論 文
 Original Article

メタンハイドレート分解・生産挙動予測シミュレータと
 岩石力学的挙動予測シミュレータの統合化
 および連成計算の高速化に関する研究*

岩田 滋基^{**,†}・澤田 賢^{***}・長澤 亮^{****}・栗原 正典^{*****}
 天満 則夫^{*****}・赤嶺 耕也^{*****}・瀧口 晃^{*****}

(Received April 22, 2019 ; accepted July 29, 2019)

Research on coupling simulator predicting methane hydrate dissociation and production performances
 with geo-mechanical simulator in short computational time

Shigeki Iwata, Masaru Sawata, Ryo Nagasawa, Masanori Kurihara
 Norio Tenma, Koya Akamine and Akira Takiguchi

Abstract : Methane Hydrate (MH) is well known as one of the unconventional resources, which is confirmed to exist abundantly offshore in Japan. A variety of studies have suggested that the depressurization is the most effective method for developing MH from the commercial and technical points of view. In the development of MH by the depressurization method, the dissociation and production of MH must greatly influence the geo-mechanical behaviors such as compaction/deformation of formations and vice versa. Hence, to rigorously predict the MH reservoir performances, it is essential to take account of the flow and geo-mechanical behaviors simultaneously.

First, we developed a program for coupling the MH flow simulator (MH21-HYDRES) and the geo-mechanics simulator (COTHMAs), which were developed under The Research Consortium for MH Resources in Japan (MH21 Research Consortium), enabling simple explicit coupling (ECM) and iterative coupling (ICM). As a result of the simulations using this program, it was confirmed that ICM could precisely predict MH reservoir performances in conjunction with geo-mechanical behavior, but the computation became far slower than uncoupled simulations by MH21-HYDRES.

Second, we incorporated two functions into the program to improve the practicality, that is hybrid coupling (HCM) and dual-grid system (DGS). In the simulations using the HCM, the ICM is applied only to the grid blocks (or elements) with noticeable strain/deformation, while the ECM is applied to those with negligible strain. In the DGS, the sizes of flow simulation grid blocks and geo-mechanics simulation elements can be defined independently. The simulation studies using the program revealed that the HCM could remarkably shorten the computational time without compromising calculation accuracy. It was also confirmed that the combination of the HCM and the DGS could dramatically reduce the computational time, although the calculation results were slightly different from those with smaller elements

Keywords : Methane hydrates, Depressurization method, Geo-mechanics, Coupling simulation, Hybrid coupling, Computational time

* 平成 30 年 6 月 13 日, 平成 30 年度石油技術協会春季講演会個人講演、
 開発・生産部門にて講演 This paper was presented at the 2018 JAPT
 annual meeting held in Niigata, Japan, June, 13, 2018.

** 早稲田大学大学院 創造理工学研究科 Graduate School of Creative
 Science and Engineering, Waseda University (現所属) 独立行政法人
 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 Japan Oil, Gas and Metals National
 Corporation (JOGMEC)

*** 早稲田大学大学院 創造理工学研究科 Graduate School of Creative
 Science and Engineering, Waseda University

**** アブダビ石油株式会社 Abu Dhabi Oil Co. Ltd.

***** 早稲田大学 創造理工学部 School of Creative Science and
 Engineering, Waseda University

***** 国立研究開発法人産業技術総合研究所 National Institute of
 Advanced Industrial Science and Technology

***** 日本オイルエンジニアリング株式会社 Japan Oil Engineering
 ***** 西日本技術開発株式会社 West Japan Engineering Consultants

† Corresponding author : E-Mail : iwata-shigeki@jogmec.go.jp

1. はじめに

メタンハイドレート (MH) 開発においては、未固結な砂が形成する貯留層に元来固体として存在していた MH をメタンガスと水とに分解してメタンガスを採取するため、MH 層の変形や圧密による浸透率の低下、砂の流動、亀裂の発生、ケーシングの変形・破壊など、MH 開発において大きな障害となる問題が発生することが予想される。MH 生産手法として最も有効なものとして提案されている減圧法による生産 (栗原ら, 2009) においては、貯留層中の圧力が急激に低下し、地層の骨格構造の一部を形成していた MH が急激に分解するため、上記のような岩石力学挙動を主な要因とする生産障害が比較的発生しやすいと予想される。一方で、一般的な在来型石油・天然ガスでは、固結した貯留層から、減圧法よりも小さなドロウダウンで生産する。すなわち、MH 分解・生産挙動の方が、在来型石油・天然ガスの生産挙動よりも、はるかに岩石力学挙動の影響を受けやすいと考えられる。したがって、今後の実践的な MH 開発・生産に向けた貯留層挙動予測、操業計画策定、環境影響評価などにおいては、MH 分解・生産挙動と岩石力学的挙動とを定量的かつ高精度で統合した評価・解析が必要となると考えられる。また、ヒストリーマッチングなどの解析作業には、地下性状の不確実性など、さまざまな状況を考慮した膨大な数の貯留層シミュレーションを実施する必要があるため、高精度な評価・解析だけではなく、現実的な時間内での数値シミュレーションが実施可能であることも重要であると考えられる。

メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (MH21) の下で開発された MH 分解・生産挙動予測シミュレータ MH21-HYDRES は、さまざまな室内実験やフィールド産出試験の設計、挙動予測、結果の解析に使用されている。さらに、国際 MH シミュレータ比較プロジェクトに参加し、他のシミュレータの計算結果との比較を通して、計算の安定性や計算結果の妥当性が確認され、流動計算に対する信頼性は確立されている。(栗原ら, 2009) しかし、MH21-HYDRES は、地層圧密挙動の簡易的な計算機能 (あらかじめ孔隙圧縮率を陽的に設定) しか有しておらず、生産に伴う圧密などの影響を厳密に考慮しているとは言えない。そこで本研究では、MH21-HYDRES と、MH21 の下で開発された坑井周辺力学挙動・広域地層変形シミュレータ COTHMA (Simply coupled thermo-hydro-mechanical analysis with dissociation and formation of methane hydrate in deformation of multiphase porous media) から岩石力学挙動の計算部分のみを抽出して作成されたモジュールである COTHMA とを連成させるプログラム (統合化プログラム) を開発し、両者を高精度で統合した評価・解析を実現することを目指した。さらには、連成計算に要する計算時間を短縮するための手法およびグリッドシステムを本統合化プログラムへ導入することで、実用的な時間内で両者を定量的かつ高精度で統合した評価・解析を実現可能とするプログラムを開発することを目指した。

2. メタンハイドレート分解・生産挙動予測シミュレータと岩石力学的挙動予測シミュレータの統合化に関する研究

2.1 使用シミュレータ (MH21HYDRES・COTHMA)

2.2.1 メタンハイドレート分解・生産挙動予測シミュレータ (MH21-HYDRES)

MH21-HYDRES は、MH の分解・生産挙動を予測可能な数値シミュレータであり、MH21 において、日本オイルエンジニアリング株式会社、国立大学法人東京大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所 (産総研) が共同で開発したシミュレータである。前述したように、室内実験やフィールド産出試験への適用実績や国際 MH シミュレータ比較プロジェクトへの参加などを通して、その信頼性は確立されている。MH21-HYDRES は二次元円筒座標系、三次元直交座標系およびフレキシブルグリッド (コーナーポイントグリッド) システムに対応しており、三次元モデルでは、一部のグリッドを細分化すること (局所細分化機能) や、円筒座標系グリッド (ハイブリッドグリッド) に分割することも可能である。メタン、窒素、二酸化炭素、水、メタノール、塩および砂に対する 7 つの質量保存式と総エネルギー保存式を支配方程式としており、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、メタノール総質量分率、塩総質量分率、砂総質量分率を主要変数としている。詳しくは、栗原ら (2009) を参照されたい。

2.1.2 坑井周辺力学挙動・広域地層変形シミュレータ (COTHMA)

COTHMA は西日本技術開発株式会社によって開発された統合化用圧密挙動評価モジュールである。MH21 の下で、西日本技術開発株式会社、産総研によって開発された応力、浸透流、熱伝導、MH 分解・生成などを完全陰解法により連成した有限要素法解析シミュレータである COTHMA (天満ら, 2013) を統合化用に改良したものであり、応力の釣り合い式のみを支配方程式としている。COTHMA は MH 胚胎層の圧密変形挙動予測、ガス生産挙動予測、MH や氷の分解・再生成やこれらによる地層変形・強度特性変化予測、坑井と坑井近傍の地層との相互作用を考慮した坑井の安全性の検討などを 1 つのシミュレータで同時に行うことができるという長所を持つ一方で、実際のフィールド規模の問題に対して膨大な計算時間を必要とする。また、MH21-HYDRES は COTHMA のように圧密変形の影響を精度よく評価することは困難である一方で、生産時の圧力、温度、飽和率などの予測精度や計算時間の点で、COTHMA よりも優れている。よって、MH21-HYDRES と COTHMA の長所を有効に利用するために、両者を統合すべく開発されたのが COTHMA である。

2.2 統合化手法の比較

約 20 件の先行研究の文献調査 (Dean *et al.* 2003, Tran *et al.* 2009 他) の結果、流動シミュレータと岩石力学シミュレータの統合化手法として、陽的統合法、繰り返し法、完

