論 説
 Original Article

メタンハイドレート生産シミュレータの開発

栗原 正典*・船津 邦浩*・大内 久尚*・増田 昌敬**・成田 英夫***・海老沼孝郎***

(Received June 6, 2009 ; accepted September 4, 2009)

Development of numerical simulator predicting methane hydrate dissociation and production

Masanori Kurihara, Kunihiro Funatsu, Hisanao Ouchi, Yoshihiro Masuda, Hideo Narita and Takao Ebinuma

Abstract : Methane hydrate (MH) is being highlighted as next-generation hydrocarbon resources mainly because of its huge in place and cleanness. The Research Consortium for Methane Hydrate Resources in Japan (MH21 Research Consortium), which was organized to attain the exploration and exploitation of MH resources, has been implementing a variety of research projects. As part of such research projects, we have been developing a state-of-the-art numerical simulator (called 'MH21-HYDRES') for rigorously predicting MH dissociation and production performances. The main functions of this simulator and the efforts toward improving and verifying this simulator are introduced in this paper.

The gas production from MH reservoirs is significantly different from that from conventional oil and gas reservoirs in terms of the mechanism and the phenomena, since (1) MH is a solid, (2) reservoir behaviors are associated with the chemical reactions such as MH dissociation/formation, and (3) reservoir properties, especially permeability, change drastically by MH dissociation. Therefore, it is impossible to predict MH reservoir performances by conventional oil and gas reservoir simulators, which lead to the development of the own numerical simulator specialized for MH reservoirs.

Currently MH21-HYDRES can be applied to three-dimensional Cartesian and two-dimensional radial coordinate systems. This simulator can also deal with six components of methane, water, nitrogen, carbon dioxide, methanol and salt, and with five phases of gas, water, ice, MH and (precipitated) salt. The main features of this simulator are to calculate the kinetics of endothermic dissociation and exothermic formation reactions of MH as well as multi-phase flow behaviors resulting from these reactions. The simulator divides a target reservoir into multiple grid blocks, for which the pressure, temperature, water saturation, methanol and salt mass fractions, etc. are calculated solving the system of discretized non-linear equations for the component mass conservation and the overall energy conservation.

To shorten the computational time, it is preferable to reduce the total number of grid blocks and hence to increase the size of grid blocks. On the other hand, larger grid blocks result in more significant numerical errors, which is more serious in a MH simulator than in a conventional oil and gas simulator. To resolve these problems inconsistent with each other, the Dynamic Local Grid Refinement (DLGR) function was incorporated into the simulator. DLGR enables a shorter computational time without reducing the accuracy of prediction, by allocating fine grid blocks only to the regions of importance where MH is being dissociated/formed at every time step. In addition, we are attempting to parallelize MH21-HYDRES utilizing the published MPI (message passing interface) and the parallelized solver for a linear equation system. Although the parallelized MH21-HYDRES is still in the prototype stage, using four processors, we could successfully achieve the computational speed that is about three times faster in comparison with serial processing.

The international code comparison for MH simulators is being held, led by National Energy Technology Laboratory and U.S. Geological Survey. We are participating in this comparison to verify the performances of MH21-HYDRES. Although other simulators in this project show the deficiency for complex and large scale problems, MH21-HYDRES could provide reasonable solutions from the view point of the stability and robustness as well as the accuracy of calculated results, which may manifest the successful coding of this simulator.

Keywords : methane hydrate, numerical simulator, local grid refinement, parallelization, comparative study

1. はじめに

メタンハイドレート (MH) は資源量が大きいこと、クリーンなエネルギーであることから、次世代の炭化水素資

源として脚光を浴びている (Moridis ら, 2008)。しかしながら、MH は固体で流動性がなく、かつ分解することによって外部の熱を奪うため、MH の分解・生産には困難を伴う。この MH を資源として探鉱・開発するために、「メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム」(通称「MH21 研究コンソーシアム」) が設立され、MH 貯留層から高い生産性と経済性を有した天然ガスを生産する技術を確認す

* 日本オイルエンジニアリング㈱ Japan Oil Engineering Co., Ltd.

** 東京大学 School of Engineering, The University of Tokyo

*** (独) 産業技術総合研究所 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

るために、室内実験、フィールド産出試験を含め、多岐にわたる MH の分解・採取技術の研究開発が実施されている。

なかでも数値シミュレーションは、任意の MH 貯留層特性を想定し、比較的短時間で MH の分解・生産挙動を予測することが可能なため、室内実験やフィールド産出試験の設計、挙動予測、結果の解析のみならず、MH 分解・生産機構の把握や最適な MH 分解・採取法の模索などにも広く利用できると期待されている。そこで、MH21 研究コンソーシアムの研究の一環として、筆者らは数値計算によって MH の分解・生産挙動を予測する最先端のシミュレータ（通称「MH21-HYDRES」）を開発し、実験やフィールド産出試験の設計、解析、などを含めたシミュレーションスタディに利用している。一方で、実験、試験などをおとして MH 分解・採取機構が徐々に解明されてきており、これに伴ってシミュレータでさらに取り扱うべき物理現象や改良・付加すべき計算機能も明確になりつつある。筆者らは、これらの現象や機能を反映すべく、シミュレータの改良・強化も継続的に実施している。さらには、MH の分解・生産挙動を予測することが可能な世界の先端シミュレータによって同一問題を解き、その結果を比較・考察する国際 MH シミュレータ比較プロジェクトが開催されている。MH21-HYDRES もそのプロジェクトに参加して、その計算結果を他のシミュレータの計算結果と比較することによって計算の妥当性などを検証してきている。

本稿では、現在開発・改良中の MH21-HYDRES の概要を解説するとともに、機能強化の一環として取り組んでいる計算速度の向上に向けた改良を紹介する。また、国際 MH シミュレータ比較プロジェクトを通したシミュレータの機能検証についても概説する。

2. メタンハイドレート分解・生産挙動予測シミュレータの開発

MH の生産は、対象物が固体であること、MH の分解・生成という化学反応を伴うこと、MH 分解前後で貯留層特性、特に浸透率が大きく変化することなどの点で、油・ガスといった在来型の流体資源の生産とは基本的な機構、現象などが大きく異なる。MH の開発、特に MH の分解・採取法の研究においては、MH 分解・生産挙動を精度良く予測することが不可欠であるが、その挙動は在来型の油・ガス層を対象としたシミュレータでは予測不可能である。そこで、MH21 研究コンソーシアムの設立と同時に、MH の分解・生産挙動予測に特化した数値シミュレータ MH21-HYDRES の開発を開始し、現在では以下の主要機能を持つまでに改良が加えられている。

ここでは、現時点で最新の MH21-HYDRES の概要のみを紹介するが、詳細については Masuda ら（1997, 1999, 2002）および Kurihara ら（2005b）の論文などを参照されたい。

