

自己組織化マップを用いたベトナム・紅河デルタにおける被圧地下水のイオン特性解析

首都大学東京都市環境科学研究科 学生員 ○築山裕哉
 首都大学東京都市環境科学研究科 正会員 河村 明
 首都大学東京都市環境科学研究科 正会員 天口英雄
 首都大学東京都市環境科学研究科 学生員 Nguyen Thanh Thuy

1. はじめに

本研究で対象とする紅河デルタはメコンデルタと並ぶベトナムの二大デルタの一つである。紅河は高濃度の浮遊物質を含み、また上流でのインフラの未整備や産業廃棄物の管理の悪さによる汚染のため、紅河デルタ流域においては生活用水のほとんどを地下水に依存している。しかしながら近年、紅河デルタでは、急激な人口増加や産業発展により水需要が増加し、また、地下水の過剰取水を行った結果、地下水位の低下や井戸の枯渇、地盤沈下など様々な問題が生じている¹⁾。ベトナムのような発展途上国において、このような地下水資源問題を解決し、適切な管理と保全を行うためにはまず、地下水のイオン特性の把握が地下水質の基礎特性として不可欠である。本研究で用いるパターン分類手法の一つである自己組織化マップ(Self-Organizing-Map, 以下「SOM」と記す)は、複雑な多次元入力データの関連性を二次元平面に視覚化して表現でき、データ特性の分類等に優れた点を有している。そのため、これまでに水文・気象分野への適用例は数多く見受けられるが²⁾、地下水イオン特性への適用は著者らが知る限り、行われていない。そこで本研究では、SOMを紅河デルタの被圧地下水質データに適用し、そのイオン特性の解析を行った。

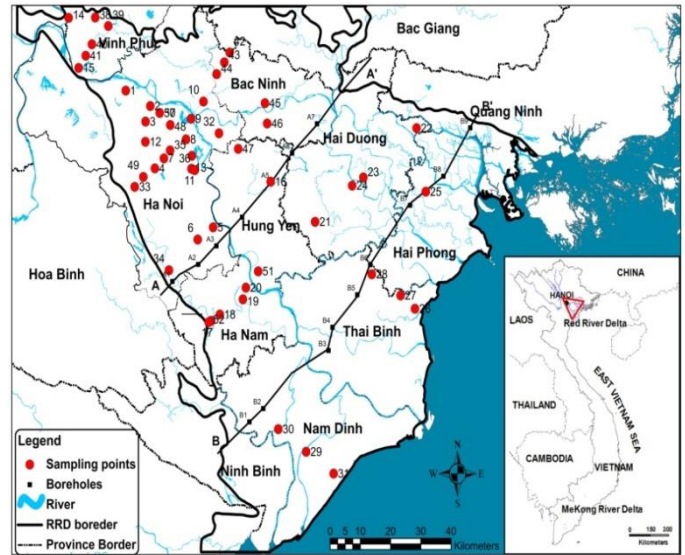


図-1 ベトナム・紅河デルタと観測点

2. 対象流域および使用データ

図-1に対象流域であるベトナム・紅河デルタと被圧地下水の地下水イオンデータ観測点を示す。紅河デルタは面積約 13,000 km²、人口約 200 万人(2012 年)である。年間降水量は約 1,600mm であり、そのうち 75%は 5 月～10 月の雨季に集中している。

近年まで、ベトナムでは地下水質データが不足しており、地下水質に関する基礎的研究を実地しにくい状況となっていた。ベトナム政府は 1989 年から地下水質観測のため地下水質ネットワーク構築に取り組み、その結果地下水質データを大量に取得できたものの、そのデータは体系的に整理されておらず利用しにくい状況であった。そこで、ベトナム政府が主導となり、国家水文水質データベースプロジェクト³⁾(National Hydro-geological Database Project)が 2000 年に開始された。本研究では国家水文地質データベースプロジェクトを通じて得られた、52 の被圧地下水観測井(図-1)を対象に 2011 年の乾季(2 月)と雨季(8 月)の被圧地下水質データ(データ数: 104)の解析を行った。使用した地下水質データは 4 つの陽イオン(Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺)と 4 つの陰イオン(HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, CO₃²⁻)データである。ま

