

## 束縛空間における水の物性変化を考慮した等価管路モデルの開発

Developed equivalent channel model with the consideration of water viscosity change by pore size

# 廣野 哲朗[1], 林 為人[2], 中嶋 悟[3], 高橋 学[4]

# Tetsuro Hirono[1], Weiren Lin[2], Satoru Nakashima[3], Manabu Takahashi[4]

[1] 東工大・理工, [2] 産総研深部センター, [3] 東工大・理工・流動機構(地惑), [4] 産総研

[1] Interactive Research Center for Sci., TIT, [2] Research Center for Deep Geological Environments, AIST, [3] Interactive Research Center, Tokyo Inst. Technol., [4] GSJ

多孔質媒体における透水特性を解釈するために等価管路モデルは古くから様々な形で提案されている。代表的なものにはキャピラリーモデル、動水半径モデル、マーシャル確率論モデル、ジャン-ホルツ確率論モデルなどが挙げられる。これらのモデルはすべて円筒形直管内の層流状態における粘性流体の流量を示す Hagen-Poiseuille の式に基づいている。この式には流体の密度や粘性係数の項が存在し、これらのモデルによる透水係数の推定には流体の物性値を入力する必要がある。通常、常温(20℃)下での透水係数の評価には、水の場合、 $0.998\text{g/cm}^3$  の密度と  $1.002\text{cP}$  の粘性係数を導入する。しかし、最近の知見では、多孔質媒体中の水の物性は温度のみならず、その水が存在する間隙サイズにも依存する可能性が示唆されている。そこで本研究では、人工的に作成した薄膜水を用いた赤外分光による水の分子構造の解析を行い、さらに、間隙径による水の粘性係数の変化を考慮した等価管路モデルを開発し、それによる透水係数の推定を行った。

人工的に作成した薄膜水の顕微赤外分光計による測定の結果、水が存在する空間が狭いほど、水分子の伸縮振動による赤外吸収が低波数側(低エネルギー側)へとシフトする傾向が顕著に認められた。通常の水ではOH伸縮振動による赤外光吸収のピークは  $3400\text{cm}^{-1}$  に現れるが、薄膜水の場合、 $3376\text{cm}^{-1}$  から  $3240\text{cm}^{-1}$  の間にシフトする。赤外光の吸光度と物質の厚さの関係式である Lambert-Beer の法則を用いて間接的に薄膜水の厚さを計算した結果、 $3376\text{cm}^{-1}$  にピークをもつ薄膜水では  $89\text{nm}$  に、 $3260\text{cm}^{-1}$  にピークをもつ薄膜水では  $23\text{nm}$  に、 $3240\text{cm}^{-1}$  にピークをもつ薄膜水では  $17\text{nm}$  になる。このOH伸縮振動は水分子間の水素結合距離と強い関係をもつため、この測定結果は  $100\text{nm}$  以下の狭い空間では水分子間の水素結合距離が短くなっていることを示すと考えられる。

このナノスケールでの水の構造変化はバルクの粘性係数にも影響を与える。石英毛细管中の水の粘性係数と管の半径の関係に関する過去の実験値によると、 $1\text{ミクロン}$  以下で粘性係数が増加し始め、 $100\text{nm}$  径では約  $1.25$  倍に、 $10\text{nm}$  径では約  $1.6$  倍に増加する。この結果は、 $1\text{ミクロン}$  以下のサイズの間隙を多く含む岩石中の透水特性にも大きな影響を与えることが予想される。そこで、次にこの水の粘性係数の変化を考慮した等価管路モデルを開発した。基本モデルとしてキャピラリーモデルを採用し、各間隙径における水の粘性係数を先の過去の実験値を参考に導入し、6種の砂岩(白浜、来待、和泉、鬼岩寺、多胡、ベレア)での透水係数の推定を行った。間隙径のデータは水銀圧入法によって測定した。水の密度も存在する間隙径サイズによって変化することが予想されるが、実験値が存在しないため今回は常温、常圧下での  $0.998\text{g/cm}^3$  を仮定した。結果として、この水の粘性係数の変化を考慮するしないにかかわらず、透水係数の値はほとんど変わらなかった。来待砂岩では考慮した場合は  $7.97\text{E}-5\text{ cm/s}$  で、考慮しない場合は  $7.98\text{E}-5\text{ cm/s}$  である。その他の試料ではモデルの有効数字3桁上では値の変化が認められない。これは、実際の岩石にはミクロンサイズのマクロポアを多く含むため、ナノポアでの効果が反映されていないと考えられる。そこで、 $100\text{nm}$  以下のサイズの間隙のみを含むという仮定の岩石を考え、計算してみると、考慮ありでは  $1.33\text{E}-9\text{ cm/s}$  で、なしでは  $1.75\text{E}-9\text{ cm/s}$  となった。

以上の結論として、人工薄膜水の赤外分光法による解析では、水の物性は温度のみならずそれが存在する空間サイズにも依存することが明らかになり、その分子構造の緻密化は  $100\text{nm}$  以下で顕著に現れる。この分子構造の変化は粘性係数の増加にも関係し、ナノスケールでの水の粘性係数の変化を考慮した等価管路モデルによる透水特性の評価の結果、マクロポアを多く含む岩石では透水係数はほとんど変わらないが、ナノポアを多く含む場合、透水係数の  $2,3$  割の変化が認められる。これは、地表近くではなく、地下深部での緻密な岩石での透水特性を考える上で重要であると言える。