

地下水を利用した熱エネルギー貯留技術の一環として温塩水の特性

富樫聡 (信州大・院)・正 藤縄克之 (信州大・工)

1. はじめに

地球温暖化対策の一環として化石燃料に代わるクリーンな自然エネルギーの技術開発が重要課題となっているが、欧米ではすでに地下熱エネルギー貯留 (Underground Thermal Energy Storage : UTES) 技術が実用化されており、わが国でもその利用が望まれるところである。本研究は、UTES 技術の一つである帯水層熱エネルギー貯留技術 (Aquifer Thermal Energy Storage : ATES) に着目し、さらに効率的な技術の開発を目指そうとするものである。ATES の克服すべき課題の一つに熱エネルギー貯留による帯水層内の熱対流制御があるが、本研究では貯留温水への塩分添加による熱対流制御の可能性を検討しているが、多孔体中での温塩水の挙動は、密度流、物質輸送、エネルギー輸送の3つの連成現象となることから、ここでは、計測に用いる電気伝導度と温度が、塩分濃度及び液体密度とどのような関係にあるかを実験により調べ、実験結果から塩分濃度と水溶液密度を算出するための関係式を構築した。

2. 実験方法

NaCl 水溶液の質量分率と水溶液密度を電気伝導度と温度の測定値から算出するため、4.0℃～75.0℃の温度で、NaCl 水溶液の電気伝導度と温度の測定を行った。実験では 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 14.0, 16.0, 18.0, 20.0 (wt %) の質量分率の NaCl 水溶液を作成し、各質量分率において温度を変化させ電気伝導度と温度の測定を行った。なお、電気伝導度の測定には東亜 DKK 社製 CM-30G を使用し、電気伝導度は 25℃に補正した値を採用した。

3. 質量分率及び水溶液密度の関係式

今後予定している ATES 実験で計測する電気伝導度 E_c (S/m) と温度 T (℃) を用いて、NaCl 水溶液の質量分率 C_s [M/M] 及び水溶液密度 ρ_s (g/cm³) を計算する関係式を求める。なお、 C_s は $C_s = m_s / (m_w + m_s)$ で算出する。ここに、 m_s は水溶液に溶解している NaCl 質量 (g)、 m_w は淡水の質量 (g) である。

(1) 質量分率 C_s の算定式の作成

質量分率 C_s を算出する関係式として、双2次多項式を採用すると、 C_s は

$$C_s = \alpha_0 + \alpha_1 E_c + \alpha_2 T + \alpha_3 E_c^2 + \alpha_4 T^2 + \alpha_5 E_c \cdot T \quad (1)$$

で表すことができる。ここに、 $\alpha_0 \sim \alpha_5$ はパラメータである。

(2) 水溶液密度 ρ_s の算定式の作成

水溶液密度 ρ_s は $\rho_s = (m_w + m_s) / (V_w + V_s)$ で求めることができる。ここに、 V_w は淡水の体積 (cm³)、 V_s は NaCl を溶解させたことによる水溶液の増加体積 (cm³) である。この式における V_w 、 V_s を $\rho_w = m_w / V_w$ と下記の (2) 式を用いて消去する。

$$A = V_s / m_s = -0.4006412 C_s^2 + 0.372264 C_s + 0.2906713 \quad (2)$$

なお、(2) 式は理科年表に記載されている「種々の物質の水溶液の密度」の値から求めた近似式である。その結果、

$$\rho_s = \rho_w + \frac{1 - \rho_w A}{(C_s^{-1} - 1) \rho_w^{-1} + A} \quad (3)$$

が得られる。ここに、 ρ_w は淡水の密度 (g/cm³) であり、

$$\rho_w = 1.0 - 0.0000269 \times (T - 4) - 0.000005233 \times (T - 4)^2 \quad (4)$$

で求めることができる。なお、(4) 式は Fischer *et al.*¹⁾ の付表から求めた関係式である。(3) 式を書き換えると

$$\rho_s = \rho_w + (1 - E) C_v \quad (5)$$

となり、これはBaxter and Wallace (1916) の理論式と呼ばれるものである。ここに、 C_v は質量濃度 (g/cm³) で、 $C_v = m_s / (V_w + V_s)$ で表す。また、 E は $E = \rho_w V_s / m_s$ となる無次元数である。

(3) 水溶液密度 ρ_s を電気伝導度 E_c と温度 T から算出

(3) 式を用いると、 ρ_s を E_c と T から求めることができる。(3) 式の C_s に実験に用いた質量分率を用いて計算したものを実験値、 E_c と T から求めた質量分率を用いて計算したものを計算値として両者を実験値と比較することにより、(1)、(3) 式の妥当性を検討する。