2.1 シミュレータの概要

図 1 に示すように、MH21-HYDRES は、二次元の円筒座標系と三次元の直交・任意座標系に対応して対象媒体をモ

図 1 MH21-HYDRES の概要

デル化（グリッドブロックに分割）することが可能である（MH21 研究コンソーシアム，2009）。さらに三次元モデルでは、一部のグリッドブロックを細分割したり、円筒座標系グリッド（ハイブリッドグリッド）に分割したりする機能も有している。単純な二次元円筒座標系モデルはコア試験および単一垂直坑井によるフィールド試験の挙動予測に、三次元モデルはフィールドスケールの挙動予測や水平坑井のように特殊な形状を持つ坑井の挙動予測に適用している。

MH21-HYDRES は、主として MH の分解・生成に伴うメタンと水の生成・消費および圧力・温度変化、さらには貯留層流体の流動などの現象を記述し、それを数値的に解くために、以下の機能を備えている。

- ・ ガス、水、MH、氷、（析出）塩の 5 相の取り扱いが可能（ガス・水相の流動はダルシー流動を仮定。MH 相、氷相、塩相は固相で不動と仮定）
- ・ メタン、窒素、二酸化炭素、水、メタノール、塩の 6 成分を考慮
- ・ MH の分解・生成を Kim-Bishnoi の式（Kim ら，1987）、あるいはそれを模した式により速度論で記述
- ・ MH の生成・分解に伴う発熱・吸熱を考慮（Hammershaimb と Kuustaa, 1983）
- ・ 氷の融解・生成を Kim-Bishnoi の式を模した式により速度論で記述
- ・ 氷の生成・融解に伴う発熱・吸熱を考慮
- ・ 塩の水相からの析出、水相への溶解およびこれに伴う発熱・吸熱を考慮
- ・ 水相中のメタノール・塩濃度の計算およびメタノール・塩濃度に応じて、MH-メタン-水（氷）の 3 相平衡状態（以下、単に「3 相平衡状態」）を推定
- ・ 混合ガスハイドレート（メタン-窒素-二酸化炭素）の生成・分解の取り扱いが可能
- ・ 水相中の塩分濃度の影響を考慮してメタン、窒素、二酸化炭素の水相への溶解を計算
- ・ 圧入井、水平坑井を含む複数坑井の取り扱いが可能
- ・ 坑井内流動計算が可能
- ・ 定圧・定流量流動、定圧・定温・変温面、などの各種境界条件（Vinsome と Westerveld, 1980）に対応
- ・ グラフィック入出力（ライングラフの表示、二次元・三次元グリッドデータの表示など）が可能

図2 4つの領域における成分・熱の移動

2.2 シミュレータの基本式

MH21-HYDRES では、図2に示すように3相平衡曲線と氷点曲線で仕切られる4つの領域（ハイドレート安定領域かつ氷点以上、ハイドレート分解領域かつ氷点以下、など）において前記6成分の質量保存式および総エネルギー保存式の7式を構築し、これを支配方程式とし、この方程式を（各グリッドにおける）圧力、温度、メタン総質量分率、窒素総質量分率、二酸化炭素総質量分率、塩総質量分率、メタノール総質量分率の7つを第一義の未知数として解いている。以下にこれら7つの支配方程式を示す。

メタン質量保存式

$$\begin{aligned} & -\nabla \cdot (\rho_G y_{CH_4} \vec{u}_G + \rho_W x_{CH_4} \vec{u}_W) + \dot{m}_{CH_4} - y_{CH_4} \dot{m}_{well, G} \\ & - x_{CH_4} \dot{m}_{well, W} = \frac{\partial}{\partial t} \{ \phi (\rho_G y_{CH_4} S_G + \rho_W x_{CH_4} S_W) \} \end{aligned} \quad (1)$$

窒素質量保存式

$$\begin{aligned} & -\nabla \cdot (\rho_G y_{N_2} \vec{u}_G + \rho_W x_{N_2} \vec{u}_W) + \dot{m}_{N_2} - y_{N_2} \dot{m}_{well, G} \\ & - x_{N_2} \dot{m}_{well, W} = \frac{\partial}{\partial t} \{ \phi (\rho_G y_{N_2} S_G + \rho_W x_{N_2} S_W) \} \end{aligned} \quad (2)$$

二酸化炭素質量保存式

$$\begin{aligned} & -\nabla \cdot (\rho_G y_{CO_2} \vec{u}_G + \rho_W x_{CO_2} \vec{u}_W) + \dot{m}_{CO_2} - y_{CO_2} \dot{m}_{well, G} \\ & - x_{CO_2} \dot{m}_{well, W} = \frac{\partial}{\partial t} \{ \phi (\rho_G y_{CO_2} S_G + \rho_W x_{CO_2} S_W) \} \end{aligned} \quad (3)$$

水質量保存式

$$\begin{aligned} & -\nabla \cdot (\rho_W x_{H_2O} \vec{u}_W) + \dot{m}_{H_2O} - x_{H_2O} \dot{m}_{well, W} \\ & = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_W \phi S_{H_2O}) \end{aligned} \quad (4)$$

メタノール質量保存式

$$\begin{aligned} & -\nabla \cdot (\rho_W x_{CH_3OH} \vec{u}_W) - x_{CH_3OH} \dot{m}_{well, W} \\ & = \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_W x_{CH_3OH} S_W) \end{aligned} \quad (5)$$

塩質量保存式

$$\begin{aligned} & -\nabla \cdot (\rho_W x_{NaCl} \vec{u}_W) - x_{NaCl} \dot{m}_{well, W} \\ & = \frac{\partial}{\partial t} \{ \phi (\rho_W x_{NaCl} S_W + \rho_{NaCl} S_{Na}) \} \end{aligned} \quad (6)$$

エネルギー保存式

$$\begin{aligned} & -\nabla \cdot (\vec{Q}_{trans_heat}) - \nabla \cdot (\rho_W h_W \vec{u}_W + \rho_G h_G \vec{u}_G) \\ & - \Delta Q_H - \Delta Q_e - \Delta Q_I - Q_{NaCl} + \sum_{l=G, W} (\Delta Q_l) \\ & = \frac{\partial}{\partial t} \left[(1-\phi) \rho_R C_R T + \phi S_H \rho_H C_H T + \sum_{l=G, W} (\phi S_l \rho_l U_l) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、

$$\vec{u}_G = - \frac{k^* k_{rG}}{\mu_G} \nabla \Phi_G \quad (8)$$

$$\vec{u}_W = - \frac{k^* k_{rW}}{\mu_W} \nabla \Phi_W \quad (9)$$

$$\vec{Q}_{trans_heat} = -\bar{\kappa} \nabla T \quad (10)$$

$$\Phi_G = p_G - \rho_G g D \quad (11)$$

$$\Phi_W = p_G - p_C - \rho_W g D \quad (12)$$

2.3 シミュレータの構成式

上記の基本式に加え、MH21-HYDRESには、支配方程式の解法の前処理としてMHの分解・生成や流体流動などの物理・化学現象を記述し、第一義未知数以外の係数・要素の値を推定するための構成式が多数備わっている。ここでは、これらの構成式の中でも代表的な、MHの生成・分解、MH生成・分解時の発熱・吸熱、MH分解・生成に伴う浸透率の変化、MH分解促進剤による3相平衡曲線の変化を記述した構成式を紹介する。