全陰解法、擬似陰解法の4種類が適用可能であることが確認された。これらの文献にはMHを題材としたものは存在しないが、代表的な重質油回収法のSAGD法を対象としたものも多く、未固結地層を対象としている点や貯留層中の温度変化を考慮しているという点で本研究と条件が類似しているため、本研究にとって有用性が高いと考えられる。以下に各手法の概要を説明する。また、表2.1に、各手法を適用（プログラムの可搬性）、計算速度、計算精度の3つの観点から比較した表を示す。

(1) 陽的統合法 (Explicit method)

流動シミュレータの計算結果を、岩石力学シミュレータへ受け渡す。その結果に基づき、岩石力学シミュレータで応力、変位、ひずみを計算するが、その結果（変位やひずみの影響を反映した孔隙圧縮率など）を、再度、流動シミュレータへ受け渡すことはしない。そのため、計算速度は非常に速いが、岩石力学的な影響を流動シミュレータでの計算に反映しにくい点、計算精度では他の統合化手法よりも劣るという欠点がある。

(2) 繰り返し法 (Iterative method)

流動シミュレータでの計算結果を岩石力学シミュレータへ受け渡し、応力や変位を計算する。収束条件を満たさなければ、岩石力学シミュレータでの計算結果を流動シミュレータへ引き渡し、再度、流動シミュレータで計算を行う。その結果を岩石力学シミュレータへと受け渡し、計算を行う。これらの計算を、収束条件を満たすまで繰り返す。繰り返し計算を行うため、陽的統合法よりも計算速度は遅く

なるが、岩石力学的な影響を流動シミュレータでの計算に反映できるため、計算精度は陽的統合法よりも高い。

(3) 完全陰解法 (Fully implicit method)

完全陰解法は、流動シミュレータと岩石力学シミュレータの支配方程式を同時に解く。統合化（連成解析）というよりも、1つのシミュレータとして支配方程式を解いて孔隙圧力、各流体飽和率、応力、ひずみなどを求めるという手法である。計算精度は非常に高いが、計算速度が非常に遅いことや、適用性が非常に低いなどの欠点がある。

(4) 擬似陰解法 (Pseudo implicit method)

擬似陰解法では、事前に岩石力学シミュレータを用いて、流動物性値（孔隙圧力など）と岩石力学物性値（ひずみなど）の相関関係をテーブルデータにまとめ、それらを入力データとして流動シミュレータで計算を行う。岩石力学特性と貯留層特性に単純で明確な相関関係があれば、解の精度も高くなるので非常に有効な手法である。しかし、MH 胚胎層における両者の関係性は非常に複雑であり明らかになっていない部分も多く存在するため、本研究への擬似陰解法の適用は難しいと想定される。

本研究では、各手法を3つの観点から比較した結果、いずれにおいても大きな欠点がなく総合的に最も優れていると判断した繰り返し法を、主たる統合化手法として採用し、統合化プログラムを作成した。また、計算速度は優れているが、数値解の精度では繰り返し法よりも劣る陽的統合法も、参考手法として採用した。

2.3 統合化プログラムの開発（繰り返し法・陽的統合法）

本研究で開発した繰り返し法、陽的統合法による統合化プログラムの計算の流れを、図2.1に示す。

開発した統合化プログラムでは、MH21-HYDRESで計算を行った後に、COTHMAsへとデータを移送する。移送手法については後述する。その後、移送したデータを基に、COTHMAsで岩石力学挙動計算を行う。陽的統合法では同一タイムステップ内でCOTHMAsの計算結果をMH21-HYDRESへ引き渡すことはせずに、COTHMAsの計算結

表 2.1 各統合化手法の比較

	繰り返し法	陽的統合法	完全陰解法	擬似陰解法
計算速度	△	○	×	○
計算精度	○	×	◎	△
適用性	○	○	×	○

図 2.1 繰り返し法・陽的統合法の統合化プログラムの計算の流れ

果を用いて、カルマン・コゼニーの式 (Carman-Kozeny equation) により絶対浸透率を更新して、圧密による浸透率低下を再現し、次のタイムステップへ進む。繰り返し法では、収束判定を行い、収束判定を満たさなければ、孔隙圧縮率を更新して、再度繰り返し計算を行う。これを、収束条件を満たすまで繰り返す。一方、収束条件を満たせば、陽的統合法と同様に、カルマン・コゼニーの式で絶対浸透率を更新し、タイムステップを更新する。

2.3.1 有限差分グリッドから有限要素節点へのデータ移送

開発した統合化プログラムでは、有限差分グリッド (FDM グリッド) から有限要素節点 (FEM 節点) へのデータ移送の際にスプライン補間法を用いてデータ補間を行っている。スプライン補間法は、離散的な値を細かい領域に区切り、低次の近似関数を用いて補間を行う補間法である。区分ごとに近似関数を使うので、単純に言えば折れ線近似であるが、領域間の境界が連続関数であるという点で、通常の折れ線近似とは異なる。一般的に、区分ごとに用いる近似関数として 3 次の近似関数がよく用いられており、本研究でも 3 次の近似関数を用いた。スプライン補間法における 3 次の近似関数は式 (2.1) で表される。

$$S_i(x) = a_i(x-x_i)^3 + b_i(x-x_i)^2 + c_i(x-x_i) + d_i \quad (2.1)$$

2.3.2 繰り返し法における収束条件

繰り返し法による連成計算においては、各タイムステップにおいて、MH21-HYDRES で計算される孔隙体積と COTHMAs で計算される孔隙体積が一致すれば計算が収束したとみなし、次のタイムステップへと進む。これにより、減圧の伝搬に伴う孔隙圧力減少や、MH 分解に伴う温度低下などから COTHMAs が応力の釣り合い式より算出した孔隙体積を MH21-HYDRES 内で再現することが可能になるので、MH21-HYDRES で地層圧密などの岩石力学的影響を考慮した MH 分解・生産挙動予測を行うことが可能となる。MH21-HYDRES の孔隙体積と COTHMAs の孔隙体積が一致する条件は、式 (2.2) で表される。

$$\phi_{flow}^{t+dt} = \phi_{geo}^{t+dt}(1 + \varepsilon_V^{t+dt}) \quad (2.2)$$

また、MH21-HYDRES では、以下の式 (2.3) に基づき、孔隙率が孔隙圧力のみ依存しているとして、孔隙率を算出している。そのため、開発した統合化プログラムでは、式 (2.4) で孔隙圧縮率を再定義し、COTHMAs の出力した孔隙率 ϕ_{geo}^{t+dt} 、体積ひずみ ε_V^{t+dt} を用いて、孔隙圧縮率を更新している。

$$\phi_{flow}^{t+dt} = \phi_{ref} \{1 + c_r(P^{t+dt} - P_{ref})\} \quad (2.3)$$

$$c_r = \frac{1}{\phi_{ref}} \frac{\phi_{geo}^{t+dt}(1 + \varepsilon_V^{t+dt}) - \phi_{ref}}{P^{t+dt} - P_{ref}} \quad (2.4)$$

この孔隙圧縮率を MH21-HYDRES へと受け渡すことで、MH21-HYDRES が、 j 回目の繰り返し計算で、 $j-1$ 回目の繰り返し計算において COTHMAs が出力した孔隙率

$\phi_{geo,j-1}^{t+dt}$ と体積ひずみ $\varepsilon_{V,j-1}^{t+dt}$ から、式 (2.2) で示した両シミュレータで計算される孔隙体積が一致するような孔隙率値を MH21-HYDRES が出力することを可能にしている。よって、本研究では、繰り返し法の収束条件を式 (2.5) で設定した。

$$|\phi_{flow}^{t+dt} - \phi_{geo}^{t+dt}(1 + \varepsilon_V^{t+dt})| < \delta \quad (2.5)$$

2.4 動作検証

本研究では開発した統合化プログラムの正常動作、および繰り返し法の有用性を確認すべく、2 種類の計算モデルを用いて動作検証を実施した。1 つ目は二次元円筒座標系・単一坑井の砂泥互層を模擬したモデルを用いた検証である。ここでは、繰り返し法、陽的統合法、MH21-HYDRES 単独 (単独ラン) による計算を行い、それらの結果を比較することで、繰り返し法の特徴を確認した。2 つ目は、室内実験を模擬したモデルを用いた検証である。ここでは、2008 年に産総研において実施された減圧法による MH 分解時の圧密挙動ならびに浸透性特性に関する室内実験を対象として、繰り返し法を用いて実験結果を再現し、それを実験結果や完全陰解法コード COTHMA でのマッチング結果と比較することにより、繰り返し法の有用性を確認した。

2.4.1 繰り返し法の特徴の確認 (検証 1)

(1) 計算モデル

本検証では、図 2.2 で表されるような二次元円筒座標系モデルを使用した。半径方向に 40 グリッド、深度方向 (垂直方向) に 100 グリッドのモデルである。モデルの概要を表 2.2 に示す。本モデルは、水深 1,000 m の海底下 300 m に MH を含む砂層と含まない泥層が交互に重なり合った砂泥互層が存在する状況を想定している。層厚 50m の砂泥互層 (砂層 1 m、泥層 1 m の 25 サイクル) は生産井から水平方向に 250 m まで広がっていて、砂泥互層以外は全て MH を含まない泥層で構成されていると仮定した。

(2) 計算結果

(1) で示した条件の下で、100 日間の減圧法による生産を想定し、繰り返し法、陽的統合法、単独ランを実施、各手法を比較、繰り返し法の特徴の確認を実施した。

(ア) 生産レート (ガス・水)

