氏　　　　名	新(にい)　堀(ぼり)　雄(ゆう)　一(いち)
授　与　学　位	博　　士（工　学）
学位授与年月日	平成5年3月18日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最　終　学　歴	昭和60年3月 東北大学大学院工学研究科資源工学専攻 前期課程修了
学位論文題目	**地熱貯留層における水ー水蒸気二相流に関する基礎的研究**
論文審査委員	東北大学教授　千田　信　　東北大学教授　中塚　勝人 東北大学教授　榎本　兵治　　東北大学教授　林　一夫

論　文　内　容　要　旨

地熱開発において貯留層内の流体の挙動や熱移動を定量的に評価する必要がある。しかし，地下の現象をそのまま地上で再現することは物理的かつ経済的に不可能である。そこで近年，多くの研究者が貯留層の数学モデルを提出し，大型計算機を利用した貯留層シミュレーションを行うようになった。地熱貯留層のような高温環境において流体は必ずしも単相とは限らず沸騰を伴う気液二相流となることが多い。たとえ解析対象が熱水型貯留層だとしても，開発に伴い貯留層内の圧力が減少すれば熱水は沸騰する可能性を有する。したがって，地熱貯留層解析では水ー水蒸気の二相状態をも考慮した数学モデルが必要となる。

貯留層シミュレーションは石油開発の分野で始まったものであり，地熱開発で使用される数学モデルも，石油貯留層を解析するために考えられたものを基礎としている。これらのモデルでは各相の流れ易さを相対浸透率により表わす。したがって，この値の推算が解析上きわめて重要である。従来の地熱貯留層解析では，この推算にコーリーの式を用いてきたが，貯留層が不均質で液相の飽和率（単位空隙体積あたりの液相の体積）が一様に分布していない場合，この式を利用することはできない。

本文では地熱貯留層のような不均質な貯留層における一次元流れを考え，流れに垂直な方向に飽和率が一様に分布していない場合の相対浸透率と飽和率との新たな相関式を提案している。本論文は5章からなり以下に各章の具体的な内容を要約する。

第1章　緒　　論

従来提案された各種モデルの基本概念およびそれらの違いを明らかにするとともに，地熱貯留層のモデルに関する既往の研究をまとめ，その問題点および本研究の目的と概要を述べている。

第2章　飽和率の分布を考慮した相対浸透率の提案

本章では，地熱貯留層内の一次元流れを想定して，流れに垂直な方向における飽和率が一様に分布していない場合と一様に分布している場合の相対浸透率の違いを明らかにする。

貯留層内の飽和率の分布はあらかじめ一意に決めることができないので，本研究では飽和率の分布をいくつかの確率密度関数（ベルヌーイ試行列，ベータ分布，三角分布および正規分布）を用いて表わし，その分布を基にして相対浸透率の取り得る範囲を導く。その結果より以下の結論を得る。すなわち，相対浸透率の値は確率密度関数の種類に依らず，飽和率の平均値，標準偏差および歪度により整理でき，飽和率が一様に分布している場合の値より大きな値となる。また，飽和率の分布が単峯性の場合，その相対浸透率は，双峯性の場合に比較して，歪度に鈍感で飽和率の平均値と標準偏差を一致させればほぼ等しい値をとる。さらに、双峯性の分布を用いた場合の相対浸透率の上限は飽和率の平均値に対して線形の関係を持ち，単峯性の場合に比較して大きな値を取る。ただし，多峯性の分布を仮定しても，双峯性の分布により得られた相対浸透率の上限を拡張することはできない。これは，多峯性の分布が飽和率の標準偏差や歪度の区間を双峯性の場合以上に拡張できないことによる。

最後に，算出した相対浸透率を既往の実験結果に適用し，それらの実験における飽和率の分布について考察する。また，本研究で提案した相対浸透率の概念が石油貯留層解析の分野でも応用できることを示している。

第3章　飽和率の平均値と相対浸透率との相関式の提案と数値実験

飽和率の分布を考慮した相対浸透率を流動解析に適用するためには，流れに垂直な方向における飽和率の平均値が流れ方向において変化したとき，その垂直な方向の飽和率の分布が如何に変化するかを検討しなければならない。そこで，本章では飽和率の分布をモデル化し，その分布における飽和率の平均値と相対浸透率との相関式を導く。