(1) MHの生成・分解

MHの生成・分解は、計算の対象としている媒体の圧力・温度状態におけるメタンのフガシティと、その温度に対応する3相平衡状態におけるメタンのフガシティとの差を駆

図3 速度論によるMHの分解

動力とし、その反応速度は次式で記述している（図3）。

ただし、窒素や二酸化炭素を含む場合には、各ガス成分が形成するハイドレートの分解・生成速度は、混合気相における当該ガス成分のフガシティを適用して計算している。

生成時

$$\dot{n}_{gen} = K_{gen} A_{gen} \phi S_G (S_W + S_I) (f_e(T) - f_{CH_4}^v) \quad (13)$$

分解時

$$\dot{n}_{disso} = K_{disso} A_{HS} \phi S_H (f_e(T) - f_{CH_4}^v) \quad (14)$$

ただし、

$$K_{gen} = K_{d_{gen}}^0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) \quad (15)$$

$$K_{disso} = K_{d_{disso}}^0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) \quad (16)$$

また、1 mol の MH 分解に伴う吸熱量は、以下の式で近似している（Hammershaimb と Kuustaa, 1983）。

$$\Delta H = (C_{CH_4} + D_{CH_4} T) \quad (17)$$

(2) MH, 氷, 塩の存在下の有効浸透率

孔隙媒体に MH, 氷, 塩といった固相が存在する場合には、孔隙の一部がこれらの固相によって占められるため、媒体の浸透性が著しく低下する。MH21-HYDRES では、固相の存在下で流体が単相で流動する場合の浸透率を固相の飽和率の関数として以下の経験式で表現している（図4）。

$$k^* = k(1 - S_H - S_I - S_{Na})^N \quad (18)$$

さらには最近の研究により、同じ MH 飽和率でも、MH が生成する際の浸透率と MH が分解する際の浸透率に差が認められることが判明したため、MH21-HYDRES では MH の生成・分解過程による浸透率変化の差違、すなわちヒステリシスをも考慮しているが、ここではその詳細説明は省略する。

なお、ガス相、水相の有効浸透率は (18) 式で計算した k^* に各相の相対浸透率を乗じて、以下の式により求めて

図4 固相の飽和率と単相有効浸透率の関係

いる。

$$k_{eg} = k^* k_{rG}(S_G^*) \quad (19)$$

$$k_{eW} = k^* k_{rW}(S_W^*) \quad (20)$$

ただし、

$$S_G^* = S_G / (S_G + S_W) \quad (21)$$

$$S_W^* = S_W / (S_G + S_W) \quad (22)$$

(3) インヒビタ濃度を考慮した3相平衡状態

塩、メタノールが共存すると3相平衡曲線が低温側へ移動し、MHの分解が促進される。MH21-HYDRESでは、この3相平衡曲線の低温側への移動の程度を、塩成分、メタノール成分の液相中のモル分率に基づき、以下に示すハンマーシュミットの式を用いて計算している。

塩

$$\Delta T_{NaCl} = \frac{2440 X_{NaCl}}{(1 - X_{NaCl}) M_{NaCl}} \quad (23)$$

メタノール

$$\Delta T_{CH_3OH} = \frac{1228 X_{CH_3OH}}{(1 - X_{CH_3OH}) M_{CH_3OH}} \quad (24)$$

なお、塩とメタノールが共存する場合には、3相平衡曲線の移動温度は (23) 式と (24) 式の単純加算で求められている。

2.4 シミュレータの構成

図5にMH21-HYDRESによる計算の流れ図を示すが、計算手法は基本的には通常の油・ガス相を対象としたシミュレータと同じである。

すなわち、入力データに基づき、貯留層モデルを初期化した後に、タイムステップ計算を開始し、(1)式～(7)式の支配方程式を離散化して第一義の未知数に対する非線形方程式系を定義する。この非線形方程式系をNewton法で解くために、Jacobian行列と右辺ベクトルを構築して、第一義の未知数の変化量に対する線形方程式系を確立し、この連立1次方程式を解く。なお、線形方程式系のソルバーでは、不完全なGauss消去法による不完全LU factorization

図5 MH21-HYDRES における計算の流れ

法 (Wallis, 1983) と ORTHOMIN 加速法 (Vinsome, 1976) との組み合わせによる解法を採用している。線形方程式系の解として得られる第一義の未知数の変化量に基づき未知数の値を更新して、その更新値を使用して Jacobian 行列構築以降の上記計算を繰り返すが、未知数の変化量が許容値以下となれば Newton 法の繰り返し計算、すなわち、そのタイムステップの計算を終了し、次のタイムステップの計算へと進む。

3. シミュレータ高速化への試み

MH は通常の油・ガスのような流体とは異なり、開発・生産を開始するときには固体の状態で貯留層の孔隙中に存在し、流動性がない。そのため、(18) 式に示すように、MH が孔隙の大きな部分を占めている時には貯留層流体の浸透性が著しく小さいが、ある程度 MH が分解すると、貯留層の浸透性が大きく改善される。すなわち、MH があまり分解していない領域とある程度分解した領域では、貯留層の浸透性が大きく異なることになるが、この浸透率のコントラストがその後の MH 分解挙動に大きく影響を及ぼす。したがって、貯留層モデルのグリッドブロックを大きく設定すると、グリッドブロックの特性が平均化されてしまうために、この浸透性の改善された領域とそうでない領域の分布やそのコントラストを厳密に再現できず、その後の MH 分解挙動が正しく計算されなくなってしまう。また、MH の代表的な分解・採取法である減圧法を適用した場合には、坑井における低圧力の伝播→MH の分解→浸透性の改善→遠方への圧力伝播→遠方での MH の分解→遠方の浸透性改善→さらに遠方への圧力伝播・・・というメカニズムで MH の分解が進行する。この現象をシミュレートする際に、グリッドサイズが大きいと、グリッドブロックの平均圧力が 3 相平衡圧力を下回るまでは MH の分解が生じないため、グリッドブロックを細分化して 3 相平衡圧力を下回ったグリッドから順次 MH が分解すると計算する場合に

