

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イオンの経年変動特性

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	非会員	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、地下水質の基礎特性として地下水のイオン特性の把握が不可欠である。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。著者らは、入手可能なデータの中で最も新しい2011年の1年間における紅河デルタの被圧地下水イオンデータを対象にSOMを適用し、そのイオン特性の解析を行ったが²⁾、対象期間が1年間のみであった。そこで本研究では1993年、2002年、2011年の3年間における紅河デルタの被圧地下水イオンデータを対象にSOMを適用し、経年変動特性の解析を行った。

2. 対象流域および使用データ

(1) 対象流域の概要

図-1に対象流域であるベトナム・紅河デルタ及び被圧地下水の観測点を示す。紅河デルタは面積約13,000 km²、人口約2020万人(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。

(2) 使用データの概要とデータ補間

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、1993年以降のデータがデータベース化された。本研究で使用した被圧地下水イオンデータ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、毎年乾季(2月)と雨季(8月)の2回観測が行われている。使用した地下水質データは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-})データである。なお、被圧地下水イオンデータは一部の期間において欠測がある場合や、近年まで特定のイオンに対して観測を行ってこなかった観測井が多く、地下水イオンデータの補間を行った。補間の対象データとしては、各観測点における各季節ごとの8つのイオンの時系列を基に、欠測前後のデータから線形補間を行った。しかしながら、欠測数が多く補間できなかった箇所もあった。今回使用する地下水イオンデータは、入手可能なデータの中で最も新しい2011年、最も古い1993年、そして間の2002年の3年間分とした。1993年、2002年、2011年の使用可能なデータ数はそれぞれ、36(乾季:18, 雨季:18)から76(乾季:38, 雨季:38)。

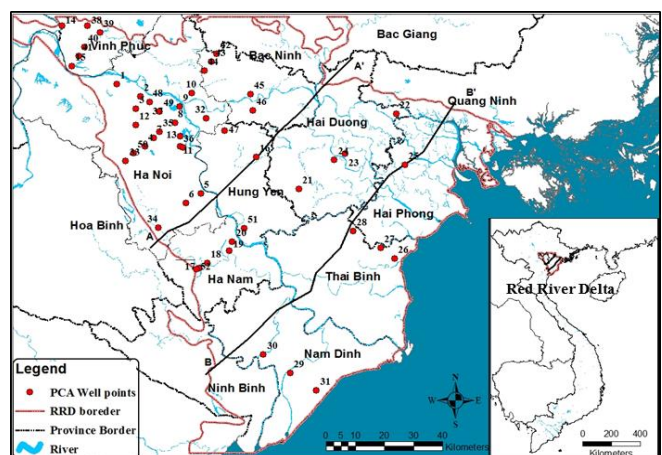


図-1 ベトナム・紅河デルタと観測点

キーワード：自己組織化マップ、紅河デルタ、経年特性、被圧地下水

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

72(乾季: 39, 雨季: 33)から 92(乾季: 46, 雨季: 46), 83(乾季: 42, 雨季: 41)から 104(乾季 52: , 雨季 52)に増加し, 解析対象は 272(=76+92+104)となった. また, 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 $X(j)(j=1\sim 272)$ 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⁵⁾.

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⁶⁾. 本研究では, $n=272$ であることから全ノード数を 80 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 10 : 8 のノード構成とした⁵⁾.

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

前述に示された SOM マップの特徴をより容易に確認するためクラスター分類を行った. 図-3 は k-means 法によるクラスター数 2~全ノード数 80 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 11 が得られ, クラスター数を 11 とした. 図-4 はウォード法による階層図を示しており, 11 のクラスターに属するノード番号を示している. 図-5 では, SOM マップ上の各クラスターの配置状況とともに, 各ノードに配置された観測井の数を記している. また, 図-6 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)の下位四分位値, 中央値, 上位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. ただし, 分類されたノードの数が 2 であるクラスター 7 については中央値のみをプロットしている.