ガス・水生産レート時間変化の計算結果を図 2.3 に示す。

図 2.2 検証 1 で使用した計算モデル

生産期間後半になるにつれて、生産レートが大きく波打っているのは、計算に使用している計算モデルのグリッドサイズ（モデル中心から遠ざかるにつれてグリッドサイズが粗大化する）に起因するものである。

（イ）地層変位分布・孔隙圧力分布・MH 飽和率分布
生産終了後（100 日後）の坑井近傍における貯留層上面における地層変位分布、仕上げ区間中心深度における孔隙圧力分布、MH 飽和率分布の計算結果を、各々図 2.4、図 2.5、図 2.6 に示す。

表 2.2 検証 1 に用いた計算モデルの仕様

解析次元	二次元円筒座標系 (40 × 100 グリッド)	操業条件	仕上げ区間	30 m (MH 層中央深度から上下 15 m ずつ)
グリッド数	4,000		流動坑底圧力	3.0 (MPa) (10.5 MPa/Day で減圧)
要素数	4,000	坑井特性	裸坑直径	0.3112 m
節点数	4,141		傾斜角	0 (°)
		スキnfactor	0.0	
境界節点数	280	境界条件	上部境界：定温 (4℃), 定圧 (10.1013 MPa)	
			下部境界：断熱・流動遮断	
			半径方向外側：定温・定圧	
			モデル右端・左端：水平方向変位固定 モデル下端：鉛直方向変位固定

図 2.3 生産レート時間変化（左：ガス生産レート時間変化；右：水生産レート時間変化）（検証 1）

図 2.4 生産終了後の貯留層上面の地層変位分布（検証 1）

図 2.5 生産終了後の仕上げ区間中心深度における MH 飽和率分布（検証 1）

図 2.6 生産終了後の仕上げ区間中心深度における孔隙圧力分布 (検証 1)

図 2.7 各連成計算手法の計算時間の比較 (検証 1)

(ウ) 計算時間

各手法の計算時間の比較を図 2.7 に示す。

(3) 考 察

検証 1 では、繰り返し法の計算結果を陽的統合法、単独ランと比較し、繰り返し法の特性を確認した。計算結果について、繰り返し法は陽的統合法や単独ランよりも低いガス生産レート、同程度の水生産レートを示した。これはまず、繰り返し法による計算が、図 2.4 で示した地層圧密によって孔隙圧力が図 2.6 に示すように維持される影響を反映できているためであると考えられる。繰り返し法による計算では、COTHMAs での計算結果に基づいて孔隙圧縮率を更新する。そのため、圧力減退により孔隙が急激に収縮して圧力が維持されることで、MH 分解の抑制や排水などが引き起こされる現象を再現することが可能であると考えられる。また、繰り返し法、陽的統合法では、COTHMAs の計算結果（すなわち、圧密による孔隙率の減少）を、カルマン・コゼニーの式を用いて絶対浸透率に反映する。排水機構が作用していると考えられる繰り返し法の水生産レートを除き、連成計算のガス・水生産レート計算結果が

単独ランの結果よりも低い値を示しているのは、この圧密による絶対浸透率減少の影響を再現できているためであると考えられる。

計算時間については、繰り返し法は陽的統合法の約 15 倍、単独ランの約 166 倍となり、繰り返し法の計算には多大な計算時間を要することが確認された。

以上より、繰り返し法が、絶対浸透率減少、孔隙圧力維持など、MH からのガス生産に伴う地層圧密が MH 分解・生産挙動に与える影響について、陽的統合法、単独ランよりも精度よく評価可能であることが確認できた。しかし、計算時間については、非常に長い計算時間を要するという、実用性を考える上での繰り返し法の短所も明らかとなった。

2.4.2 室内実験再現による統合化プログラムの検証・繰り返し法の有用性の確認 (検証 2)

(1) 室内実験の概要

本検証に用いた室内実験は、前述したように、2008 年に産総研において坂本らによって実施されたもので、減圧法を対象とした圧密・浸透成試験である。内径 150 mm、高さ 100 mm のステンレス製浮動管内に砂を充填し、孔隙内に人工的に MH を生成した模擬胚胎層（サンドパック）を供試体として用いている。図 2.8 に実験装置の概略図を示す。試験用セルの中央には流体産出用および分解圧力制御用として 2 本のステンレス管が挿入されている。装置を用いて供試体上端部に一定の地盤応力に相当する荷重を載荷しつつ、これらのステンレス管を通して背圧弁を用いてサンドパック内を減圧することで、減圧および MH 分解による圧密挙動を室内実験により評価することが可能となっている。室内実験の詳細は、坂本ら（2008）を参照されたい。また、本室内実験結果からサンドパックを構成する砂粒子の粒度がガス・水産出挙動に及ぼす影響が顕著であることが確認されており、産総研において実施された、本実験を対象とした COTHMA を用いたシミュレーション（坂本ら、2010）では、3 種類の砂試料（豊浦砂（平均粒径 200 μm ）、7 号珪砂（平均粒径 180 μm ）、8 号珪砂（平均粒径 115 μm ））を用いた各々の実験に対してマッチング

図 2.8 実験装置の概略図 (坂本ら、2008)

を実施している。そのため、本検証でも、3種類の実験に対して各々計算モデルを構築し、シミュレーションを実施した。

(2) 計算モデルの構築

開発した統合化プログラムを用いて室内実験を再現するために、図 2.9 の二次元円筒座標系のモデル（半径方向に 29 グリッド、鉛直方向に 46 グリッド）を用いてシミュレーションを実施した。グリッド（要素）数は 1,334 個、節点数は 1,410 個である。減圧法において、温度が MH の平衡条件近傍まで低下した後の分解は、MH 胚胎層の熱伝導が支配的因子となる。そのため、サンドバックだけではなく、周囲のステンレス部分も含めてシミュレーションモデルを作成した。また、計算結果を実験結果と比較するために、モデル内に 1 点の変位測定点（モデル中心から水平方向に 45 mm、モデル上端）と 4 点の温度測定点（モデル中心から水平方向に 25.0, 37.5, 50.0, 62.5 mm、モデル最深部から 50 mm）を配置した。モデルの中央には実験装置における焼結フィルター、スポンジを模擬した領域を配置し、減圧は、実験における試験用セル中央部分の圧力時間変化を、坑底圧力としてテーブルデータで入力することで表現した。本実験では、坑底圧力は 2 分間で初期圧力から所定圧力まで減圧させている。外部のステンレス部分については絶対浸透率を 1.0133×10^{-10} mD と非常に小さい値を与えることで、流動に関しては閉境界の取り扱いとした。また、実験では、容器は冷媒循環装置を用いて一定温度に制

御されており、減圧に伴って生じる温度勾配に依存して、サンドバック内に熱が流入する。これを模擬するために、ステンレス部分外側は一定温度（11℃）とする境界条件を与えた。さらに、上部ステンレス部分（試験用セルの加圧盤とステンレス製リングの接触面）の力学的な不連続挙動を表現するために、直下にサンドバックが存在する部分としない部分の境界にすべりや剥離を表現するためのモデルである接触面要素（Slipping element）を配置した。サンドバック部分については、試料の不均質性を表現するために、坂本ら（2010）と同様に 22 個の小領域に分割し、各々に異なる物性値を与えた。モデルの概要を表 2.3 に示す。

(3) ヒストリーマッチングの概要

本研究で実施したヒストリーマッチングの手順について記す。本研究では坂本ら（2010）と同様に、減圧法における MH 分解挙動、圧密挙動、ガス・水生産挙動の再現のために、サンドバックを構成する砂粒子の熱伝導率 λ_s 、および総熱伝導率 λ_c 計算モデル、ポアソン比 ν 、相対浸透率を変化させた。手順としては、サンドバック内の各測定点での温度時間変化（以下、温度分布時間変化と呼ぶ）は熱伝導率を主として変化させることで再現した。圧密挙動に関してはポアソン比を主として変化させることで再現した。室内実験におけるガス・水生産挙動は相対浸透率を主として変化させることで再現した。

(ア) 熱伝導率

室内実験におけるサンドバック内の温度分布時間変化を再現すべく、適切な λ_c 計算モデル（並列モデル、分散モデル）を検討し、 λ_s を変化させることで、室内実験結果の再現を行った。

λ_c 計算モデルとしてさまざまなモデルが提唱されているが、本研究では、式 (2.6) の並列モデル、式 (2.7) の分散モデルを用いた。並列モデルは地層中で各相（岩石粒子、孔隙内に存在する液相（氷）、気相、MH）が並列に分布していると仮定しているのに対し、分散モデルはランダムに分布していると仮定している。

$$\lambda_c = (1 - \phi) \lambda_s + \phi S_w \lambda_w + \phi S_h \lambda_h + \phi S_g \lambda_g \quad (2.6)$$

$$\lambda_c = \lambda_s^{(1-\phi)} \lambda_w^{\phi S_w} \lambda_h^{\phi S_h} \lambda_g^{\phi S_g} \quad (2.7)$$

図 2.9 検証 2 で用いた計算モデル

表 2.3 検証 2 で用いた計算モデルの仕様

	豊浦砂モデル	7 号珪砂モデル	8 号珪砂モデル
初期圧力 (MPa)	10.0	10.0	10
初期温度 (℃)	11.1	10.7	10.6
孔隙率	0.3854	0.3810	0.3940
絶対浸透率 (mD)	9911.72	8444.63	3670.69
MH 飽和率	0.393	0.404	0.360
ガス飽和率	0.147	0.020	0.039
水飽和率	0.460	0.577	0.601
坑底圧力 (MPa)	3.10	3.30	3.17
有効上載圧力 (MPa)	7.96	7.89	7.70

