

## 審査の結果の要旨

氏名 今野 義浩

メタンハイドレート（以下、MH と記述）は世界中の永久凍土地域や海底下に存在することが確認されており、次世代のエネルギー資源として注目されている。MH からのガス生産手法としては減圧法が有望であるが、南海トラフで確認されている MH が単独で存在する形態の貯留層に減圧法を適用できるかについてはまだ研究段階である。本論文では、この形態の貯留層に減圧法を適用したときの MH 分解・ガス生産挙動の特徴を把握することを目的として、MH 存在下の多孔質媒体内流動・伝熱特性に関するモデルを構築し、それらを導入したハイドレート貯留層シミュレータによる数値計算で、減圧法によるガス生産の特徴と律速因子を評価した。本論文は次の 6 章からなる。

第 1 章では、MH 資源量とガス生産手法に関する既往の研究、各国の MH 資源開発プロジェクトの動向をまとめ、本研究の目的と論文の構成を述べている。

第 2 章では、数値計算で用いたハイドレート貯留層シミュレータ (MH21-HYDRES) の理論をまとめている。本研究では、MH 存在下のガス-水相対浸透率、有効熱伝導率等の流動・伝熱特性に関する要素モデルが新たに構築され、シミュレータに組み込まれた。

第 3 章では、人工の MH コアを用いた減圧法実験、実験結果との比較によるシミュレータのモデル改良とパラメータ調整、数値計算による実験の解析をまとめている。要素モデルの中で最も重要な MH 存在下のガス・水相対浸透率曲線については、コア出口の毛管圧力効果による実験装置の影響を排除した上で、その形状が決定された。その結果、水-MH の 2 相状態から減圧法でガスが発生する過程でのガス相対浸透率は、MH が存在しない流動過程での値よりかなり低くなることを明らかにした。また、堆積物の有効熱伝導率モデルには並列モデルが妥当であることを示し、MH 分解速度定数、氷生成・融解速度定数、ハイドレート・氷の飽和に伴う浸透率低下次数についてもパラメータを調整した。パラメータ調整後の数値計算による予測は、広範囲の初期 MH 飽和率と生産圧力の条件下で、実験のガス・水の生産挙動、圧力・温度挙動をよく再現している。以上のように、実験結果との詳細な比較を通じてモデル改良とパラメータ調整が行われ、ハイドレート貯留層シミュレータによる MH 分解・ガス生産挙動予測の信頼性が大きく改善された。

第 4 章では、減圧法実験と 1 次元の理想的な多孔質媒体を仮定した数値実験で、ガス生産律速因子の評価方法とその評価結果を論じている。減圧法によるガスの生産過程を、MH 表面での分解反応、ガスの流動、伝熱の 3 つの現象に分類し、各現象によるメタン湧き出し速度を定義し、その速度を比較することで空間的・時間的に推移するガス生産の律速因子を評価した。減圧法実験における評価では、

ガス生産の律速因子を伝熱と判定し、実験で計測した MH 分解速度と伝熱によるメタン湧き出し速度がよく一致することを示した。一方、1次元の多孔質媒体を仮定した計算では、絶対浸透率、伝熱レート、MH 飽和率、貯留層のスケール、生産圧力を変化させた場合のガス生産律速因子を評価することで、減圧法適用時のガス生産律速因子は一般的に流動から伝熱へと移行すること、律速因子が流動から伝熱へ移行する過程でガス生産レートが大きく増加することなどを示した。既往の研究では MH 表面での分解反応と伝熱がガス生産を律速すると考えられてきたが、実際は伝熱と流動が主要な律速因子であり、MH 表面での分解反応による律速は極めて限定的であることを指摘した。

第 5 章では、東部南海トラフ海域に存在する MH 貯留層の圧力・温度条件を参考に構築した仮想的な貯留層モデルを用いて、MH が単独で存在する貯留層に対して減圧法を適用した場合の MH 分解・ガス生産挙動とその律速因子を検討している。律速因子が流動から伝熱に早期に移行する場合、減圧の効果は MH 層内に早期に伝播してガス生産レートが大きく増加すること、貯留層の絶対浸透率と温度が高い場合に、律速因子は流動から伝熱へ早期に移行することを明らかにした。MH 層の絶対浸透率が 1000mD、深度が 200-220mbsf、初期 MH 飽和率が 60%の MH 貯留層を 4MPa で減圧した場合、減圧開始から半年後に MH 層内全域が流動律速から伝熱律速へ移行し、ガス生産レートのピークは約 90,000Sm<sup>3</sup>/D に達すること、20 年後に約 40%の回収率が期待できることが示されている。

第 6 章では、本論文の結論と今後の展望をまとめている。

以上のように、本研究では、MH 存在下での流動・伝熱特性に関するモデルの構築、減圧法実験との比較によるモデルパラメータの調整を行い、ハイドレート貯留層シミュレータによる MH 分解・ガス生産挙動予測の信頼性を大きく向上させた。さらに、減圧法適用時のガス生産律速因子を評価する手法を構築し、MH が単独で存在する貯留層からの減圧法によるガス生産の特徴を把握した。本研究の成果は、日本周辺海域における減圧法の適用可能な MH 層の選定、ガス生産試験の評価に適用できるものであり、MH 資源開発研究の促進に大きく貢献する。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。