 件)

〔学会発表〕(計0件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉川 孝男 (YOASHIKAWA Takao)

九州大学大学院・工学研究院・教授

研究者番号：50380572

### (2) 研究分担者

前田 正広 (Maeda Masahiro)

九州大学大学院・工学研究院・助教

研究者番号：70173713

### (3) 連携研究者

なし