(イ) 岩石力学パラメータ

圧密挙動を再現すべく、使用する力学構成式を検討し、 ν を変化させた。坂本ら (2008) の実験結果から、初期 MH 飽和率 S_h 分布が圧密挙動に大きな影響を及ぼす重要な因子であることが明らかになっている。本研究では、初期 S_h 分布が岩石力学挙動に及ぼす影響を反映すべく、力学構成式として、過去の室内実験結果 (K. Miyazaki *et al.*, 2008) を基に、坂本ら (2010) が豊浦砂に対して求めた式を参考にして、コンプライアンス可変長非線形モデルを用いて力学計算を実施した。すなわち、本モデルの初期弾性係数は式 (2.8) で計算される。本ヒストリーマッチングでは e_1 , e_2 , e_3 , e_4 の値として各々 229, 0.54, 0.20, 1.91 を用いた。

$$E_i = e_1 (\sigma_3')^{e_2} + e_3 (S_h)^{e_4} \quad (2.8)$$

(ウ) 相対浸透率

サンドバック内の温度分布、圧密挙動を再現した後に、相対浸透率を変化させることで、ガス・水産出挙動の再現を実施した。ヒストリーマッチングには、坂本ら (2006) により提唱されている気相・液相相対浸透率 (k_{rg} , k_{rw}), 不動水飽和率 S_{wcr} , 残留ガス飽和率 S_{gco} の計算式を参考にして、式 (2.9) ~ (2.13) で計算した値を用いた。ヒストリーマッチングでは、各相対浸透率の曲率 N_w , N_g および S_{wcr} , S_{gco} , 不動水飽和率 S_{gcr} , 残留水飽和率 S_{wco} を変化させた。また、簡単のため S_{wcr} と S_{wco} , S_{gcr} と S_{gco} は各々等しいとした。

$$k_{rg} = k_{rg_wco} \left(\frac{1 - S_w^* - S_{gcr}}{1 - S_{wco} - S_{gcr}} \right)^{N_g} \quad (2.9)$$

$$k_{rw} = k_{rw_gco} \left(\frac{S_w^* - S_{wcr}}{1 - S_{wcr} - S_{gco}} \right)^{N_w} \quad (2.10)$$

$$S_{wcr} = S_{wcr_ori} - R_{vhw} S_{h_ini} \quad (2.11)$$

$$S_{gco} = S_{gco_ori} (1 - S_{h_ini})^{N_{sgr1}} \left\{ \frac{1 - S_{wcr} - (1 - R_{vhw}) S_{h_ini} - S_{h_re}}{1 - S_{wcr} - (1 - R_{vhw}) S_{h_ini}} \right\}^{N_{sgr2}} \quad (2.12)$$

$$S_w^* = \frac{S_w - S_{wcr}}{1 - S_{wcr} - S_{gco} - S_h} \quad (2.13)$$

なお、MH 存在下での毛細管圧力については、現状で未解明な部分も多いため、毛細管圧力を考慮せず、本研究では相対浸透率曲線形状のみを変化させることで、毛細管圧力の影響も反映し、孔隙内でのガス・水流動挙動の再現を試みた。

(4) ヒストリーマッチング結果

(3) で述べた条件の下で、豊浦砂モデル、7 号珪砂モデル、8 号珪砂モデルの全てに対して、温度分布時間変化、圧密挙動、ガス・水産出挙動の順でヒストリーマッチングを実施した。マッチング結果の一例として、豊浦砂モデルの結果を以下に示す。

(ア) 温度分布時間変化に関するヒストリーマッチング

前述のとおり、 λ_c 計算モデル (並列モデル、分散モデル) の適用性および λ_s の最適値を検討した。

まず、 λ_c 計算モデルの検討について述べる。ここでは、 λ_s を豊浦砂の主成分である SiO_2 の熱伝導率 $8.0 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ に固定し、2 つのモデルで温度分布時間変化を計算した。図 2.10 に計算結果を示す。なお、水、ガス、MH の熱伝導率はそれぞれ $0.5564 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, $0.0335 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, $0.393484 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ を用いた。

坑底圧力が所定値まで達する 2 分後あたりまでは、MH 分解に伴う吸熱反応が支配因子となり、急激な温度低下が発生している。ここでは、両モデルの計算結果はおおむね一致している。その後、MH 分解が落ち着き、一定温度に制御されたステンレス部分からの熱供給が支配因子となり、サンドバック内の温度は上昇する挙動を示した。両モ

図 2.10 熱伝導率計算モデルの検討結果 (左: 並列モデル; 右: 分散モデル) (検証 2)

デルの計算結果について、並列モデルは、温度上昇速度を過大に計算してしまっている一方で、分散モデルは実験の温度上昇挙動を良好に表現可能であることが判明した。これは、各モデルの相の分布の仮定に基づくものと考えている。並列モデルは各相が並列に分布していると仮定している。よって、熱伝導率の高い相でより早く熱が伝わり、 λ_c が大きく計算される傾向にある。一方で、分散モデルでは各相が試料各所に分散していると仮定しているため、 λ_c を並列モデルよりも低めに計算する傾向にある。よって、本検証では分散モデルがサンドバック内の各相の分布状態を良好に表現していると考え、分散モデルを用いてヒストリーマッチングを実施することとした。

次に、 λ_s を変化させることで、実験で観測された温度分布時間変化を再現することを試みた。結果として、図 2.11 に示すように、 λ_s を $7.5\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ に調整することで、おおむね実験結果を再現することに成功した。 SiO_2 の熱伝導率の文献値の $8.0\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ よりもやや低めとなったが、サンドバック内では砂粒子は完全に噛み合っており、砂粒子間に MH や水などが入り込んでいることが想定されるため、この値は妥当であると考ええる。

(イ) 圧密挙動に関するヒストリーマッチング

次に、 ν を変化させることで、実験で観測された圧密挙動を再現することを試みた。力学構成式の他のパラメータは坂本ら (2010) が Miyazaki *et al.* (2008) の室内試験結果を基にして豊浦砂に対して求めた値を使用し、一定とした。結果として、図 2.12 示すように、 ν を 0.24 に調整することで、実験結果をおおむね再現することに成功した。これは、通常の地盤材料のとして妥当な範囲にあると言える。なお、グラフは下向きの変位を正として表示している。

(ウ) ガス・水産出挙動に関するヒストリーマッチング

最後に N_w , N_g , S_{wcr} , S_{gcr} , S_{wco} , S_{gco} を変化させることで、実験でのガス・水産出挙動を再現することを試みた。各エンドポイントの調整に際しては、式 (2.11), (2.12)

中の MH が存在しない場合の不動水飽和率 S_{wcr_ori} , 残留ガス飽和率 S_{gco_ori} を調整した。結果として $N_w = 2.2$, $N_g = 12.7$, $S_{wcr_ori} = 0.300$, $S_{gco_ori} = 0.298$, に調整することで、実験結果をおおむね良好に再現することに成功した (図 2.13)。

(5) ヒストリーマッチング結果の妥当性の検討

実施したヒストリーマッチング結果を、完全陰解法シミュレータである COTHMA を用いたヒストリーマッチング結果 (坂本ら, 2010; 以下, COTHMA), 室内実験 (坂本ら, 2008; 以下, 実験) 前に測定された各パラメータの値と比較することで、開発した統合化プログラムの正常動作、および繰り返し法の有用性を確認した。室内実験で観測された MH 分解挙動および岩石力学挙動を再現するようなマッチングパラメータの組み合わせ (例えば、相対浸透率を変化させた際の温度・岩石力学的挙動への影響など) は複数存在すると想定され、現実的なパラメータの範囲内で実験結果を再現できているのかを確認した。

まず、開発した統合化プログラムのヒストリーマッチング結果と COTHMA を比較した結果を示す。ここでは例と

図 2.12 圧密挙動のヒストリーマッチング (検証 2)

図 2.11 温度分布時間変化のヒストリーマッチング結果 (検証 2)

図 2.13 ガス・水産出挙動のヒストリーマッチング結果 (検証 2)

図 2.14 計算結果の比較 (坂本ら, 2010, 8 号珪砂モデル) (検証 2)

して、8 号珪砂モデルのガス・水産出挙動における比較結果を、図 2.14 示す。両者とも良好に室内実験結果を再現できている。

次に、本検証で使用したパラメータを COTHMA で使用されたパラメータおよび実験前の各パラメータ測定値と比較することで、本ヒストリーマッチングの妥当性を確認した。比較結果を表 2.4 に示す。なお、 λ_s 計算モデルについては、本検証、COTHMA とともに、全ケースで分散モデルを採用している。

まず、 λ_s については、全ケースで文献値である $8.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ に近い値、かつ、COTHMA とおおむね近い値で実験結果を再現することに成功した。8 号珪砂で本検証、COTHMA とともに文献値よりもやや低い λ_s となっているのは、実験で使用された 8 号珪砂のサンドパックが他のサンドパックよりも未固結であり、砂粒子同士の接触状況が良くなかったためであろうと考えられる。次に、 ν についても COTHMA とおおむね近い値で実験結果を再現することに成功した。また、値も地盤材料としては妥当な値の範囲内である。ただ、7 号珪砂、8 号珪砂でやや小さい ν となっているのは、両モデルの力学構成式の他のパラメータとして、豊浦砂に対して適用したパラメータと同じ値を適用したためであると考えられる。最後に、ガス・水産出挙動の