前章において述べたように相対浸透率は飽和率の分布を表わす確率密度関数の種類にほとんど依存しない。そこで，ここではベルヌーイ試行列を基に飽和率の分布を表わす。ベルヌーイ試行列を決定するためには2種類の飽和率 $S_w{}^*{}_1$、$S_w{}^*{}_2$（$0 \leq S_w{}^*{}_1 \leq S_w{}^*{}_2 \leq 1$）　および大きい方の飽和率 $S_w{}^*{}_2$の存在割合 f（$0 \leq f \leq 1$）を決める必要がある（$S_w{}^*{}_1$の存在割合は $1-f$）。いま水－水蒸気の二相状態において各相の分布を考えると，熱交換面に比較的近く，蒸発が激しく起こっている場所では水蒸気相が卓越しており，この領域の飽和率は0に近いと仮定できる。そこで，本研究ではベルヌーイ試行列における小さい方の飽和率 $S_w{}^*{}_1$ を0と仮定する。一方，大きい方の飽和率 $S_w{}^*{}_2$は飽和率の平均値 $S_w{}^*{}_a$ を用いて

$$S_w{}^*{}_2 = S_w{}^*{}_a{}^{(m-1)/3}, \qquad 1 \leqq m \leqq 4 \tag{1}$$

に従うと仮定する。このとき大きい方の飽和率の存在割合 f は一意に

$$f = S_w{}^*{}_a{}^{(4-m)/3} \qquad 1 \leqq m \leqq 4 \tag{2}$$

となり，飽和率の分布を考慮した液相の相対浸透率 k_{rwa} は飽和率の平均値のm乗に従う。また，気相の相対浸透率 k_{rga} も指数mと飽和率の平均値によって表わすことができる。すなわち，

$$\left.\begin{aligned} k_{rwa} &= S_w{}^*{}_a{}^m \\ k_{rga} &= 1 - 2S_w{}^*{}_a + 2S_w{}^*{}_a{}^{(2m+1)/3} - S_w{}^*{}_a{}^m \end{aligned}\right\} \quad 1 \leqq m \leqq 4 \tag{3}$$

となる。ここで m＝4 の場合は(1)式より　$S_w{}^*{}_2 = S_w{}^*{}_a$，(2)式より f＝1 となり，飽和率が一様に分布している場合を示し，(3)式はコーリーの式に一致する。一方，m＝1の場合は$S_w{}^*{}_2 = 1$，$f = S_w{}^*{}_a$ となり，飽和率は一様に分布しておらず，液相と気相とが独立に流れる場合を意味する。　このときの相対浸透率k_{rwa}，k_{rga} は(3)式より $S_w{}^*{}_a$ に線形になる。このように(3)式は２章において示した相対浸透率の取り得る値の全てをきわめて簡便に表現できる。すなわち，飽和率の標準偏差や歪度を解析に導入することなく，m によって相対浸透率を推算できる。

次に本章では，提案した相関式を一次元非定常の水－水蒸気二相流を表わす数学モデルに適用し，熱輸送量に及ぼす飽和率の分布の影響について数値実験により検討する。その結果，飽和率の分布により熱輸送量は全く異なる値になることを示す。さらに，この数学モデルに混合拡散モデルの考えを導入し，沸騰を伴う二相流におけるトレーサー応答を数値計算により求める。そして，応答に及ぼす飽和率の分布の影響についても併せて検討する。その結果から，トレーサーの気相への移動速度が十分大きい場合において液相と気相が独立に流れる傾向が強くなると，応答は到達時間の短い，混合の小さなものになることを明らかにする。以上の数値実験により，地熱貯留層の解析において飽和率の分布を考慮した相対浸透率が必要になることを示す。

なお，水－水蒸気二相流のトレーサー応答解析は未だ報告されておらず，本研究の数値実験はその端緒を与えるものでもある。本章では沸騰を伴う場合における気液間の物質移動を検討するとともに，トレーサーの注入時間の解析上の扱いについても触れている。その結果，注入時間が滞在時間の５％より小さいとき，トレーサーの総注入量により正規化した応答はインパルス応答とみなすことができることを示す。このことはトレーサーの注入時間を計算と実験において厳密に一致させる必要がないことを意味し，地熱貯留層におけるトレーサー試験のように一度に大量にトレーサーを注入する場合の解析に有用な知見である。