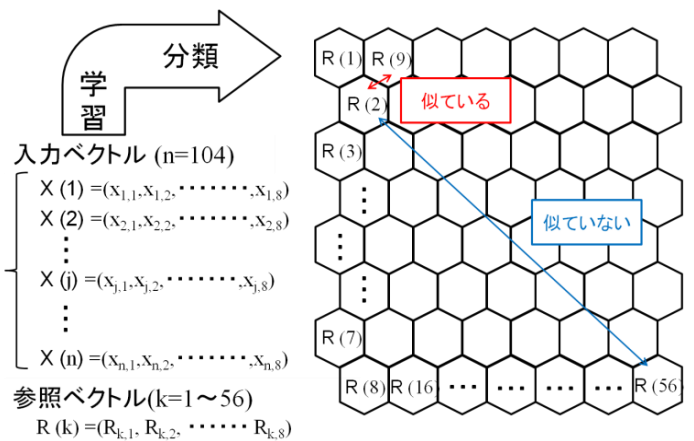


図-2 SOM のノードマップ例(8 : 7 配列)

キーワード：自己組織化マップ, 紅河デルタ, 被圧地下水, イオン特性

連絡先〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 首都大学東京 E-mail : tsukiyama-yuuya@ed.tmu.ac.jp

た、空間特性を把握するため、図-1 に示す2つの横断線(A-A', B-B')によって、紅河デルタを便宜上上流域(観測井 1~15, 32~50)、中流域(観測井 16~24, 51~52)、下流域(観測井 25~31)の3つの地域に分割した。

3. 自己組織化マップ(SOM)の適用

SOMは、多次元入力データの関連性を類似度として二次元平面上(マップ)に描画できるニューラルネットワークの一種であり、データの特徴の視覚化に優れた分類手法である⁴⁾。図-2には、今回適用したSOMのノードマップを示す。入力ベクトル $X(j)(j=1\sim 104)$ は、各観測井の8つのイオン(Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-})データ(8次元)から構成される。またSOMのノードマップの各ノードには、入力ベクトルと同じ次元を持つ参照ベクトル $R(k)(k:\text{ノード番号})$ が配置されており、入力ベクトルの特徴(パターン)はこの $R(k)$ によって表される。入力ベクトルは全ノードに割り当てられた参照ベクトルと比較され、両者のユークリッド距離が最少となるノード(勝者ノード)が検索される。さらに、各ノードの参照ベクトルは勝者ノードとの距離で表される近傍関数に従い修正され、勝者ノードに近い参照ベクトルほど修正量が大きくなるように競合学習が行われることにより、その修正量は学習回数とともに小さくなる。最終的に、複雑な入力ベクトルの特徴(パターン)はノードマップ上の参照ベクトルで表現され、ノードマップ上で距離の近いノードほど類似した特徴を持ち、遠いノードほど互いに異なる性質を持つような参照ベクトルの値として組織化される²⁾。

次に、マップ上の参照ベクトルのクラスター化を行う。クラスターの最適数は、k-means法を用いた際に得られた最小DBI(Davies-Bouldin Index)値により決定し、クラスター分類にはウォード法を用いた。SOMの全ノード数 M は、データ数 n に基づく経験式 $M=5\sqrt{n}$ により求められる⁵⁾。本研究では、 $n=104$ であることから全ノード数を56とし、データの共分散行列における固有値ベクトルの第1・2成分の比率から、SOMノードマップを図-2に示す縦横比8:7のノード構成とした²⁾。