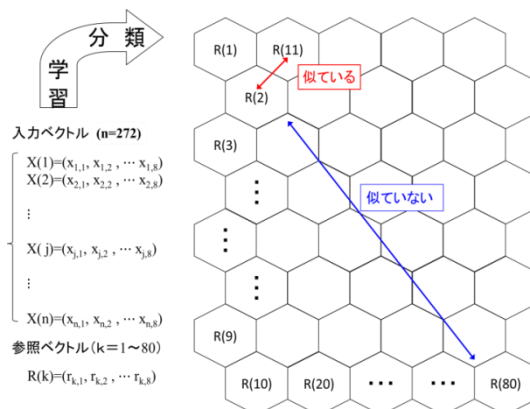


図-2 SOM のノードマップ例(10 : 8 配列)

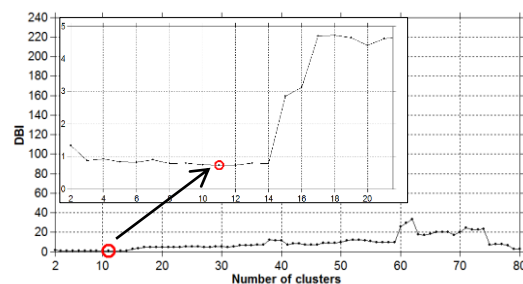


図-3 k-means 法による DBI 値の計算結果

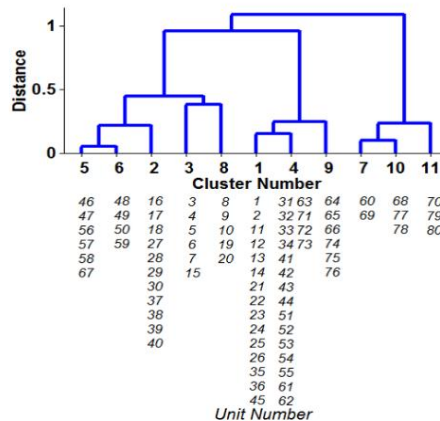


図-4 ウォード法による階層図

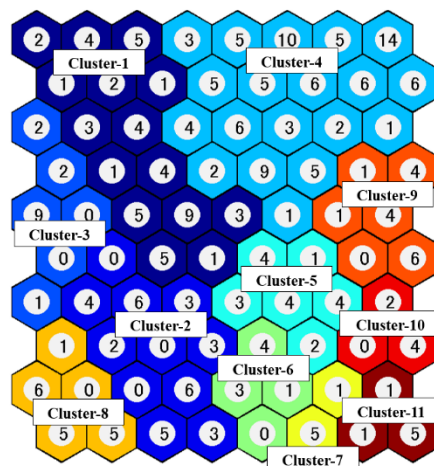


図-5 被圧地下水のクラスター分類結果

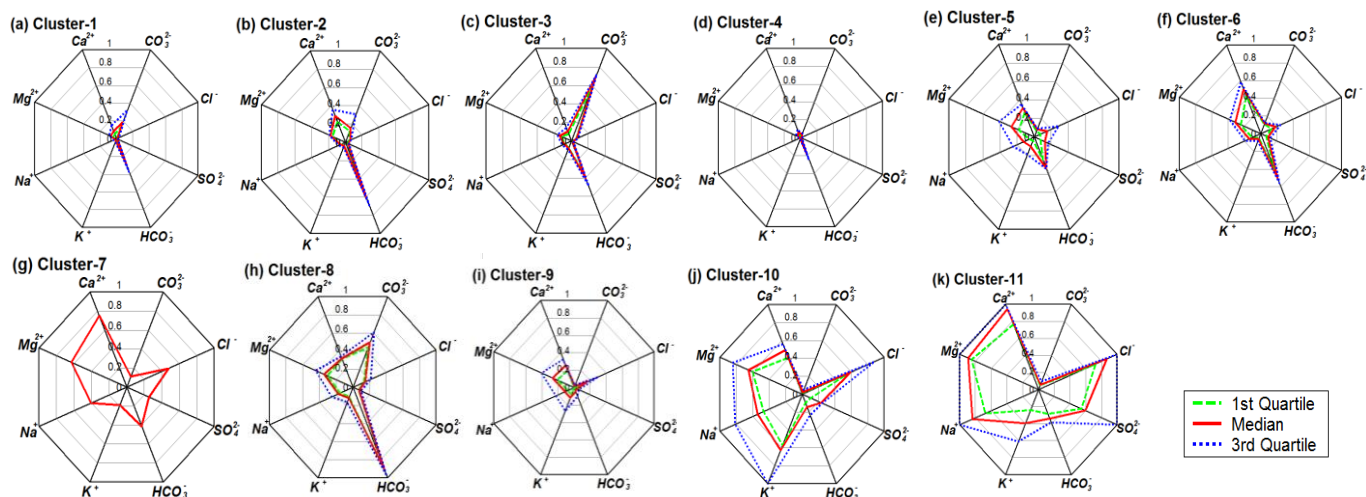


図-6 被圧地下水における各クラスターのレーダーチャート

(2) 各クラスターのイオン特性について

図-4より、クラスター2, 5, 6, クラスター1, 4, 9, クラスター7, 10, 11はクラスター間の距離が近く、互いに性質が似ているクラスターであることが分かる。また、クラスター3と8はクラスター2, 5, 6に比較的類似した性質を持つことが分かる。図-6から各クラスターの特徴を見てみると、クラスター1, 4, 9は全てのイオンの値が低く、特にクラスター4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2, 3, 5, 6, 8は HCO_3^- の値が共通して高いパターンであり、クラスター3, 8は HCO_3^- に加えて CO_3^{2-} の値も高いクラスターである。さらに、クラスター7, 10, 11は全ての陽イオン(Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+)と Cl^- の値が高く、特にクラスター11は全クラスター中最も高塩度のクラスターであることに加え SO_4^{2-} の値も高いことが分かる。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(Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+)と Cl^- の値が高い高塩度タイプ(クラスター7, 10, 11), HCO_3^- の値が高い低塩度タイプ(クラスター2, 3, 5, 6, 8), Na^+ と Cl^- の値が低い淡水タイプ(クラスター1, 4, 9)の3つの水質タイプに分類できる。

(3) 被圧地下水の経年特性

