

ベトナム・紅河デルタにおける不圧地下水イオン特性の空間季節変動

首都大学東京	都市環境学部	学生員	○西村直毅
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

紅河デルタはベトナムでメコンデルタにつぐ二番目に大きいデルタであり、乾季(11月から4月)と雨季(5月から10月)のふたつの季節を持つ熱帯モンスーン地域に位置している。また紅河デルタはベトナムで最も開発された地域のひとつであり、ベトナムの主要経済都市である Ha Noi と Hai Phong が位置している。しかし都市化されたこの地域の湖や池や運河は、未処理の生活排水や工業排水によって汚染が深刻化している。そのため地表の汚染問題にあまり影響されず比較的正常的な地下水は、紅河デルタにおいて最も信頼される生活用水資源となっている。近年の紅河デルタでの急激な人口増加や産業発展に伴い地下水の過剰取水を行った結果、井戸の枯渇や地下水位の低下、地盤沈下など様々な問題を引き起こしている¹⁾。特に、地表面に最も近い完新世の不圧帯水層(Holocene Unconfined Aquifer, 以下「HUA」と記す)の地下水は農業活動など地表面における人為的活動の影響を強く受けている。このような地下水資源問題を解決し、持続可能な管理を行うためには、HUA 地下水のイオン特性を解明することが必要不可欠である。そこで本研究では、紅河デルタの HUA 地下水のイオンデータを、自己組織化マップ(Self Organizing Maps, 以下「SOM」と記す)を適用することによりクラスター化してパターン分類し、「空間分布」と「季節変動」について検討した。

2. 対象流域および使用データ

図-1 は対象流域である紅河デルタと 47 の HUA の観測井を示している。紅河デルタは 11 の省と市からなるベトナムで最も開発された地域である。面積約 15,000 km² でベトナム全域の 4.5 % を占めており、人口は 2020 万人(2012 年)でベトナム全人口の 23 % を占めている。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⁾。SOM による解析には、国家水文地質データベースプロジェクトにより得られた 47 観測井の 2011 年の 2 月(乾季)と 8 月(雨季)に採取された HUA 地下水イオンデータを使用した²⁾。対象とした水質データは、主要な陽イオン(Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺)と主要な陰イオン(HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, CO₃²⁻)である。また図-1 上の 2 つの横断線(AA' と BB')によって、対象地域を上流域(観測井 No.1~15, 53~57), 中流域(観測井 No.16~24, 58~64), 下流域(観測井 No.25~31, 65~68)の 3 つの領域に便宜的に分けた。

3. 自己組織化マップ(SOM) の概要

SOM は Kohonen により開発されたニューラルネットワークであり、複雑なデータを類似度に従い二次元マップ上の集合に分けることができる³⁾。それゆえ、多次元で複雑なデータを視覚化して特徴を直感的に理解するのに SOM は有効な手法である。SOM は入力層と出力層の 2 層構造となっており、入力層は入力ベクトル、出力層はノードマップにより構成されている。各ノードは参照ベクトルと呼ばれる入力ベクトルと同じ次元のベクトルで表現され、SOM のアルゴリズムでは、入力ベクトルを基に参照ベクトル

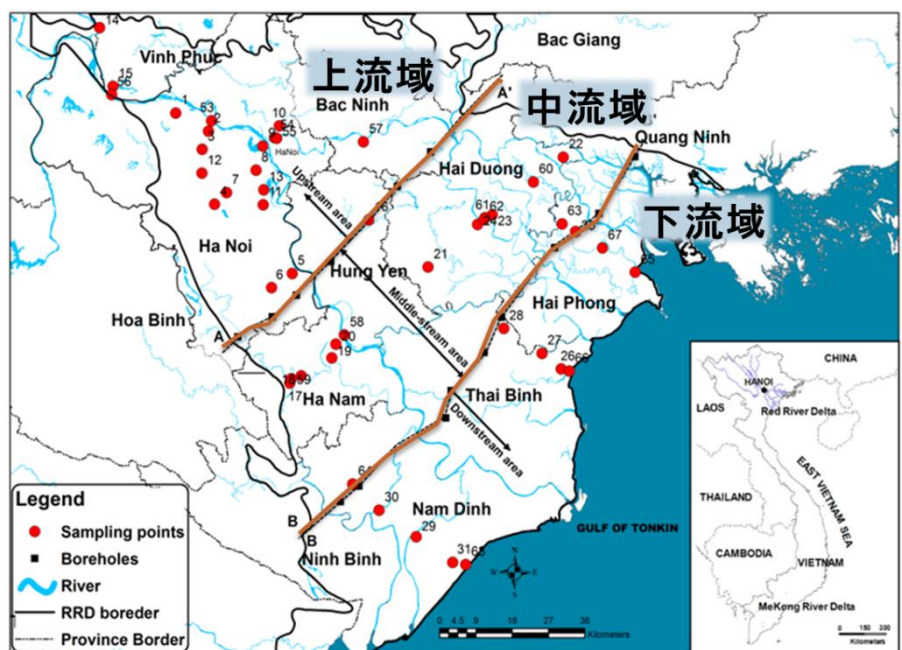


図-1 紅河デルタと観測井

キーワード：不圧地下水、イオン特性、ベトナム、紅河デルタ、自己組織化マップ

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 : nishimura-naoki@ed.tmu.ac.jp