4. SOMによるイオン特性解析結果及びその考察

(1) SOMによるイオン特性パターンの分類結果

図-3に8イオンのクラスタリング結果を示す。各ノードに属する参照ベクトルの値は[0, 1]に基準化され、各マップにおいて色の濃いノードはイオン濃度が高く、逆に色の薄いノードはイオン濃度が低くなっている。 Mg^{2+} , Na^+ , K^+ と Cl^- の4つのSOMマップに着目すると、イオンの濃度分布が類似していることが分かる。これより、4つのイオン(Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^-)に正の相関関係がみとれる。逆に、 CO_3^{2-} に着目すると、上記4つのイオン(Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^-)とはノードパターンが逆になっており、これらが負の相関関係にあることが示唆される。

次に、図-3に示された特徴をより容易に確認するために前述の手法によりクラスター分類を行った。図-4はk-means法によるクラスター数2~全ノード数56に対するDBI値の計算結果を示している。この図より最少DBI値として8が得られ、クラスター数を8とした。図-5はウォード法による階層図を示しており、8つのクラスターに属するノード番号を示している。図-6では、SOMマップ上のクラスターの配置状況とともに、各ノードに配置された全ての観測井番号を記している。各ノードに分類された記号は、最初の番号が観測井の番号であり、次の記号は季節(乾期:D, 雨季:R)、最後の記号は流域(上流域:u, 中流域:m, 下流域:d)を表している。図-7は被圧地下水の各クラスターに属する参照ベクトルの値(0~1)の第1四分位値、中央値、第3四分位値がプロットしたレーダーチャートを示している。

(2) 各クラスターのイオン特性について

図-5より、クラスター4と6、クラスター1と3、クラスター5と8はクラスター間の距離が近く、互いに性質が似ていることが分かる。また、クラスター7と2はそれぞれ、クラスター4と6、クラスター5と8に比較的類似し