表-1に、1993年、2002年、2011年の3年間における被圧地下水の経年変動傾向を示す。経年変動の対象とした観測井は全52井の内、2011年でしか入手できなかった観測井(No1, 5, 6, 33, 34, 50)を除く46井とした。また、前述に示した3つの水質タイプを経年傾向の判断基準とし、乾季と雨季に分けて経年傾向の分類を行った。表-1から、1993年から2011年の期間において5つの変動パターン(変化なし、塩度減少傾向、塩度上昇傾向、塩度上昇後、減少傾向、塩度減少後、上昇傾向)に分類されることが分かる。また全46井の内、約80%にあたる35井で雨季と乾季の両季節において同様の経年傾向を示している。

表-2には、被圧地下水の季節変動傾向を示す。季節変動とは、ある観測井において乾季から雨季にかけて当該年の水質タイプが異なることであり、その対象は欠測を除く全135データ(1993年：37, 2002年：46, 2011年：52)である。表-2より、全135個中25個において季節変動を確認し、その内18個が乾季から雨季にかけて塩度の下がる傾向を示している。これは、乾季から雨季にかけ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、図-7及び図-8に、乾季及び雨季における経年変動の空間分布を示す。これより、変化なしとした観測井は下流域から上流域に向かうにつれ多くなることが確認でき、上流域に行くほど経年変動のない安定した流域であると考えられる。塩度減少傾向を示した観測井は主にハノイ市周辺の上流域(No2, 7, 9, 10, 49), 中流域(No19, 20, 21, 22), 西側の下流域(No30, 31)に分布している事が確認できる。ハノイ市では、周辺河川や湖沼の水質悪化を改

表-1 被圧地下水の各経年変動パターン

	観測井番号		
	両季節	乾季のみ	雨季のみ
変化なし	3, 4, 8, 12, 13, 14, 25, 32, 35, 37, 39, 40, 41, 43, 44, 46, 47, 48, 51, 52	18, 38, 49	20, 26, 27, 36
塩度減少傾向	2, 7, 9, 10, 19, 21, 22, 30, 31	20	49
塩度上昇傾向	11, 15, 17, 23, 45	24, 28, 29	18
塩度上昇後、減少傾向	16, 42	27, 36	24, 28, 29, 38
塩度減少後、上昇傾向		26	

表-2 被圧地下水の各季節変動パターン

	観測井番号		
	1993年	2002年	2011年
塩度上昇傾向	49	15, 24, 29, 38	20, 33
塩度減少傾向	2, 9, 10, 26	16, 18, 27, 30, 36	7, 16, 19, 24, 26, 28, 29, 31, 34