再現に使用したパラメータであるが、これらについても、おおむね COTHMA に近い値で実験結果を再現することに成功した。 S_{wcr_ori} 、 S_{geo_ori} については、COTHMA 同様に、実験前測定値よりも小さな S_{wcr_ori} 、大きな S_{geo_ori} となった。これは、圧密の影響であると考えており、圧密によって親水性の傾向を示す珪砂と濡れ相である水との接触面積が減少、また、孔隙径が小さくなることで、非濡れ相のガスがトラップされやすくなったためであると考えられる。

以上から、統合化プログラムを用いて、COTHMA とおおむね近い値で実験結果を再現することに成功したと言え、本ヒストリーマッチングの妥当性が確認されたと考える。また、それにより、統合化プログラムの正常動作、および繰り返し法の有用性が確認されたと考える。

3. 連成計算の高速化に関する研究

第 2 章で開発した統合化プログラムを用いて繰り返し法による連成計算を実施した結果、繰り返し法による計算では、孔隙圧力が減少し、MH 分解が進行することによって地層圧密などが進行することによる貯留層の絶対浸透率減少、急激に孔隙率が減少することにより孔隙圧力が維持される影響など、MH からのガス生産時の岩石力学的挙動が MH 分解・生産挙動に与える影響を精度よく評価可能であるということが明らかとなった。しかし一方で、貯留層内の特性変化の大きい時間領域においては多くの繰り返し計算を行うため、非常に長い計算時間を要するという実用的な欠点も明らかとなった。そこで、本章では計算精度を維持しつつ計算時間を短縮可能な手法として、特性変化の大きい領域にのみ繰り返し法を適用し、変化の小さい領域には陽的統合法を用いるハイブリッド統合法 (Hybrid coupling method, HCM) を考案、上記で開発した統合化プログラムへ導入した。さらに、さらなる計算時間の短縮を図るべく流動計算用グリッド (FDM グリッド) と力学計算用要素 (FEM 要素) で異なる大きさのものを用いる Dual-Grid-System (DGS) (Tran *et al.*, 2008) を統合化プログラムに導入した。

表 2.4 ヒストリーマッチングに適用したパラメータの一覧 (検証 2)

	モデル	λ_s [W/(m · K)]	ν [-]	S_{wcr_ori} [-]	S_{geo_ori} [-]	N_w [-]	N_g [-]
実験前測定値 坂本ら (2008)	豊浦砂	8.0 (文献値)		0.352	0.287		
	7 号珪砂	8.0 (文献値)		0.552	0.186		
	8 号珪砂	8.0 (文献値)		0.713	0.133		
COTHMA 坂本ら (2010)	豊浦砂	6.0	0.30	0.300	0.300	2.0	7.0
	7 号珪砂	7.4	0.19	0.360	0.290	3.0	10.0
	8 号珪砂	3.8	0.07	0.600	0.300	1.0	15.0
検証 2	豊浦砂	7.5	0.24	0.300	0.298	2.2	12.7
	7 号珪砂	8.0	0.19	0.380	0.270	3.1	8.5
	8 号珪砂	5.0	0.09	0.350	0.170	1.9	10.0

3.1 連成計算高速化手法の概要

3.1.1 ハイブリッド統合法 (Hybrid coupling method, HCM)

HCM は、繰り返し法と陽的統合法の各々の長所を生かして、計算時間を短縮することを目的として、坑井近傍などの変化の大きい領域には繰り返し法を適用し、変化の小さい領域には陽的統合法を適用する統合化手法である。

繰り返し法と陽的統合法の長所、短所を表3.1にまとめた。

表3.1に示したように、陽的統合法は、各タイムステップでの計算回数が1回であり、計算が非常に速いという長所があるが、孔隙圧縮によって孔隙圧力が維持される現象などを再現できないという欠点がある。一方で、繰り返し法は地層変形に関する情報を更新し、孔隙収縮による孔隙圧力維持などの現象を再現可能であるため、地層圧密などの岩石力学挙動がMH分解・生産挙動に及ぼす影響などを高精度で評価することが可能である。ただし、繰り返し計算を行うため、非常に長い計算時間を要するという欠点がある。

全グリッド・要素を対象に繰り返し法による連成計算を実施した場合、実際に計算される孔隙体積が両シミュレータで一致せずに、繰り返し計算が行われているのは、孔隙圧力・温度変化量が大きい領域、すなわち、坑井近傍やMH分解フロント周辺の領域などに限定され、その他の領域では1, 2回程度の繰り返し計算で計算が収束していることが確認されている。したがって、変化が大きく収束条件を満たしていないグリッドのみで繰り返し法を適用し、変化が小さく収束条件を満たしたグリッドは計算から除外（陽的統合法）しても、全グリッドで繰り返し法を適用した場合と同様の計算結果を得られることが期待できる。さらには、繰り返し計算を行うグリッド数を削減することで、大幅に計算時間を短縮できると考えられる。HCMを適用した場合、収束条件を満たしていないグリッドのみで繰り返し計算を実施し、収束グリッドは計算から除外するため、陽的統合法、および繰り返し回数の異なる繰り返し法の解が、計算領域内に混在する形となる。また、HCMは適用性が非常に高い陽的統合法と繰り返し法を組み合わせた統合化手法であるので、非常に高い適用性も併せ持つ。以上より、HCMは解の精度、計算速度、適用性の観点から非常に優れた統合化手法であると考えられる。

3.1.2 Dual-Grid System (DGS)

DGSは、流動計算で用いるグリッド (FDM グリッド)

と岩石力学計算で用いる要素 (FEM 要素) で、異なる大きさのものを用いることで、連成計算の解の精度を維持しつつ、計算時間を短縮することを目的としたグリッドシステムである。

流動計算では流動挙動や相変化などを精度良く評価するため、比較的細かいFDMグリッドを計算領域に配置して、坑井周辺の圧力・温度分布や各相間（気相、液相、固相）の成分変化などを詳細に計算する必要がある。仮に、坑井周辺に粗いFDMグリッドを配置してしまった場合、1つのグリッド内の圧力・温度などは、そのFDMグリッドの存在する領域の平均値として計算されるので、計算される圧力分布、温度分布などの予測精度が低下し、そこから得られる生産量予測の精度も著しく低下することが予想される。一般的に、細かいグリッドを計算領域に配置することは、グリッド数の増加、すなわち、計算時間の増加につながるが、流動計算に用いられる有限差分法は、岩石力学計算に用いられる有限要素法よりも解くべきマトリックスサイズが小さく、計算速度が速いので、微細なグリッドを配置しても、岩石力学計算で同じ要素を用いたときほど計算速度は低下しないと考えられる。

一方で、岩石力学計算では、流動計算で得られた圧力や温度の計算値を用いて、有限要素法で変位やひずみ、応力を計算する際に、流動計算よりも非常に長い計算時間を要する。そのため、連成計算の計算時間を短縮するには、比較的粗いFEM要素を計算領域に配置するべきであると考えられる。

そこで、流動シミュレータと岩石力学シミュレータの連成計算で、比較的よく用いられているのが、FDMグリッドとFEM要素で異なる大きさのものを用いるDGSである。微細なFDMグリッドと粗いFEM要素を計算領域に配置することで、同じ大きさのFDMグリッドとFEM要素を用いるSingle-Grid System (SGS) とほぼ同様の計算結果を、大幅に短い計算時間で得ることができると期待される。

3.2 連成計算高速化手法の統合化プログラムへの導入

3.2.1 HCM

(1) HCMの計算手法の決定

HCMの計算手法として、

- A) 流動モデルのみ縮小していく方法
- B) 岩石力学モデルのみ縮小していく方法
- C) 両モデルをともに縮小していく方法

の3通りが考えられる。まず、縮小流動モデルでの計算について説明する。流動計算においては、外部からモデル内に流入する流体量や熱量を考慮するため、モデル境界に存在するグリッドに対して、境界条件として圧力勾配や温度勾配などを定義する必要がある。そのため、縮小モデルでの流動挙動予測を行う際には、その前のタイムステップまたは同じタイムステップ内の前の繰り返し計算でのモデルの圧力、温度などの計算結果を記憶しておき、それらを用いて、縮小モデルの境界での圧力勾配、温度勾配を陽的に定義する必要がある。

表 3.1 繰り返し法と陽的統合法の比較

	繰り返し法	陽的統合法
絶対浸透率の更新	○	○
孔隙圧縮率の更新	○	×
計算速度	△	○
計算精度	○	×
適用性	○	○

また、岩石力学計算では、境界部分に固定条件や強制変位条件などの変位境界条件を付与する必要がある。そのため、縮小岩石力学モデルでの計算では、以前の計算結果を記憶しておき、それらを用いて、縮小モデルに与える変位境界条件を定義する必要がある。

本研究では、各シミュレータ単独での計算時間が、数値解法として有限要素法を使用している岩石力学シミュレータの方がはるかに長いこと、および境界条件の適用難易度が縮小岩石モデルでの計算の方が容易であることなどから総合的に判断し、HCM 計算手法として B) の岩石力学モデルのみ縮小していく方法を採用して、プログラムを構築することとした。以下、縮小岩石力学モデルをハイブリッドモデル (HM) と定義する。