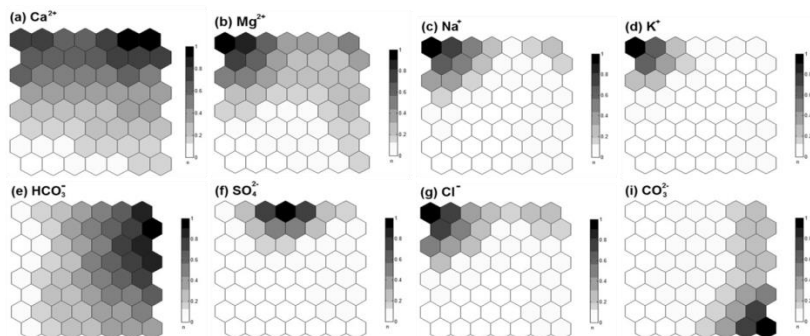


図-3 SOMによる8イオンのクラスタリング結果

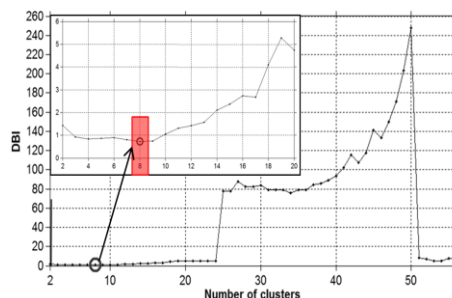


図-4 k-means法によるDBI値の計算結果

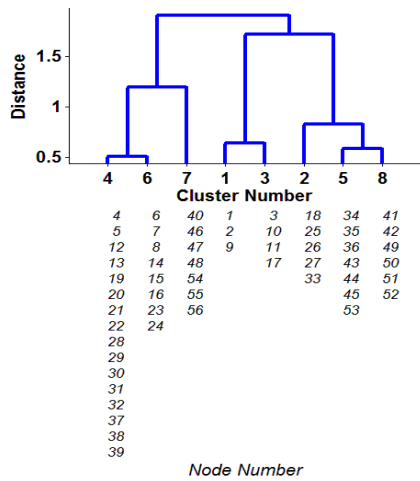


図-5 ウォード法による階層図

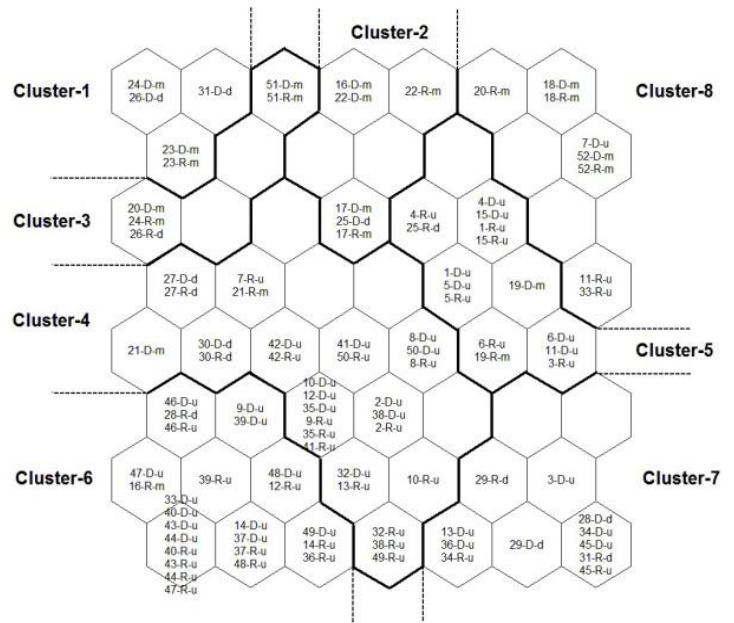


図-6 クラスターの配置とノード毎の観測井番号

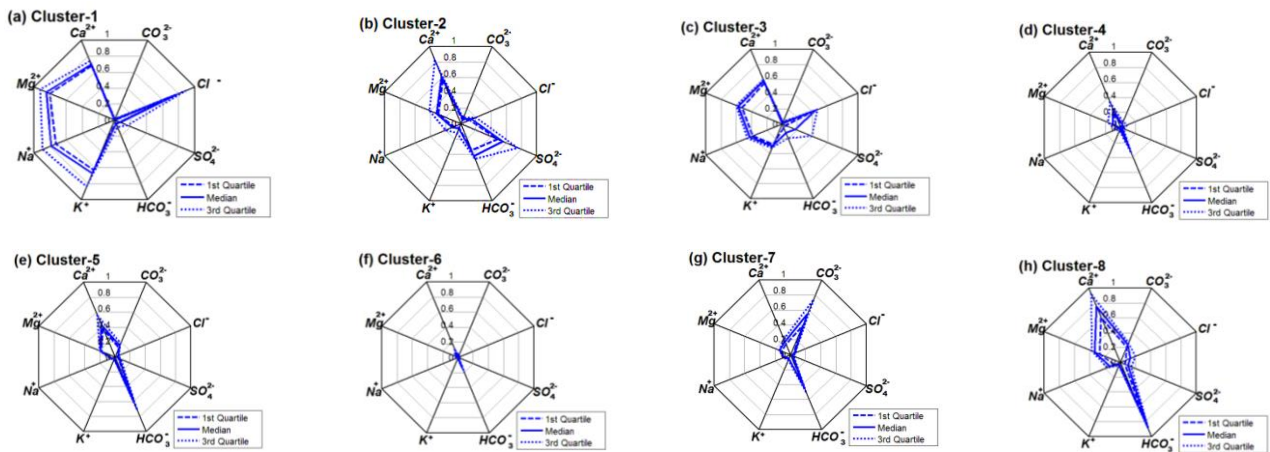


図-7 各クラスターのレーダーチャート結果

た性質を持つことが分かる。図-7 から各クラスターの特徴を見てみると、クラスター4と6は全てのイオンの値が低く、特にクラスター6は全クラスター中最もイオンの値が低く淡水のクラスターである。クラスター1と3は全ての陽イオン(Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺)とCl⁻の値が高く、特にクラスター1は全クラスター中最も高塩度のクラスターであることが分かる。さらに、クラスター5と8はCa²⁺とHCO₃⁻の値が高いパターンであり、クラスター8の方がCa²⁺とHCO₃⁻の値がより高いパターンであることが分かる。これらのクラスターの特徴から塩度に着目してグループ化すると、全ての陽イオン(Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺)とCl⁻の値が高い高塩度タイプ(クラスター1, 3), Ca²⁺とHCO₃⁻の値のみが高い低塩度タイプ(クラスター2, 5, 8), Na⁺とCl⁻の値が低い淡水タイプ(クラスター4, 6, 7)の3つの水質タイプに分類できる。