比べて、浸透性の回復が遅く、圧力の伝播が鈍くなり、結果的に MH の分解が遅く予測されてしまう。

そこで、MH の分解・生産挙動予測シミュレーションでは、通常の油・ガス層シミュレーションよりもはるかに微細な (MH 分解フロント近傍には数 cm の) グリッドブロックを貯留層モデルに配置する必要が生じ、シミュレータの計算にかかる負荷が大きくなり、膨大な計算時間を要することとなる。

MH21-HYDRES では計算速度を向上させるために、貯留層モデルの必要な箇所 (例えば、MH が大きく分解中の領域) にのみ微細なグリッドを配置し、さらにはこの微細グリッドを配置する領域を時間とともに変化させる動的局所グリッド細分割法を適用したり、坑井近傍には円筒座標系のグリッドを、坑井からある程度離れた領域には直交座標系のグリッドを配置するハイブリッドグリッド法を適用したりすることが可能である。さらには並列コンピュータ上での計算を可能とすべく、シミュレータの並列化に向けたコード修正を行っている。

これらの試みのうち、動的局所グリッド細分割機能およびシミュレータの並列化について、その概要を以下に記載する。

3.1 動的局所グリッド細分割機能

シミュレーションの対象領域に配置するグリッドブロックの総数をそれほど増やさず、かつ計算精度を向上させる手法として、総体的には比較的大きなグリッドブロックを適用するが、一部の領域には微細なグリッドブロックを配置する、局所細分割 (Local Grid Refinement; 以下 [LGR]) 法がよく知られている。通常は坑井近傍など、他の領域に比べて厳密な計算を要する領域に LGR を適用するが、MH の分解挙動予測シミュレーションでは、前述のように MH の分解領域近傍に LGR を適用する必要がある。

しかしながら、細分割領域が固定された LGR 法では、MH 分解領域が LGR 領域を超えた場合に計算誤差が大き

くなったり、指定した細分割領域はMHが分解する前や完全に分解した後も細分割されているために、計算効率が悪いなどの問題がある。そこで、MHの分解領域の拡大・変遷に応じて自動的に細分割領域を変化させる動的局所細分割 (Dynamic Local Grid Refinement; 以下「DLGR」) 機能をシミュレータに付加した。DLGRでは、各タイムステップ終了時に各グリッドブロックにおけるMHの分解状況を検査して細分割の必要性を判定し、自動的にグリッドブロックを細分割・結合する。以下に、細分割・結合の条件、分割・結合時の各グリッドの圧力、温度などの未知数の取り扱いについて概説する。

(1) 粗グリッドブロックの細分割

各タイムステップ終了後、MHが分割していない粗グリッドブロックを対象として探索を行い、図6に示すように、隣接するグリッドブロックあるいは自身の圧力・温度が3相平衡状態に近いかすでにMH分解領域にある粗グリッドを細分割する。分割直後の微細グリッドの圧力、温度、飽和率などの未知数は、分割前の粗グリッドの値と等しいとしている。

(2) 微細グリッドブロックの結合

結合の対象となる粗グリッドブロック内のすべての細分割グリッドのMH飽和率が0になった時点で、微細グリッドを再結合して粗グリッドの状態に戻す。再結合時の粗グリッドに対する未知数の内、メタン成分、窒素成分、二酸化炭素成分、メタノール成分、塩成分、水成分の総質量分率については、以下の式から直接求める。

$$z_{m_c} = \frac{\sum_i \{V_i \phi_i (S_{Gi} \rho_{Gi} y_{mi} + S_{Wi} \rho_{Wi} x_{mi})\}}{\sum_i \{V_i \phi_i (S_{Gi} \rho_{Gi} + S_{Wi} \rho_{Wi} + S_{Nai} \rho_{Nai})\}}, \quad (m = \text{CH}_4, \text{N}_2, \text{CO}_2, \text{CH}_3\text{OH}) \quad (25)$$

$$z_{\text{NaCl}_c} = \frac{\sum_i \{V_i \phi_i (S_{Wi} \rho_{Wi} x_{\text{NaCl}i} + S_{Nai} \rho_{Nai})\}}{\sum_i \{V_i \phi_i (S_{Gi} \rho_{Gi} + S_{Wi} \rho_{Wi} + S_{Nai} \rho_{Nai})\}} \quad (26)$$

$$z_{\text{H}_2\text{O}_c} = 1 - \sum_{m = \text{CH}_4, \text{N}_2, \text{CO}_2, \text{CH}_3\text{OH}, \text{NaCl}} z_{m_c} \quad (27)$$

圧力、温度については、それらを未知数にして、結合する微細グリッドブロックの質量保存式およびエネルギー保

存式を連立して解くことで決定する。

質量保存式

$$\sum_i^n \left\{ V_i \phi_i \sum_{l=G, W, Na} (S_{li} \rho_{li}) \right\} = V_{-c} \phi_{-c} \sum_{l=G, W, Na} (S_{l-c} \rho_{l-c}) \quad (28)$$

エネルギー保存式

$$\sum_{i=1}^n \left\{ V_i \left[\phi_i \left\{ (1-\phi_i) \rho_R C_R T_i + \rho_{wi} S_{wi} U_{wi} + \rho_{Gi} S_{Gi} U_{Gi} + \rho_{Hi} S_{Hi} C_{Hi} T_i \right\} + \rho_{Li} S_{Li} C_{Li} T_i + \rho_{Nai} S_{Nai} C_{Nai} T_i \right] \right\} = V_{-c} \left\{ \phi_{-c} \left[(1-\phi_{-c}) \rho_R C_R T_{-c} + \rho_{W-c} S_{W-c} U_{W-c} + \rho_{G-c} S_{G-c} U_{G-c} + \rho_{H-c} S_{H-c} C_{H-c} T_{-c} + \rho_{L-c} S_{L-c} C_{L-c} T_{-c} + \rho_{Na-c} S_{Na-c} C_{Na-c} T_{-c} \right] \right\} \quad (29)$$

ただし、

$$V_{-c} = \sum_{i=1}^n V_i \quad (30)$$

$$\phi_{-c} = \phi_{ref} e^{c_{-c} (p_{-c} - p_{ref-c})} \quad (31)$$

$$S_{H-c} = \frac{\sum_{i=1}^n (\phi_i S_{Hi})}{\phi_{-c}} \quad (32)$$

$$S_{L-c} = \frac{\sum_{i=1}^n (\phi_i S_{Li})}{\phi_{-c}} \quad (33)$$

$$S_{Na-c} = \frac{\sum_{i=1}^n (\phi_i S_{Nai})}{\phi_{-c}} \quad (34)$$

$$S_{G-c} = (1 - S_{W-c} - S_{H-c} - S_{L-c} - S_{Na-c}) \quad (35)$$

(3) 機能検証

DLGR機能を検証するため、50 m四方の貯留層モデル全域に1辺50 cmの微細グリッドを配置した場合 (微細グリッドモデル) と、モデル全域に1辺5 mの粗グリッドを配置してDLGRを適用した場合 (DLGRモデル) および適応しない場合 (粗グリッドモデル) の計算時間および計算結果を比較した。この計算では、生産井は左上の角に存在し、坑底圧力を3 MPaに設定すると仮定してMH分解挙動を予測している。