(2) HM 自動作成プログラム (ハイブリッド統合法用 Mesh-Builder, HCM-MB) の開発

(ア) プログラムの概要

まず、HCM-MB の概要について述べる。本プログラム

は二次元円筒座標系、三次元直交座標系に対応しており、各グリッドの収束状況を判断した上で、HM を構築、変位境界条件を自動付与することが可能である。本プログラムは、垂直方向の応力が岩石力学計算に与える影響を重視し、ある水平方向の位置に垂直に配置されている要素全てが収束していると判断された場合にのみ、その水平方向の位置に存在する要素を除外して HM を構築している (図 3.1)。したがって、二次元円筒座標系では、単純に縮小された単数の円筒形状の HM が、三次元直交座標系では、水平方向についてのみやや複雑な形状をした任意個数の HM を構築することが可能である。表 3.2 に HCM-MB の概要を示す。

(イ) プログラムの計算の流れ

次に、プログラム内で行っている計算の流れの概要について述べる。図 3.2 に HCM-MB の計算のフローチャートを示す。

本プログラムでは、シミュレーションを実施している計

図 3.1 本研究で統合化プログラムに導入した HCM の概念図

表 3.2 HCM-MB の概要

座標系	二次元円筒座標系, 三次元直交座標系	
モデル形状	二次元円筒座標系	単純円筒形状
	三次元直交座標系	複雑形状モデルにも対応
複数モデル対応	二次元円筒座標系	対応不可
	三次元直交座標系	対応可能
出力データ	グリッドデータ (座標値, グリッド個数, 節点個数, 要素個数)	
	境界節点数, 境界節点座標	
	要素-節点对応関係	
	変位境界条件

図 3.2 HCM-MB における計算の流れ

算モデルの全領域の情報（各方向分割数，全グリッド数，全節点数，要素タイプなど），および各グリッドの収束状況（収束・未収束）を読み込む。次に，読み込んだ情報から，プログラム内で計算モデル全領域を探索し，各要素および節点の収束状況を把握する。これらの情報を基にして，計算モデル内に存在する未収束要素群の位置を確認し，プログラム内で作成する HM の個数を決定する。そして，全ての未収束要素群に対して，流動計算用グリッド情報，岩石力学計算用要素・節点情報，変位境界条件を与えることで，複数かつ複雑形状の HM の構築を可能にしている。

本研究では，開発した HCM-MB を導入することで，複数かつ複雑な形状の HM に対応した HCM 対応統合化プログラムを開発した。

3.2.2 Dual-Grid System

(1) COTHMAs で採用しているグリッドシステム

本研究で使用している COTHMAs は，基本的に MH21-

HYDRES との SGS を用いた統合化を前提に開発されたモジュールである。そのため，MH21-HYDRES の FDM グリッドと COTHMAs の FEM 要素が一対一に対応している必要があり，入力ファイルで各 FEM 要素が，MH21-HYDRES のどの FDM グリッドに対応しているかを定義する必要がある。したがって，本研究では，統合化プログラム内で FEM 要素に対応する仮想 FDM グリッドを定義し，FDM グリッドから FEM 要素へのデータ移送を媒介させることで，圧力や温度などの MH21-HYDRES の計算結果を COTHMAs へと移送して，COTHMAs を用いた DGS での連成解析を可能にした。

(2) 両シミュレータ間のデータ移送

(ア) FDM グリッド，仮想 FDM グリッド間のデータ移送方法について

統合化プログラムでは，式 (3.1) に示す重み付き平均法を用いて，FDM グリッドから仮想 FDM グリッドへデータを移送している。本研究では，坑井からの距離 r_i ，浸透率 k_i ，孔隙体積 $V_{p,i}$ の大きさなどの影響を考慮して，各 FDM グリッドデータに与える重み ω_i を決定した。

$$P_{unknown} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i P_{known,i}}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (3.1)$$

ここで，既知データに与える重み ω_i の計算方法について説明する。まず，各グリッドと坑井までの距離 r_i と各グリッドにおける絶対浸透率 k_i を用いて，式 (3.2) で表される仮想距離 r'_i を定義した。

$$r'_i = \frac{\ln r_i}{k_i} \quad (3.2)$$

この仮想距離を導入することにより，未知データの推定対象である仮想グリッドと同程度に坑井の影響を受けているグリッドにおける値を，より大きく計算結果に反映させることが可能になる。

次に，仮想距離 r'_i において既知データが存在するグリッド (r'_i) の ω_i は，式 (3.3) に示すように，既知データの存在するグリッドの孔隙体積 $V_{p,i}$ を，未知データの推定対象の仮想距離値 $\bar{r}'_i$ との水平距離の差の絶対値 $|r'_i - \bar{r}'_i|$ で割ることによって求めた。

$$\omega_i = \frac{V_{p,i}}{|r'_i - \bar{r}'_i|} \quad (3.3)$$

これを三次元直交座標系に拡張すると，式 (3.4)，(3.5) で表される。

$$\omega_i = \frac{V_{p,i}}{\sqrt{(r'_i - \bar{r}'_i)^2 + (Z_i - \bar{Z}_i)^2}} \quad (3.4)$$

$$r'_i = \frac{\ln(\sqrt{(x_i - x_{well})^2 + (y_i - y_{well})^2})}{k_i} \quad (3.5)$$

(イ) 仮想 FDM グリッド, FEM 要素間のデータ移送方法について

仮想 FDM グリッドから FEM 要素の各節点へのデータ移送は, SGS の場合と同様に, スプライン補間法を用いて行った。

3.3 連成計算高速化手法を導入した統合化プログラムの開発

連成計算高速化手法 (HCM, DGS) を導入した統合化プログラムの計算のフローチャートを図 3.3 に示す。

本プログラムは, SGS を用いた HCM, DGS を用いた HCM, DGS を用いた繰り返し法の 3 種類の高速化計算に対応している。

HCM による計算を行う場合, 収束判定を行った後に, まず, HCM-MB を用いて未収束グリッドを探索, HM を構築, 未収束グリッドのみで孔隙圧縮率を更新して, 再度 MH21-HYDRES で計算を行う。次に, MH21-HYDRES 計算結果を各 HM へ移送し, 各 HM で COTHMAs を用いて岩石力学計算を行い, その結果を用いて各グリッド (HM 内) の孔隙体積を計算し, 再度収束判定を行う。これを, 全てのグリッドが収束するまで, HM を更新しながら繰り返す。

DGS による計算を行う場合は, MH21-HYDRES による計算を終えた後に, FDM グリッドから仮想 FDM グリッド, FEM 要素にデータの移送を行う。COTHMAs での計算に用いるヤング率, ポアソン比などの岩石力学物性値の値を決定するには MH 飽和率の値が必要となるが, 本研究では, 仮想 FDM グリッドの値を用いて各 FEM 要素の岩石力学物性値の値を決定した。

3.4 動作検証

本研究では, 開発した統合化プログラムおよび HCM-MB の正常動作を確認し, さらに各連成計算の高速化効率を比較・評価するため, 2 種類の計算モデルを用いて動作

検証を実施した。1 つ目は三次元直交座標系の砂泥互層を模擬したモデルに複数の生産井を配置した SGS のモデルを用いた検証である。ここでは, 繰り返し計算過程で作成された HM を確認することで, HCM-MB が正常に動作しているか確認するとともに, 全グリッドで繰り返し法を適用した場合と HCM を適用した場合の数値解, 計算時間を比較し, HCM の特性を確認した。2 つ目は, 二次元円筒座標系・単一坑井の砂泥互層を模擬したモデルを用いた検証である。ここでは, HCM (SGS), HCM (DGS), 繰り返し法 (DGS) を全て実施して, その結果を比較することで, 計算精度, 計算速度の観点から各手法を比較・評価した。

3.4.1 HCM-MB の正常動作・HCM の特性の確認 (検証 3)

(1) 計算モデル

本検証では, 図 3.4 で表されるような三次元直交座標系の計算モデルに 2 本の生産井 (PROD#1, PROD#2) を 1,000 m 間隔で配置したモデルを使用した。本モデルは x 方向に 15 グリッド, y 方向に 34 グリッド, z 方向に 12 グリッドのモデルである。モデルの概要を表 3.3 に示す。本モデルは, 水深 1,000 m の海底下 350 m に MH を含む砂層と含まない泥層が交互に重なり合った砂泥互層が存在する状況を想定している。層厚 25 m の砂泥互層 (砂層 2.5 m, 泥層 2.5 m の 5 サイクル) は 2 本の生産井を中心として x 方向に 1,000 m 広がっていると仮定しており, 砂泥互層以外の部分は全て MH を含まない泥層で構成されているものとしている。なお, グリッドシステムは, 検証 1 および 2 と同様に, SGS を適用している。

(2) 計算結果

(1) で示した条件の下で, 100 日間の減圧法による生産を想定し, HCM (SGS), 繰り返し法 (SGS), 陽的統合法, 単独ランを実施して, 各手法, 特に HCM の計算特性を確認

図 3.3 HCM および DGS を導入した統合化プログラムにおける計算の流れ

認した。HCM については、繰り返し計算の過程での HM の形状変化の様子も確認し、開発した HCM-MB が正常に動作することも確認した。

(ア) 生産レート (ガス・水)