(3) 季節変動と空間特性

図-8, 9に、それぞれ被圧地下水の乾季(2月), 雨季(8月)に対する各クラスターの空間分布を示す。図-8, 9を比較すると、乾季と雨季にかけて全52観測井の内、16観測井でクラスターが変化する季節変動を確認し、そのうち6観測井(No.3, 7, 16, 20, 31, 33)で水質タイプの変化を伴う季節変動が確認された。季節変動の傾向を見てみると、乾期から雨季にかけて全体的に高塩度から塩度の低いタイプへ変化する傾向が確認され、これは、特に被圧帯水層上部の難透水層が欠如している地域において、地下水流入量の増加に伴う地下水の希釈が原因と考えられる。

次に空間分布に着目すると、図-8, 9より高塩度タイプは海岸沿いと中流域に分布している。高塩度の要因として海岸沿いは海水の侵入、中流域は完新世の化石塩水の影響⁶⁾であると考えられる。低塩度タイプは紅河デルタの西側(クラスター5, 8)と北東(クラスター2)に分布している。デルタ西側では、主な地下水流入源であるデルタ西側

の境界付近の山脈に、炭酸塩岩石が多く含まれており、これら鉱物の溶解により Ca^{2+} と HCO_3^- の濃度が高くなっていると考えられる。一方、北東部では硫酸塩鉱物の影響により Ca^{2+} と SO_4^{2-} の溶出により、これらの濃度が高くなっていると考えられる。淡水タイプは、上流域と海岸沿いを除いた下流域に分布している。海岸沿いを除いた下流域 (Nam Dinh) では、淡水レンズの存在が確認されており⁷⁾、淡水タイプとなっていると考えられる。

5. むすび

本研究では、パターン分類手法の一つである SOM を、国家水文地質データベースプロジェクトによる红河デルタの被圧地下水における4つの陽イオン (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) と4つの陰イオン (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-}) データに適用し、イオン特性の解析を行った。その結果、被圧地下水のイオンデータのパターンは、8つのクラスターに分類され、さらに塩度に着目し、各イオンの特性から高塩度タイプ(クラスター1, 3)、低塩度タイプ(クラスター2, 5, 8)、淡水タイプ(クラスター4, 6, 7)の3つの水質タイプに分類した。また、水質タイプは乾季から雨季にかけて高塩度から塩度の低いタイプへ変化する傾向があることが示された。空間分布としては、高塩度タイプは海水侵入による海岸沿い及び化石塩水の影響による中流域に多く分布し、低塩度タイプは红河デルタの西側及び北東部、さらに淡水タイプは上流域と淡水レンズによる下流域に分布していることが確認された。