善するために1995年からJICA協力の下、水環境改善事業が行われている⁷⁾。さらに、西側の下流域では1990年代、農業を行うために地表の塩度を下げる土壌乾燥技法を始めた地域である⁸⁾。これらの地域は表面水の水質改善により、地下水涵養する水質も改善され塩度の下がる傾向を示したと示唆される。また、塩度上昇傾向を示した観測井は主にデルタの上流域及び中流域に分布している。これらの観測井は灌漑などの人為的活動やハノイ市の生活排水により涵養される水質の悪化が原因と考えられる。

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紅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3年間分に適用し、被圧地下水の経年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、11のクラスターに分類され、各クラスターのイオン特性から高塩度タイプ(クラスター7, 10, 11)、低塩度タイプ(クラスター2, 3, 5, 6, 8)、淡水タイプ(クラスター1, 4, 9)の3つの水質タイプに分類された。また、経年傾向としては5つのグループに分類され、約80%で雨季と乾季の両季節において同様の経年変動を示した。塩度減少傾向は上流域および中流域に分布しており、地下水涵養により流入する水質の改善や農業のため塩度を下げる土壌乾燥技法の導入、塩度上昇傾向はデルタ全域に確認され、灌漑などの人為的活動やハノイ市の生活排水による影響が示唆された。

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) 築山裕哉, 河村 明, 天口英雄, Nguyen, Thanh Thuy: 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, 第42回土木学会関東支部研究発表会講演集, CD-ROM版(II-84).
- 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) 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.
- 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) ハノイ水環境改善事業 (I-1) (I-2). http://www2.jica.go.jp/ja/evaluation/pdf/2009_VNII-7_4_f.pdf
- 8) 春山成子: ベトナム北部の自然と農業 紅河デルタの自然災害とその対策, 古今書院, pp.83~89, 200

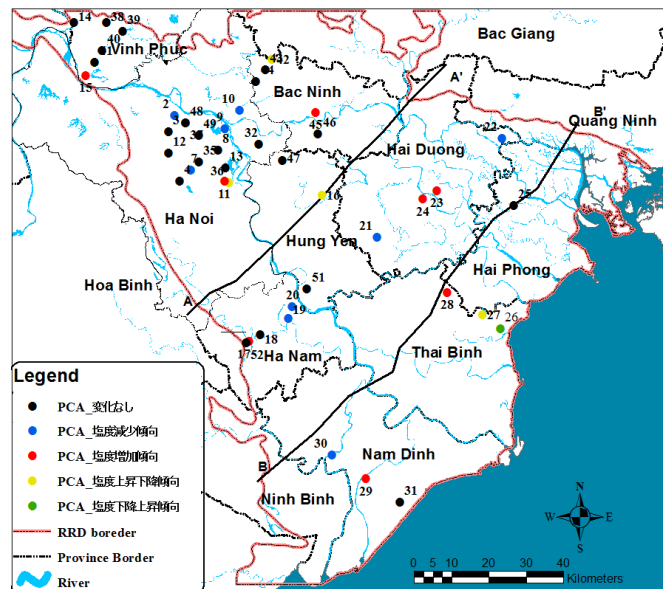


図-7 被圧地下水における経年傾向の空間分布(乾季)

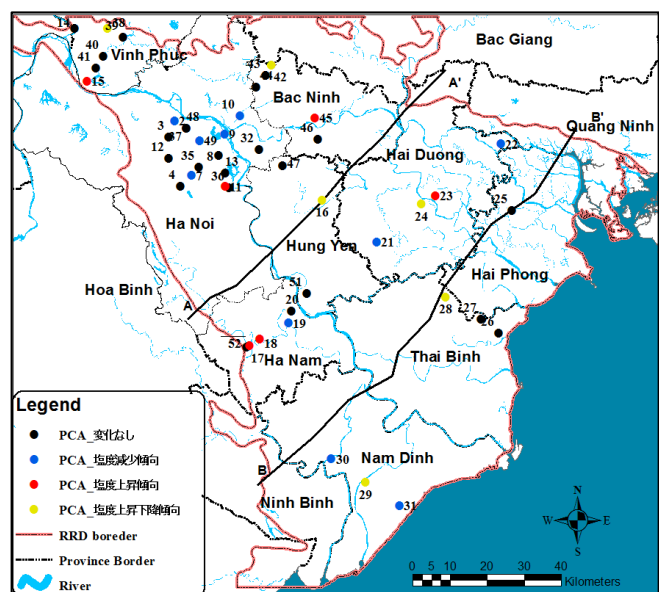


図-8 被圧地下水における経年傾向の空間分布(雨季)