PROD#1 および #2 におけるガス・水生産レート時間変

図 3.4 検証 3 に用いた計算モデル

化の計算結果を、図 3.5、図 3.6 に各々示す。

(イ) 地層変位分布・孔隙圧力分布・MH 飽和率分布

生産終了後 (100 日後) の貯留層上面における地層変位分布、仕上げ区間中心深度における孔隙圧力分布、MH 飽和率分布の計算結果を、各々図 3.7、図 3.8、図 3.9 に示す。なお、各分布は坑井の存在する x 座標での y 軸断面におけるものである。

(ウ) 計算時間

各手法の計算時間の比較を、図 3.10 に示す。

(エ) HM の形状変化

本研究では、開発した HCM-MB が正しく動作していることを確認するため、各繰り返し計算での HM 中に存在する節点分布を出力した。ここでは、例として、生産開始から 2 日後のタイムステップの計算 (繰り返し回数 6 回で計算が収束) における HM 形状の推移を、図 3.11 に示す。なお、本計算結果は、深度 1362.5m (TVDSS) における水平断面での節点分布である。(図中の青、オレンジは異なる HM を表しており、節点などを共有しない独立の HM

表 3.3 検証 3 に用いた計算モデルの仕様

解析次元	三次元直交座標系 (15 × 34 × 12 グリッド)	操業条件	仕上げ区間	15 m (MH 層中央深度から上下 7.5 m ずつ)
グリッド数	6,120		流動坑底圧力	3.0 (MPa) (10.5 MPa/Day で減圧)
要素数	6,120	坑井特性 (PROD#1, 2)	裸坑直径	0.3112 m
節点数	7,280		傾斜角	0 (°)
		スキンファクター	0.0	
境界節点数	2,198	境界条件	上部境界：定温 (12.75℃)， 定圧 (13.6013MPa)	
			下部境界：断熱・流動遮断	
			半径方向外側：定温・定圧	
			モデル右端・左端：水平方向変位固定 モデル下端：鉛直方向変位固定

図 3.5 PROD#1 における生産レート時間変化 (左：ガス生産レート；右：水生産レート) (検証 3)

図 3.6 PROD#2 における生産レート時間変化（左：ガス生産レート；右：水生産レート）（検証 3）

図 3.7 生産終了後の貯留層上面の地層変位分布（検証 3）

図 3.9 生産終了後の仕上げ区間中心深度における孔隙圧力分布（検証 3）

図 3.8 生産終了後の仕上げ区間中心深度における MH 飽和率分布（検証 3）

図 3.10 各連成計算手法の計算時間の比較（検証 3）

図 3.11 HM 形状の推移 (検証 3)

が複数作成されていることを示している。) また、図中の「ite_count」は繰り返し計算回数を示している。

(3) 考 察

まず、HM の形状変化について述べる。図 3.11 で示したように、繰り返し計算の回数を重ねるにつれて、徐々に HM が縮小して、繰り返し法の適用領域が縮小していることが確認できる。また、この例では、繰り返し計算 2 回目で、断面が長方形でないややいびつな形状の HM が作成されており、4 回目以降では、複数の HM が作成され、繰り返し法適用領域が複数に分かれている様子が確認できる。以上より、本研究で開発した HCM-MB が正常に動作していると判断した。

次に、計算結果について述べる。全体として、HCM の計算結果は、繰り返し法の計算結果と非常によく一致した。本検証に用いた三次元直交座標系のモデルは、グリッド数の関係から、グリッドサイズが検証 1 で使用したものよりも大きいので、各手法による圧力変化、生産量などの計算結果の差が、検証 1 よりも小さい。しかし、これらを考慮しても、HCM の計算結果は繰り返し法と非常に良好な一致を示しており、HCM は繰り返し法とほぼ同様の計算精度を有すると考えられる。

最後に、各手法の計算に要した時間の比較について述べる。図 3.10 に示したように、HCM による計算時間は、繰り返し法の約半分以下となった。本ケースはグリッドサイズなどの関係から、連成計算の収束性が検証 1 よりも良好であり、岩石力学計算を実施した回数が検証 1 よりも少なかったが、連成計算の収束性が悪いケースでは、岩石力学計算を実行する回数が多くなるので、HCM による計算時間削減の効果がさらに高くなると考えられる。

以上より、HCM を用いることで、繰り返し法とほぼ同様の計算精度を維持しつつ、計算時間を削減可能であり、

HCM の有用性が非常に高いことが確認された。これにより、繰り返し法は生産・圧入井近傍や分解フロント周辺など、貯留層特性値の変化の大きな領域にのみ適用すれば十分であり、変化の小さい領域には適用する必要がないということが明らかとなった。

3.4.2 各連成計算高速化手法の特性の確認と比較・評価 (検証 4)

(1) 計算モデル

本検証では検証 1 で使用したモデルと同じ二次元円筒座標系の計算モデルに 1 本の生産井を配置したモデルを使用した。モデルの概要については検証 1 を参照されたい。また、本検証では DGS の検証を実施するため、上下泥層の深度には、1 つの FEM 要素に対して 4 つ (水平方向に 2 つと垂直方向に 2 つの 2×2) の FDM グリッドが含まれるような FEM 要素を配置し、砂泥互層の存在する深度には 1 つの FEM 要素に対して (水平方向に) 2 つの FDM グリッドが含まれるような FEM 要素を配置した。表 3.4 に、本検証モデルの SGS と DGS、各々の場合の要素数、節点数、境界節点数を示す。

(2) 計算結果

検証 1 と同じ条件で、HCM (DGS, SGS) および繰り返し法 (DGS) による計算を実施した。これらを検証 1 の結果と比較して、各連成計算高速化手法の特性を確認・評価した。

表 3.4 検証 4 に用いた計算モデルの概要 (SGS, DGS)

	SGS	DGS
要素数	4,000	1,520
節点数	4,141	1,617
境界節点数	280	192

(ア) 生産レート (ガス, 水)

検証1の結果をHCM (SGS)と比較した結果を図3.12に、HCM (DGS), 繰り返し法 (DGS)と比較した結果を図3.13に示す。

(イ) 地層変位分布・孔隙圧力分布・MH飽和率分布

生産終了後(100日後)の坑井近傍における貯留層上面の地層変位分布, 仕上げ区間中心深度の孔隙圧力分布, MH飽和率分布の計算結果を, 各々図3.14, 図3.15, 図3.16に示す。

(ウ) (計算時間)

各手法の計算時間の比較を図3.17に示す。

(3) 考 察

検証4では, 検証3と同様に, HCM (SGS)による計算結果は, 繰り返し法 (SGS)による結果と良好な一致を示し, HCMが繰り返し法と同様の計算精度を持つことが確認された。一方で, DGSを併用したHCMおよび繰り返し法は, HCM (SGS)ほど, 繰り返し法 (SGS)と一致しなかった。

これは, COTHMAsにおける力学パラメータの計算手法が主な原因と考える。本研究で使用したCOTHMAsでは, ヤング率, ポアソン比などの力学パラメータは, MH飽和率の関数として計算されている。力学パラメータの計算に用いるMH飽和率の値は仮想FDMグリッドでの値を使用しており, 坑井近傍など, 変化の大きい領域では平均化されて, SGSよりもやや高い値がパラメータ計算に用いられたため, 本検証で確認されたような計算精度の低下が生じたと考えられる。また, 外力としてCOTHMAsに与えられる圧力や温度といったパラメータも, 平均化されることで, 変化量がやや小さく与えられたことも計算精度低下の原因の1つであると考えられる。

一方で, 計算時間については, 繰り返し法 (SGS)に対して, HCM (SGS)が約3分の1, 繰り返し法 (DGS)が約2分の1, HCM (DGS)が約10分の1となり, 各手法で計算時間の短縮に成功した。特に, HCM (DGS)の計算では, DGSとHCMを併用することで, 大幅な計算時

図 3.12 生産レート時間変化 (検証1 + HCM (SGS)) (左: ガス生産レート時間変化; 右: 水生産レート時間変化) (検証4)

図 3.13 生産レート時間変化 (検証1 + HCM (DGS), 繰り返し法 (DGS)) (左: ガス生産レート時間変化; 右: 水生産レート時間変化) (検証4)

間の短縮が可能であることが確認された。

以上の結果より、HCM を導入することで、計算精度を犠牲にすることなく、計算時間を大幅に短縮可能であること、そして、DGS と併用することで、計算精度はやや落ちるものの、さらに計算時間を削減可能であることを確認することができた。

本検証では、計算精度、計算速度の観点から総合的に判断すると、HCM (SGS) が最も優れているという結果となった。しかし、計算時間を3分の1に短縮したとはいえ、MH21-HYDRES の約60倍の計算時間を要した。実際のフィールドスケールでのシミュレーションでは、グリッド数や不均質性による連成計算における繰り返し計算数が増加することが想定され、岩石力学計算に要する時間が増加し、MH21-HYDRES との差はさらに増大するものと予想される。そのため、今後はDGSを効果的に導入し、本検証で計算精度低下の大きな原因となった力学パラメータお

よび外力パラメータの平均化の影響を排除することで、計算精度をHCM (SGS) と同等に維持しつつ、計算時間を短縮していく必要があると考えられる。

4. 結 論

本研究では、MH21-HYDRES と COTHMAs を定量的かつ高精度に統合すべく、適用性、計算速度、計算精度のいずれにおいても大きな欠点がなく、実用面で総合的に最も優れていると判断された繰り返し法を用いて両者を統合するプログラムを開発し、その動作を検証した。さらに、数値解の精度を維持しつつ、連成計算に要する時間を短縮させることを目的として、統合化プログラムにHCM およびDGS への対応機能を導入し、各手法の有用性を確認すべく動作検証を実施した。これらの結果、以下の知見を得ることができた。