参考文献

- 1) Bui, D. D., Kawamura, A., Tong, T. N., Amaguchi, H. and Nakagawa, N. Spatio-temporal analysis of recent groundwater-level trends in the Red River Delta, Vietnam. *Hydrogeology Journal*, Vol.20, Issue 8, pp. 1635-1650, 2012.
- 2) 石原成幸, 河村明, 天口英雄, 高崎忠勝, 高橋泰之, 川合将文: 自己組織化マップを用いた東北地方太平洋沖地震発生前後の東京の年間地下水位変動特性, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.70, No.4, pp. I_1129-I_1134, 2014.
- 3) Nguyen, T.T., Kawamura, A., Tong, T.N., Nakagawa, N., Amaguchi, H. and Gilbuena, R.L. Hydrogeochemical characteristics of groundwater from the two main aquifers in the Red River Delta, Vietnam *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol.93, pp.180-192, 2014.
- 4) Kohonen, T., Self-organizing Maps, third edition. Springer-Verlag, Berlin, 2001.
- 5) Jin, Y. H., Kawamura, A., Park, S. C., Nakagawa, N., Amaguchi, H. and Olsson, J., : Spatiotemporal classification of environmental monitoring data in the Yeongsan River basin, Korea, using self-organizing maps, *Journal of Environmental Monitoring*, No.13, pp.2886-2894, 2011.
- 6) Tanabe, S., Hori, K., Saito, Y., Haruyama, S., Vu, P.V., Kitamura, A., Song Hong (Red River) delta evolution related to millennium-scale Holocene sea-level changes. *Quat Sci Rev* 22, 2345-2361, 2003.
- 7) Wagner, F., Ludwig, R.R., Noell, U., Hoang, H.V., Pham, Q.N., Larsen, F., Lindenmaier, F., Genesis of economic relevant fresh groundwater resources in Pleistocene/Neogene aquifers in Nam Dinh (Red River Delta, Vietnam). *EGU Gener. Assem.* 14, 2273, 2012.

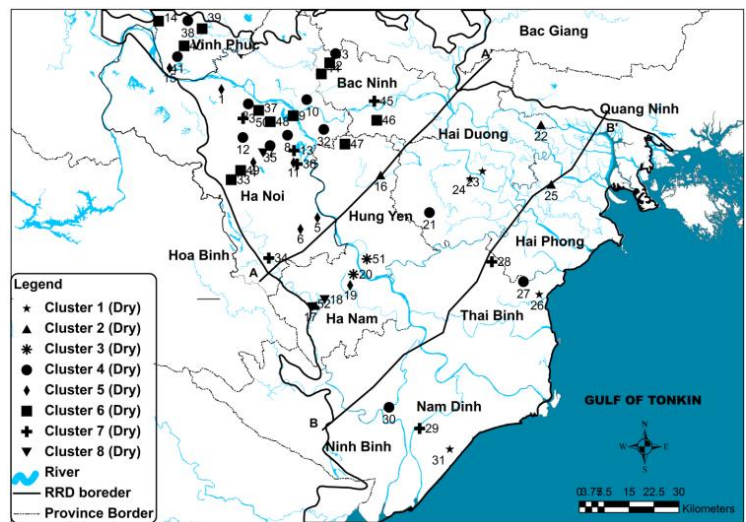


図-8 乾季(2月)における各クラスター空間分布

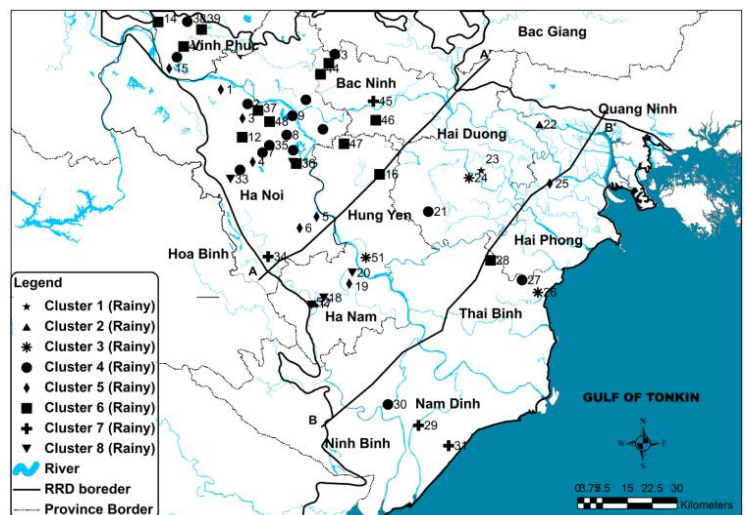


図-9 雨季(8月)における各クラスター空間分布