図7に示したMH飽和率分布の予測結果に見るように、粗グリッドモデルと微細グリッドモデルでは、グリッドサイズの影響によりMH分解フロントの進行速度が著しく異なり、それに伴ってガス生産の予測結果も大きく異なる (図8)。一方、DLGRモデルでは、浸透率の激しく変化するMH分解領域のグリッドブロックを細分割することで、MH分解フロントの進行を微細グリッドモデルの場合とほぼ等しく予測しており、したがってガス生産挙動の予測結果も微細グリッドモデルと同一である。さらに、DLGRモデルの計算時間は微細グリッドモデルの約1/3であり、微細グリッドモデルと同様の解を短時間で得るというDLGRの所期の目的が達せられている。

図6 粗グリッドブロックの細分割

図7 各モデルによるMH飽和率分布予測結果

図8 各モデルによるガス生産挙動予測結果

3.2 並列処理機能

並列処理は、互いに連結した複数のプロセッサを持つコンピュータ、いわゆる並列機上で行う計算方法である。MH21 研究コンソーシアムでは、MH21-HYDRES に並列処理機能を付加し、計算領域を分割して複数のプロセッサに並列処理をさせることによって、膨大な数のグリッドブロックで構成される貯留層モデルによる計算を可能とする試みに取り組んでいる。

図5に示したように、MH21-HYDRES では、計算時間のほとんどをNewton法による非線形方程式系の解法、すなわち、Jacobian行列の構築とそれを係数とした線形方程式系の解法に費やしている。したがって、シミュレータのこの部分の計算ルーチンを並列化することで、計算速度の向上を目指している。

(1) シミュレータの並列化

分散メモリ型のスーパーコンピュータ上で大規模問題を解くことを視野に入れ、MPI (Message Passing Interface) と呼ばれる規格を使用して、複数のプロセッサ間の情報の送受信を定義することで、非線形方程式系の解法部分の並列化を試みている。MPIを用いてMH分解挙動予測シミュレーションのような領域型の問題を並列的に解く場合には、計算領域を小領域に分割し、小領域毎にプロセッサを割り当てて並列に計算を進める「領域分割法」という手法を用いるのが一般的である。MH21-HYDRESでは、非線形方程式系の解法部分を、領域分割部、Jacobian行列構築部、線形方程式系解法部の3つに分割し、そのそれぞれに対して並列計算用の対応を試みている。

領域分割部

この部分では対象とする計算領域を複数の小領域に分割して、複数のプロセッサに割り当てる。並列化の効率を上げるために、つまり各プロセッサの負荷を均等にし、通信

図9 並列計算におけるNewton法反復計算の手順

量を最小にするために、 x , y , z の任意の方向に領域を分割することを可能としている。

Jacobian 行列構築部

図 9 に並列計算における Newton 法による非線形方程式系の解法の説明図を載せるが、Jacobian 行列構築部では、領域分割部で各プロセッサに割り当てられた計算領域に対応する Jacobian 行列および右辺ベクトルの要素を個別に計算し、それらを集約して全計算領域を対象とした 1 つの Jacobian 行列および右辺ベクトルを構築する。このために、MPI のデータ送受信関数を用いて、各計算領域に隣接する計算領域の境界部分のグリッドブロックの未知数の情報を取得するとともに、隣接する計算領域に対して自らの領域の境界部分のグリッドブロックの未知数の情報を提供する。

線形方程式系解法部

Jacobian 行列構築部で定義した線形方程式系を並列計算によって解く部分、いわゆるソルバーの並列処理版である。MH21-HYDRES では、並列計算を行う場合には、規定の著作権表示を行うことで自由に使用できること、単一のプロセッサで実行した場合でも MH21-HYDRES に実装しているソルバーの 6 割程度の速度を持つことが確認されていることなどの理由から、PETSc をソルバーとして使用している。PETSc は米国 Argonne 国立研究所が開発している並列ソルバーライブラリで、前処理付きの安定化双共役勾配法や一般化最小残差法などの反復解法を選択的に使用することができる。

(2) 並列化シミュレータの動作確認

並列化シミュレータの動作を確認する目的で、複数のプロセッサを搭載したワークステーション上で計算を行った。ここではその一例を紹介する。使用したコンピュータは、4 コアの INTEL XEON5482 3.2 GHz の CPU (Central Processing Unit) を 2 基搭載したもので、8 つのプロセッサを搭載した並列計算機として使用可能である。

図 10 に示すように、初期圧力 8 MPa、初期温度 279.15 K、初期 MH 飽和率 70%、初期水飽和率 30% の厚さ 5 m の

図 10 並列計算の動作確認に用いた貯留層モデルの俯瞰図

図 11 並列計算によるガス生産挙動の予測結果

図 12 並列計算におけるプロセッサ数と計算速度の関係

MH 層に坑井を仕上げ、減圧法により一定の流動坑底圧力 (3 MPa) で MH を分解・生産することを想定し、坑井の周囲 72 m × 72 m の領域を 72 × 72 × 10 (= 51,840) のグリッドブロックに分割したモデルを作成した。並列化した MH21-HYDRES を用いて、使用するプロセッサ数を 1 つ～4 つに変化させて挙動予測計算を実施し、計算の信頼性および使用プロセッサ数と計算時間の関係を調べた。

まず、図 11 に示すように、使用するプロセッサ数を変えても、ガス生産レートと累計ガス生産量の予測結果はほぼ完全に一致しており、プロセッサ数によらず同一の解が得られることを確認した。また、図 12 に計算に使用したプロセッサの数と計算時間の関係を示すが、並列化した MH21-HYDRES の計算時間は、1 つのプロセッサを使用した時の 6,880 秒からプロセッサ数の増加とともに減少し、4 つのプロセッサを使用した場合には約 2,150 秒まで減少した。すなわち、4 つのプロセッサを使用した場合には、計算速度が約 3.2 倍に向上し、ある程度高い並列化効率を示すことも確認されている。ただし、参照データとして同図にプロットしたように、PETSc の計算速度は MH21-HYDRES に実装されている単一プロセッサ用のソルバーの 6 割程度である。したがって並列化した MH21-HYDRES の計算速度は、4 つのプロセッサを使用した場合でも、単一プロセッサでの MH21-HYDRES の計算速度の実質 2 倍程度であることに注意されたい。