① 繰り返し法を用いた MH21-HYDRES と COTHMAs の

図 3.14 生産終了後の貯留層上面の地層変位分布 (検証 4)

図 3.16 生産終了後の仕上げ区間中心深度における孔隙圧力分布 (検証 4)

図 3.15 生産終了後の仕上げ区間中心深度における MH 飽和率分布 (検証 4)

図 3.17 各連成計算手法の計算時間の比較 (検証 4)

連成計算を実施可能なプログラムを開発し、砂泥互層のMH層を模擬したモデルを用いて繰り返し法の特性的確認を実施した。その結果、繰り返し法による計算では、圧密による絶対浸透率の減少や孔隙圧力の維持などの岩石力学的挙動がMH分解・生産挙動に及ぼす影響を表現可能であることが確認できた。一方で、MH21-HYDRES単独での計算や陽的統合法よりも多大な計算時間を要した。また、過去に実施された室内実験を対象として、室内実験結果のヒストリーマッチングを実施した。その結果、比較的妥当な範囲内のパラメータを用いて、実験結果（温度分布、圧密挙動、ガス・水産出挙動）を再現することに成功し、統合化プログラムの妥当性および繰り返し法の有用性が確認された。

- ② 統合化プログラムにHCM対応機能を導入し、砂泥互層のMH層を模擬したモデルを用いてHCMの特性を確認した。その結果、HCMは、繰り返し法の半分以上の計算時間で、繰り返し法の数値解を高い精度で再現した。この結果から、連成計算においては、生産井周辺など、変化の大きな領域のみに繰り返し法を適用すれば十分であり、変化の小さい領域には適用する必要がないということが確認された。
- ③ さらに計算時間を短縮すべく、統合化プログラムにDGS対応機能を導入し、①と同じモデルを用いてHCM (SGS)、繰り返し法 (DGS)、HCM (DGS) の計算を実施し、その結果を①の結果と比較した。その結果、DGSは計算時間を大幅に削減可能ではあるものの、グリッドの粗大化などの影響で計算精度がSGSよりも劣ることが確認された。

以上のように、繰り返し法は高い適用性と数値解の精度を有しており、連成計算手法として優れているが、計算速度が遅く、実用のためにはさらなる改良が望まれる。そのため、特にフィールドスケールのシミュレーションなどで膨大なグリッド数のモデルを用いて計算を行う場合には、HCMやDGSなどの連成計算高速化手法と併用して計算を行う必要があると考えられる。また、DGSと併用する際には、グリッド粗大化などに起因する数値解の精度の低下が懸念されるが、今後、グリッド粗大化によるパラメータの平均化などの影響を排除可能なDGSの導入手法などを確立していく必要があると考えられる。

謝 辞

本研究は、経済産業省「国内石油天然ガスに係る地質調査・メタンハイドレートの研究開発等事業（メタンハイドレートの研究開発）・生産手法開発に関する研究開発」の一部として実施された。記して謝意を表する次第である。また、産総研の坂本靖英博士からは、室内実験データのご提供ならびにシミュレーションに対するご提言を頂いた。ここに感謝の意を表する。

記号の説明

a_i	: スプライン補間法における係数
b_i	: スプライン補間法における係数
c_i	: スプライン補間法における係数
c_r	: 孔隙圧縮率 [1/Pa]
d_i	: 既知データから求められる係数
E_i	: コンプライアンス可変長非線形モデルでの計算に用いる初期弾性係数 [Pa]
e_i	: コンプライアンス可変長非線形モデルでの計算に用いる係数 ($i = 1 \sim 4$)
k	: 絶対浸透率 [mD]
k_{rg_wco}	: 残留水飽和率における気相相対浸透率
k_{rl}	: 相の相対浸透率
k_{rw_gco}	: 残留気相飽和率における水相相対浸透率
N_l	: 相の相対浸透率の曲率
N_{sgr1}	: 不動ガス飽和率計算用定数
N_{sgr2}	: 不動ガス飽和率計算用定数
P	: 孔隙圧力 [Pa]
P_{known_i}	: FDMグリッドにおける既知データ
P_{ref}	: 参照圧力 [Pa]
$P_{unknown}$	: 仮想FDMグリッドにおける未知データ (推定値)
R_{ohw}	: 単位体積のMHが分解した際に生じる水相の割合
S_{gco}	: 残留ガス飽和率
S_{gcr}	: 不動ガス飽和率
S_{gco_ori}	: MH相が存在しない場合の残留ガス飽和率
S_{h_ini}	: 初期MH飽和率
S_{h_re}	: 開発の過程で再生成したMH飽和率
S_i	: スプライン補間法による推定値
S_l	: 相の飽和率
S_w^*	: 孔隙内から流動不能部分を除いた部分に流動可能な水相が占める割合
S_{wco}	: 残留水飽和率
S_{wcr}	: 不動水飽和率
S_{wco_ori}	: MH相が存在しない場合の残留水飽和率
r_i	: 生産・圧入井からの水平方向距離 [m]
r'_i	: 生産・圧入井からの水平方向仮想距離 [m]
$\bar{r}'_i$	: 生産・圧入井から未知データの推定対象の仮想FDMグリッドまでの水平方向仮想距離 [m]
V_{p_i}	: FDMグリッドの孔隙体積 [m ³]
x	: S_i の存在する位置
x_i	: S_i を推定するために用いられる既知データの位置
x_{well}	: 生産・圧入井位置の座標値 [m]
y_{well}	: 生産・圧入井位置の座標値 [m]
z_i	: 生産・圧入井仕上げ位置からの鉛直方向距離 [m]
$\bar{z}_l$	: 生産・圧入井仕上げ位置から未知データの推定対象の仮想FDMグリッドまでの鉛直方向距離 [m]
δ	: 両シミュレータで計算される孔隙体積の許容誤差
ε_V	: 体積ひずみ
λ_c	: 総熱伝導率 [W/(m・K)]
λ_l	: 相の熱伝導率 [W/(m・K)]
ν	: ボアソン比
σ'_3	: 有効拘束圧 [Pa]

ϕ : 孔隙率
 ϕ_{flow} : MH21-HYDRES で計算される孔隙率
 ϕ_{geo} : COTHMAs で計算される孔隙率
 ϕ_{ref} : 参照圧力における孔隙率
 ω_i : FDM グリッドに与える重み

上付き添え字

$t+dt$: タイムレベル

下付き添え字

g : ガス相 (気相)
 h : MH 相 (固相)
 i : グリッド番号
 j : 繰り返し計算回数
 s : 岩石粒子
 w : 水相 (液相)

引用文献

- 栗原正典・佐藤明彦・大内久尚・大渕有希子・増田昌敬
 成田英夫・海老沼孝郎・佐伯龍男・藤井哲哉, 2009: 東
 部南海トラフメタンハイドレート資源の生産性評価, 石
 油技術協会誌, **74**(4), 311-324.
- 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, 2009: メタンハイドレート生産シミュレータ
 の開発, 石油技術協会誌, **74**(4), 297-310.
- 坂本靖英・駒井 武・川村太郎・天満則夫・山口 勉,
 2006: メタンハイドレート存在下での浸透率モデルの
 構築と室内分解実験のシミュレーション-メタンハイ
 ドレート貯留層の浸透率評価に関する研究 (第4報)-,
Journal of MMIJ, **122**, 396-405.
- 坂本靖英・下河原麻衣・大賀光太郎・宮崎普行・駒井 武
 青木一男・山口 勉, 2008: 減圧法におけるメタンハ
 イドレート分解時の圧密挙動ならびに浸透率特性に関
 する室内実験研究-メタンハイドレート貯留層の浸透
 率評価に関する研究 (第6報)-, *Journal of MMIJ*, **124**,
 498-507.
- 坂本靖英・覚本真代・宮崎普行・天満則夫・駒井 武・青
 木一男・山口 勉, 2010: 減圧法によるメタンハイド
 レート分解時の圧密ならびにガス産出挙動に関する室内
 実験のシミュレーション-メタンハイドレート貯留層の
 浸透率評価に関する研究 (第7報) -, *Journal of MMIJ*,
126, 631-639.
- 天満則夫・米田 純・青木一男・森 二郎, 2013: 地層変
 形シミュレータ COTHMA の開発について, 地盤工学会
 誌, **61**(11/12), 22-25
- David Tran, Lloyd Buchanan and Long Nghiem, 2008 :
 Improved Gridding Technique for Coupling Geomechanics
 to Reservoir Flow, SPE 115514.
- David Tran, Long Nghiem and Lloyd Buchanan, 2009 :
 Aspect of Coupling Between Petroleum Reservoir Flow and
 Geomechanics, ARMA09-89.
- K. Miyazaki *et al.*, 2008 : Variable-Type Constitutive Model
 For Methane Hydrate Bearing Sediment, 6th International
 Conference on Gas Hydrates (ICGH), Vancouver.
- R.H. Dean, X. Gai, C.M. Stone and S.E. Minkoff, 2006 : A
 Comparison of Techniques for Coupling Porous Flow and
 Geomechanics, SPE 79709.