第４章　室内実験と相関式による実験結果の解析

本章では，第３章において提案した飽和率の平均値と相対浸透率との相関式の妥当性を検討することを目的としてガラス粒子充填層を用いた室内実験を行っている。まず，実験結果より，充填層における水一水蒸気二相流においても液相と気相が互いに流れを阻害することを確認する。また，本実験条件において定常時における総括伝熱係数の軸方向の変動は小さいことを示す。これらの結果を踏まえて実験結果を整理し，定常時における流入流量と流入熱量との関係を第３章において提案した相関式により解析する。その結果，飽和率の分布を表わす指数mの値は流入熱量の増加につれて，４より小さく評価され，おおよそ３になることを述べる。mが小さく評価されるということは，充填層において水相と水蒸気相が独立に流れる傾向を持ち，相対浸透率の推算にコーリーの式を利用できないことを意味する。次に，トレーサーとして希薄なアンモニア水溶液をインパルス状に注入し，水蒸気とともに流出するアンモニアガスの濃度をガスクロマトグラフにより測定する。そして，その濃度の経時変化をトレーサー応答とし，前章において提案した相関式により解析する。なお，解析上に必要ないくつかのパラメータは全て実験条件や別の実験によりあらかじめ評価する。実験値と計算値との比較の結果，計算値は実験値に一致することがわかり，このことから前章において提案した飽和率の平均値と相対浸透率との相関式がきわめて有効であることを述べている。

第５章　結　　論

本章では各章の内容を要約して結論とした。

審　査　結　果　の　要　旨

地熱貯留層解析では地層内の水－水蒸気二相流を考慮しなければならない。その際，各相の流れ易さを表わす相対浸透率の推算がきわめて重要である。従来，その推算にはコーリーの式を用いてきた。しかし，地熱貯留層のようにその亀裂空隙構造が不均質で，液相の飽和率（単位空隙体積あたりの液相の体積）の分布が一様でない場合，この式を利用することはできない。本論文ではそのような場合の二相流について理論的および実験的に検討することにより，相対浸透率の新たな推算式を提案し，その妥当性を示したもので，全編５章からなる。

第１章は緒論である。

第２章では，一次元の流れを想定し，流れに垂直な方向における飽和率の分布を確率密度関数によって表わすことにより，相対浸透率の値は確率密度関数の種類に依らず，飽和率の平均値，標準偏差および歪度によって推算でき，飽和率が一様に分布している場合よりも大きな値となるという新知見を得ている。また，相対浸透率は，飽和率が双峯性の分布に従う場合，単峯性の場合に比較して大きな値を取り得ること，極限として飽和率の平均値に対して線形の関係を持つことを明らかにしている。

第３章では飽和率の分布を数学モデルにより表現し，飽和率の平均値と相対浸透率との相関式を導いている。このモデルではベルヌーイ試行列を基に大小２つの飽和率とその存在割合により飽和率の分布を表わし，小さい方の飽和率を０と仮定する。一方，大きい方の飽和率およびその存在割合を可変とし，飽和率の平均値および指数ｍによって表わす。このモデルの考え方に従えば，液相の相対浸透率は飽和率の平均値のｍ乗に比例し，気相の相対浸透率も指数ｍと飽和率の平均値の簡単な関数によって表わすことができる。このモデルの提案は貯留層工学において画期的なもので，本論文の注目すべき大きな成果である。さらに本章ではこの相関式を一次元非定常水－水蒸気二相流の理論解析に適用し，熱移動および物質移動に及ぼす飽和率の分布の影響が大きいことを示している。

第４章では，充塡層を用いた室内実験を行い，実験結果を本研究で提案した飽和率の平均値と相対浸透率との相関式により解析している。その結果，相対浸透率の推算にはコーリーの式は不適切であり，本研究で提案した相関式を用いれば実験値をきわめて簡便に整理できることを明かにしている。

第５章は結論である。

以上要するに本論文は，地熱貯留層のような不均質な貯留層の解析に必要な相対浸透率の推算式を提案し，その式を用いれば実験結果をきわめて簡便に整理できることを示したもので，資源工学並びに貯留層工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって，本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。