4. 結果と考察

実験の結果を図-1 に示す。なお、各質量分率に対し E_c と T との関係を直線で近似した場合、決定係数 R^2 の平均値は 0.9834 となる。一方、

(1) 式のパラメータの同定には Powell の共役傾斜法と重回帰分析を用いた。同定の結果を表-1 に示す。両者にほとんど差はなく、以降は Powell の共役傾斜法による値を使用する。次に、計算値と実験値の比較の結果を表-2 に示す。誤差は実験値と計算値の差を二乗し総和したものである。誤差が最小と最大となった 10.0、20.0% と 4.0% の 3 つの質量分率における実験値と計算値の比較を図-2 に示す。全体的に計算値と実験値の誤差は小さく、平均二乗誤差を調べたところ 0.14% であった。

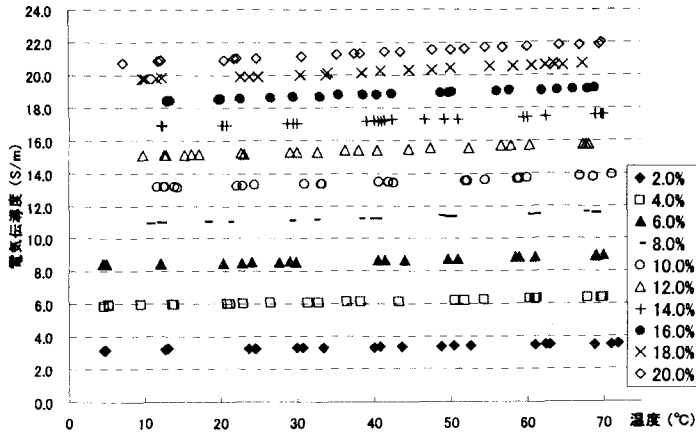


図-1 各質量分率における電気伝導度と温度の関係

表-1 パラメータ同定結果

	Powellの共役傾斜法	重回帰分析
α_0	0.006484293	0.006507180
α_1	0.004053891	0.004049687
α_2	0.000020777	0.000020609
α_3	0.000247544	0.000247694
α_4	0.000000097	0.000000098
α_5	-0.000011913	-0.000011901

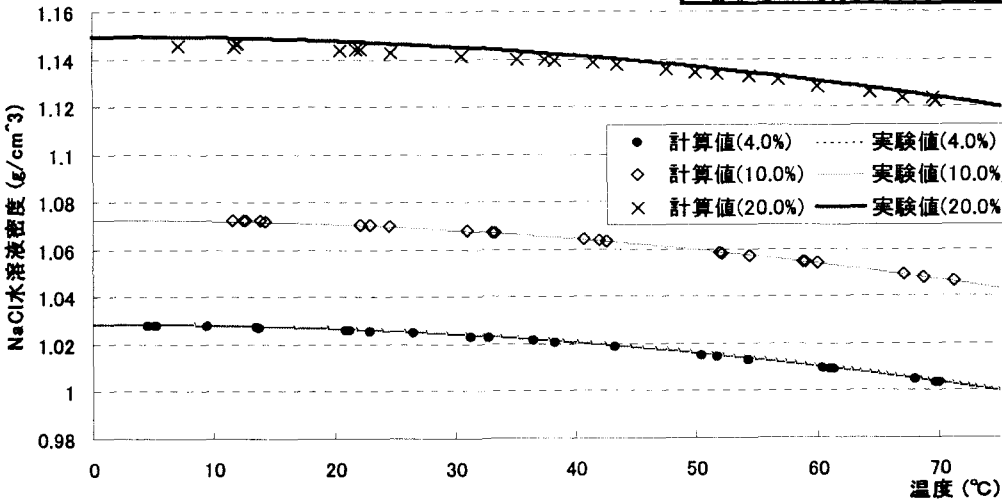


図-2 計算値と実験値の比較

表-2

各質量分率における誤差

質量分率	誤差E
2.0%	0.000059
4.0%	0.000017
6.0%	0.000100
8.0%	0.000015
10.0%	0.000003
12.0%	0.000037
14.0%	0.000067
16.0%	0.000044
18.0%	0.000017
20.0%	0.000199

5. まとめ及び今後の研究について

本研究で、電気伝導度と温度から NaCl 水溶液の密度を算出する式が作成された。この式は今後の実験及び解析を行う際の基礎式として用いることができる。本研究の本题は熱エネルギー貯留による帯水層内の熱対流制御策を検討することにより、今後はカラムや 2 次元水槽を用いた実験により温塩水の挙動を調べ、ATES の効率向上につながる実用可能な技術の開発を目指す予定である。

6. 参考文献

- 1) Fischer, H.B., J.Imberger, E.J.List, R.C.Y.Koh, and N.H.Brooks: Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, (1979)