4. 国際 MH シミュレータ比較プロジェクト

現在世界には、MH21-HYDRES を含め、MH の分解・生産挙動の予測が可能なシミュレータが幾つか存在している。これらのシミュレータの計算結果は幾つかの国際会議、学会などで発表されてきたが、時にはシミュレータ間で挙動予測結果が大きく異なる例も見られた。そこで、米国エネルギー省の下部組織である National Energy Technology Laboratory (NETL) と U.S. Geological Survey (USGS) が主導して、平成 17 年度に MH シミュレータ比較のための国際共同プロジェクトが開始された。このプロジェクトは、世界の先進の MH シミュレータが同一の問題を解いて、相互に計算の結果を比較・検討することで、MH 分解・生産を対象としたシミュレーションに関する知見を共有するとともに、MH シミュレータ全般に対する信頼性を確立することを目的としている (Wilder ら, 2008; Anderson ら, 2008)。

MH21 研究コンソーシアムでは、MH21-HYDRES の精度と信頼性の総合的な評価の一環として、このプロジェクトに参加している。以下にプロジェクトの概要および比較計算の結果例を紹介する。

4.1 プロジェクトの概要

このプロジェクトには、MH21-HYDRES 以外に以下の 4 つの MH シミュレータが参加している。これらのシミュレータは、MH に関してコアスケールのシミュレーションからフィールドスケールのシミュレーションまで包括的に取り扱える、世界最先端のシミュレータである。

TOUGH-Fx/Hydrate (TOUGH + HYDRATE)

米国 Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) が、地熱貯留層のシミュレータとして世界的に有名な TOUGH2 をベースにして開発した、ガスハイドレート分解・生産挙動の予測に特化したシミュレータであり、複数のスタディに適用された実績がある。平衡論および速度論に基づくガスハイドレートの生成・分解の取り扱いが可能であり、2 つのガス成分で構成されるガスハイドレートの取り扱いも可能であるとしている。

HydrateResSim

NETL が TOUGH-Fx/Hydrate v1.0 を HydrateResSim の名前で一般向けに公開したものであるため、基本的には HydrateResSim は TOUGH-Fx/Hydrate と同一のシミュレータであるが、バージョンが古い分、TOUGH-Fx/Hydrate の最新のコード更新は反映されていない。

STOMP-HYD

Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) とアラスカ大学 Fairbanks 校の石油工学科が開発した多相流動シミュレータ (STOMP) をガスハイドレートが取り扱えるように修正したシミュレータで、メタン-二酸化炭素-水-塩系での、二酸化炭素ハイドレート、MH、二酸化炭素-メタンの混合ハイドレートの取り扱いが可能である。二酸化炭素の液化領域も取り扱えるなど先進的な機能を持っているが、計算には非常に長い時間を要する。

STARS

カナダ Computer Modelling Group Ltd. (CMG) が開発した熱攻法挙動予測用の市販シミュレータで、任意の成分に関する任意の化学反応を定義することが可能である。そのため、MH を非常に粘度の高い油相 (擬似的な固相) として定義し、気液平衡計算を応用してある一定の条件下で油が水とガスになるように反応式を定義することで、擬似的に MH の分解を表現できるが、MH の分解・生産挙動予測に特化したシミュレータではないため、他のシミュレータに比べると取り扱えない現象などの制約が多い。

4.2 比較計算結果例

このプロジェクトでは、図 13 に示すように、MH を含まない 1 次元の熱・流体流動の連成問題 (問題 1) から開始して、問題の内容を徐々に複雑かつ実践的なものへと移行させながら検討を進めて、7 つの問題を実施してきている。最新の問題 7 では、初期状態の異なる Alaska North Slope フィールドの 3 つの MH 層を模擬した貯留層モデルを対象に、減圧法の適用を想定した 50 年間の挙動予測を実施している。

STARS は擬似的に 3 相平衡状態を定義しているためか、小さなスケールを対象とした問題では全般的に他のシミュレータと異なる解を示している (図 14, 図 16)、MH の再生成を考慮できないという欠点を持っている (表 1)。また図 15, 図 16 および表 1 に示すように、フィールドスケールの挙動予測問題では、MH が再生成する要因のない生産初期から過剰に MH が再生成するように計算されるために、TOUGH 系のシミュレータの解が他のシミュレータと異なったり、STOMP-HYD の解が著しく振動したりと、これらのシミュレータの大規模問題での計算の不安定性を露呈している。

一方、MH21-HYDRES は、いずれの問題においても、計算は安定しており、合理的な計算結果を提供している。この結果およびこれまでも幾つものコアスケール、フィールドスケールのシミュレーションに実践的に使用してきていることから (Kurihara ら, 2005a, 2005b, 2008a, 2008b), MH21-HYDRES は MH 分解・生産挙動予測シミュレータと

図 13 国際 MH シミュレータ比較プロジェクトの実施問題概略

実施問題例 (1) : 問題3-1 (加熱)

問題設定

挙動予測結果 (MH飽和率)

実施問題例 (2) : 問題3-2 (減圧)

問題設定

挙動予測結果 (MH飽和率)

図 14 一次元問題の実施例 (問題 3-1, 3-2)

実施問題例 (3) : 問題5-1 (模擬MH層減圧法ガス生産挙動予測)

問題設定

初期条件

初期水有効浸透率 (mD)	0.0 (Shale Zone) 0.75 (MH Zone)
初期水飽和率 (%)	100.0 (Shale Zone) 30.0 (MH Zone)
初期MH飽和率 (%)	0.0 (Shale Zone) 70.0 (MH Zone)

挙動予測結果

ガス・水生産レート挙動予測結果

MH飽和率分布挙動予測結果 (360日後)

図 15 フィールドスケール問題の実施例 (問題 5-1)

して一応の完成を見たと考えている。

5. まとめと課題

上記のように, MH21 研究コンソーシアムで開発・改良

を続けている MH21-HYDRES は, MH の分解・生産挙動を予測するシミュレータとしては, 取り扱う現象, 計算精度, 計算速度の観点からは十分に実用に耐えるものであると自負している。しかしながら, 今後は MH のフィールド試験

問題設定

問題7-3 : PBU L-Pad MH層 Down-dip

$T = 10.7^{\circ}\text{C} \sim 12.1^{\circ}\text{C}$
 $P = 8.9\text{ MPa}$
 $Sh = 75\%$ $ke = 0.12\text{ mD}$
 MH層厚 = 45 m
 $BHP = 2.7\text{ MPa}$
 生産期間 = 50年

挙動予測結果 (ガスレート; STOMP-HYDは挙動予測結果を提出していない)

MH21-HYDRES

MHの再生成を考慮した場合でも、合理的に説明できる安定した解を得ている。

STARS

安定した解を得ている(ただし、MH再生成を考慮した予測結果は提出されていない)。

TOUGH+HYDRATE

HydrateResSim

TOUGH系のシミュレータは、MHが再生成する要因のない(地層の顕熱が十分残存し、ガスレートが低く断熱膨張の影響もほとんど無い)生産初期から坑井周辺に大量のMHが再生成している。このため坑井周辺の浸透率が低下し、ガス生産レートが低く予測されている。

図 16 フィールドスケール問題の実施例 (問題 7-3)

が具体化したり、新規のMH採取法が提唱されたりなど、シミュレーションの対象となる問題が大規模化、複雑化することが予想される。それらに対応するためには、今後ともMH21-HYDRESの改良・機能強化を継続し、以下の課題を克服していく必要があると考えている。

計算速度

MH21-HYDRESでは、局所細分割法を利用したり、並列化を試みたりして、計算速度の向上を図ってきているが、さらなる計算速度の向上が望まれる。そのためには、並列処理において、局所細分割を利用したり複数坑井が存在

表1 国際MHシミュレータ比較プロジェクトの結果一覧

	MH21-HYDRES	STOMP-HYD	TOUGH-Fx/Hydrate	HydrateResSim	STARS
問題1	全シミュレータの解が一致				
問題2	STARSに若干のずれがあるものの全シミュレータの解がほぼ一致				
問題3.1	STARSを除いて一致				解に疑問 (MH再生成無し)
問題3.2	STARSを除いて一致				解に疑問 (MH過剰分解)
問題3.3	合理的かつ安定した解	合理的かつ安定した解	解に疑問 (氷飽和率振動)	解に疑問 (氷飽和率振動)	解に疑問 (氷生成無し)
問題4.1	STARSを除いて全シミュレータの解が一致				棄権
問題4.2	STARSを除いて全シミュレータの解が一致				棄権
問題5.1	合理的かつ安定した解	合理的な解、ただし計算不安定性が露見	解に疑問 (生産初期からMHの過剰再生成)	棄権	棄権
問題5.2	合理的かつ安定した解	合理的な解、ただし計算不安定性が露見	解に疑問 (生産初期からMHの過剰再生成)	棄権	棄権
問題6	全シミュレータともMDT試験挙動を良好に再現				
問題7.1	初期(生産開始後10年程度)の生産挙動は全シミュレータでほぼ一致、中期～後期の生産挙動はシミュレータ毎に乖離				
問題7.2	合理的かつ安定した解	解に疑問 (減圧後もMH層境界近傍のMHが未分解)	解に疑問 (生産初期からMHの過剰再生成)	解に疑問 (生産初期からMHの過剰再生成)	安定した解(MH再生成の影響考慮せず)
問題7.3	合理的かつ安定した解	棄権	解に疑問 (生産初期からMHの過剰再生成)	解に疑問 (生産初期からMHの過剰再生成)	安定した解(MH再生成の影響考慮せず)

したりする複雑な貯留層モデルを使用した場合にも各プロセスの負荷を均一に保つように領域を(自動)分割するなど、並列計算のさらなる効率向上を図る必要がある。

一方で、貯留層モデルのグリッドブロック数の軽減を意図してMH貯留層特性のアップスケーリングも試みている。現段階では、ある程度大きなサイズのグリッドを適用したモデルでも、より小さいサイズのグリッドを適用したモデルと同様の結果を計算できる可能性があることは示唆されているが、その適用範囲・条件などがいまだ明確になっておらず、手法の確立が急がれる。

物理・化学現象の計算機能の高精度化

MH21-HYDRESに導入した物理・化学現象の計算の中には、例えばMHや氷の生成計算、圧密挙動の計算など、十分に実現象を表現し切れていないものも存在する。他にも研究が進むにつれて、現行のシミュレータでの計算機能では不十分なものも出現するはずである。実験などに基づいて、より厳密な構成式が提唱された場合には、それらを導入することによって計算精度の向上を図っていく必要がある。

新規物理・化学現象の導入

当面のシミュレーションでは重要でないと判断し、現行のMH21-HYDRESでは考慮していない物理・化学現象がある。例えば、MHの分解に伴う砂の流動、二酸化炭素成分の液化・超臨界領域などを取り扱う機能が挙げられるが、これら以外にも研究の過程で、新たにMH21-HYDRESで考慮すべき現象が判明する可能性が高い。これらの現象を考慮してシミュレータの改良を継続していく必要がある。

記号の説明

A_{gen}	: MH生成速度式調整係数	[1/m]
A_{HS}	: MHの比表面積	[1/m]
c	: 貯留層孔隙圧縮率	[1/Pa]
C_{CH_4}	: MHの分解熱量計算用の定数	[cal/mol] (氷点以上: 13,500, 氷点未満: 6,530)
C_l	: l 相の比熱	[J/(kg K)]
D	: 深度	[m]
D_{CH_4}	: MHの分解熱量計算用の定数	[cal/(mol K)] (氷点以上: -4.0, 氷点未満: -12.0)
$f_{CH_4}^v$	: 気相におけるメタンのフガシティ	[Pa]
$f_e(T)$	: 温度 T に対応した3相平衡状態におけるメタンのフガシティ	[Pa]
g	: 重力加速度	[kg m/s ²]
h_l	: l 相のエンタルピー	[J/kg]
k	: 絶対浸透率	[m ²]
k^*	: 固相存在下の気・液単相有効浸透率	[m ²]
k_{el}	: l 相の有効浸透率	[m ²]
k_{rl}	: l 相の相対浸透率	
K	: MH分解・生成速度定数	[mol/(m ² Pa s)]
K_d^0	: 固有MH分解・生成速度定数	[mol/(m ² Pa s)]
$\dot{m}_m$	: ハイドレート分解による m 成分の湧きだし	[kg/(m ³ s)]
$\dot{m}_{well, l}$	: 坑井による l 相の生産レート	[kg/(m ³ s)]
M_m	: m 成分の分子量	[g/mol]
n	: 粗グリッド内の細分割グリッド数	
$\dot{n}$	: 貯留層かさ容積あたりのMHの消費・生成速	

度 [mol/(m³s)] N : 浸透率低下指数 p_l : l 相の圧力 [Pa] P_c : 毛細管圧力 [Pa] $\vec{Q}_{trans_heat}$: 伝熱流速ベクトル [J/(m²s)] R : ガス定数 (8.3143) [J/(mol K)] S_l : l 相の飽和率 S_l^* : l 相の標準化飽和率 T : 貯留層温度 [K] $\vec{u}_l$: l 相のダルシー流速ベクトル [m/s] U_l : l 相の内部エネルギー [J/kg] x_m : 液相中の m 成分の質量分率 X_m : 液相中の m 成分のモル分率 y_m : 気相中の m 成分の質量分率 V : グリッドかさ体積 [m³] z_m : 全相中の m 成分の質量分率 ΔE : 活性化エネルギー (= 78,300) [J/mol] ΔH : 1 mol の MH の分解吸熱量 [cal/mol] ΔQ_e : 境界外部に散逸する熱レート [J/(m³s)] ΔQ_H : MH の生成・分解による吸熱レート [J/(m³s)] ΔQ_I : 氷の融解熱レート [J/(m³s)] ΔQ_l : 坑井流入に伴う l 相の熱レート [J/(m³s)] ΔQ_{NaCl} : 塩の溶解熱レート [J/(m³s)] ΔT_m : m 成分の液相モル分率に対応した 3 相平衡曲線の低温側への移動温度 [K] $\bar{\kappa}$: 総熱伝導率 [W/(m K)] μ_l : l 相の粘度 [Pa s] ρ_l : l 相の密度 [kg/m³] ϕ : 孔隙率 ϕ_l : l 相のポテンシャル [Pa]

下付添え字

 $_c$: 粗グリッドCH₃OH : メタノール成分CH₄ : メタン成分CO₂ : 二酸化炭素成分 G : ガス相 $disso$: MH 分解 gen : MH 生成 H : MH 相H₂O : 水成分 i : 微細グリッド番号 I : 氷相 Na : 塩相

NaCl : 塩成分

N₂ : 窒素成分 R : 貯留岩石 W : 水相 ref : 参照

開発グループの研究の一部として行われた。ここに謝意を表す。

引用文献

- Anderson, B. J., Wilder, J. W., Kurihara, M., White, M. D., Moridis, G. J., Wilson, S. J., Pooladi-Darvish, M., Masuda, Y., Collett, T. M., Hunter, R. B., Narita, H., Rose, K., Boswell, R., 2008 : Analysis of Modular Dynamic Formation Test Results from the Mount Elbert-01 Stratigraphic Test Well, Miline Point, North Slope Alaska, Presented at the 6th International Conference on Gas Hydrates, Vancouver, Canada, 6–10 July.
- Hammershaimb, E. C. and Kuustera, V. A., 1983 : *Handbook of Gas Hydrate Properties and Occurrence*. Technical Report No. DOE/MC/19239–1546, Contract No. AC21–82MC19239, US DOE, Washington, DC.
- Kim, H.C., Bishnoi, P.R., Heidemann, R.A. and Rizvi, S.S.H., 1987. Kinetics of methane hydrate decomposition; *Chemical Engineering Science*, 2(7), p. 1645–1653.
- Kurihara, M., Funatsu, K., Ouchi, H., Masuda Y., and Narita, H., 2005a : Investigation On Applicability Of Methane Hydrate Production Methods To Reservoirs With Diverse Characteristics, Presented at the 5th International Conference on Gas Hydrates, Trondheim, Norway, 13–16 June, *Proceedings*, Vol. 3, 714–725.
- Kurihara, M., Ouchi, H., Inoue, T., Yonezawa, T., Masuda, Y., Dallimore S.R., and Collett, T.S., 2005b : Analysis of the JAPEX/JNOC/GSC et al. Mallik 5L-38 Gas Hydrate Thermal Production Test Through Numerical Simulation, in Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. *Geological Survey of Canada Bulletin* 585, S.R. Dallimore and T. Collett, Eds.
- Kurihara, M., Sato, A., Ouchi, H., Narita, H., Masuda, Y., Saeki, T. and Fujii, T., 2008a : Prediction of Gas Productivity from Eastern Nankai Trough Methane-Hydrate Reservoirs, OTC 19382, 2008 Offshore Technology Conference held in Houston, TX, U.S.A., 5–8 May.
- Kurihara, M., Funatsu, K., Ouchi, H., Masuda Y., Narita, H., Dallimore, S. R. and Wright, F., 2008b : Analysis of the JOGMEC/NRCAN/AURORA Mallik Gas Hydrate Production Test through Numerical Simulation, Presented at the 6th International Conference on Gas Hydrates, Vancouver, Canada, 6–10 July, *Proceedings*.
- Masuda, Y., Fujinaga, Y., Naganawa, S., Fujita, K., Sato, K. and Hayashi, Y., 1999 : Modelling and experimental studies on dissociation of methane gas hydrates in Berea sandstone cores; presented at 3rd International Conference on Gas Hydrates, July 18–22, Salt Lake City, Utah. Unpublished manuscript. The University of Tokyo, Department of Geosystem Engineering, Tokyo, Japan.
- Masuda, Y., Kurihara, M., Ohuchi, H. and Sato T., 2002 : A field-

謝辞

本研究は、MH 資源開発研究コンソーシアムの生産手法

- scale simulation study on gas productivity of formations containing gas hydrates; Proceedings, 4th International Conference on Gas Hydrates, May 19–23, Yokohama, Japan. Keio University, Yokohama, Japan. P. 40–46.
- Masuda, Y., Naganawa, S., Ando, S., and Sato, K., 1997 : Numerical calculation of gas-production performance from reservoirs containing natural gas hydrates; paper SPE 38291, Proceedings, Western Regional Meeting, June 25–27, Long Beach, California. Society of Petroleum Engineers Inc., Richardson TX.
- MH21 研究コンソーシアム, 2009 : MH21 フェーズ 1 総括成果報告書.
- Moridis, G. J., Collett, T. S., Boswell, R., Kurihara, M., Reagan, M. T., Koh, C. and Sloan, E. D., 2008 : Toward Production From Gas Hydrates : Current Status, Assessment of Resources, and Simulation-Based Evaluation of Technology and Potential; paper SPE 114163, *Proceedings*, Unconventional Reservoirs Conference, February 10–12, Keystone, California.
- Vinsome, P. K. W., 1976 : ORTHOMIN, An Iterative Method for Solving Sparse Set of Simultaneous Linear Equations, Paper SPE 5729, Proceedings 4th SPE Symposium on Reservoir Simulation, Los Angeles, California.
- Vinsome, P. K. W. and Westerveld, J., 1980 : A simple method for predicting cap and base rock heat losses in thermal reservoir simulators; *Journal of Canadian Petroleum Technology*, Jul.–Sep., p. 87–90.
- Wallis, J. R., 1983 : Incomplete Gaussian Elimination as a Preconditioning for Generalized Conjugate Gradient Accelerations, Paper SPE 12265, Proceedings 7th SPE Symposium on Reservoir Simulation, San Francisco, California, November 16–18.
- Wilder, J. W., Moridis, G. J., Wilson, S. J., Kurihara, M., White, M. D., Masuda, Y., Anderson, B. J., Collett, T. M., Hunter, R. B., Narita, H., Pooladi-Darvish, M., Rose, K., Boswell, R., 2008 : An International Effort to Compare Gas Hydrate Reservoir Simulators, Presented at the 6th International Conference on Gas Hydrates, Vancouver, Canada, 6–10 July.