が入力ベクトルの特性に漸近するように学習される。図-2はSOMマップとその学習のイメージ図である。学習により得られた参照ベクトルは、互いの距離が近いほど似た性質を持ち、距離が遠いものほど異なる性質を持つ。学習が完了したら、全ての入力ベクトルを一番近い特性の参照ベクトルを持つノードに分配する。最後に、マップ上の参照ベクトルのクラスター化を行い、似た特性のノード同士をひとつの集合にまとめる。これには、k-means法を適用し、DBI値が最小となるクラスター数を採用する。そしてウォード法を用いてクラスターの階層化を行う⁴⁾。

4. イオン特性のパターン分類結果

図-3は、94の入力データ(47の観測井の雨季と乾季においてそれぞれ採取)にSOMを適用し得られた、SOMノード上でのイオン特性のパターン分類結果を示している。全ノード数は44であり、行数、列数はそれぞれ11、4である。上記のSOMによるクラスター化の結果、図のように5つのクラスターに分類された。各ノードの中の入力

データの数字は井戸ナンバを表し、D、Rはそれぞれ乾季、雨季を表し、最後のu、m、dはそれぞれ上流、中流、下流を表す。図-4は対象としたイオンごとのマップ上の参照ベクトルの値を示している。グレーの濃淡のパターンが似ているイオン同士には相関関係を認めることができる。例えば Na^+ と Cl^- はパターンが似ており、正の相関関係があることが分かる。図-5は、それぞれのクラスターにおいて、そのクラスターに属するノードの参照ベクトルより各イオンの第1四分位値、中央値、第3四分位値を計算し、グラフにプロットしたレーダーチャートである。このグラフの Na^+ と Cl^- の値に注目すると、これらのクラスターはさらに高塩度タイプ・低塩度タイプ・淡水タイプの3つの水質タイプにグルーピングすることができる。 Na^+ と Cl^- が大きな値を示しているクラスター4は高塩度タイプであり、逆にほとんど値を示していないクラスター1と5は淡水タイプであり、そして残りのクラスター2と3は低塩度タイプである。

入力ベクトル

$$\begin{aligned} X(1) &= (X_{1,1}, X_{1,2}, \dots, X_{1,8}) \\ X(2) &= (X_{2,1}, X_{2,2}, \dots, X_{2,8}) \\ X(3) &= (X_{3,1}, X_{3,2}, \dots, X_{3,8}) \\ &\vdots \\ X(94) &= (X_{94,1}, X_{94,2}, \dots, X_{94,8}) \end{aligned}$$

参照ベクトル

$$\begin{aligned} R(1) &= (R_{1,1}, R_{1,2}, \dots, R_{1,8}) \\ R(2) &= (R_{2,1}, R_{2,2}, \dots, R_{2,8}) \\ R(3) &= (R_{3,1}, R_{3,2}, \dots, R_{3,8}) \\ &\vdots \\ R(44) &= (R_{44,1}, R_{44,2}, \dots, R_{44,8}) \end{aligned}$$

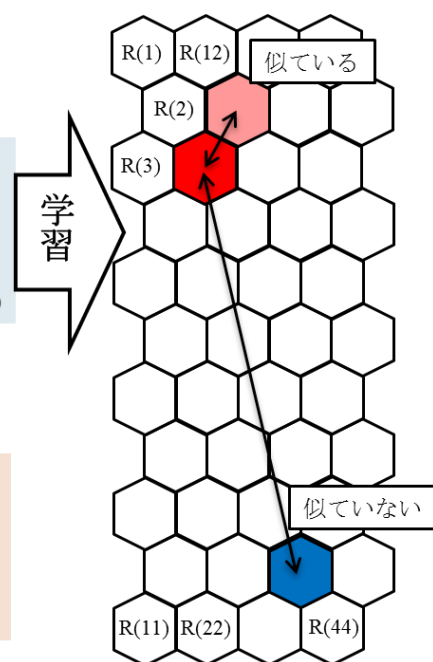


図-2 SOMイメージマップ図

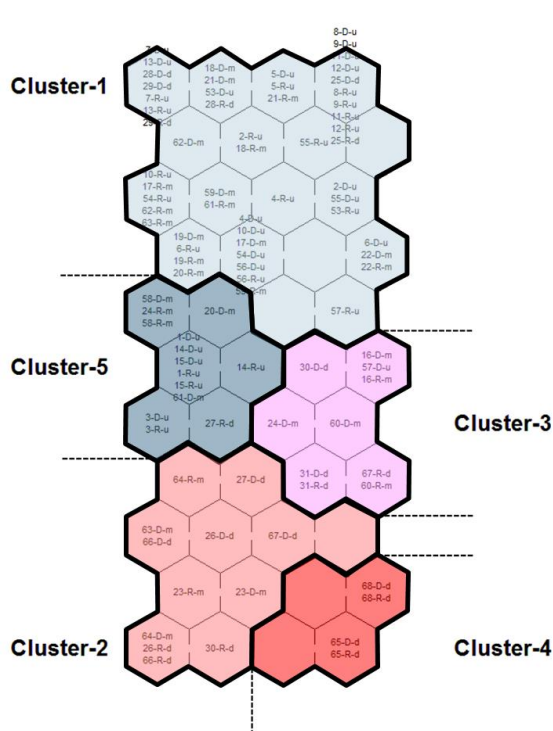


図-3 イオン特性のパターン分類結果

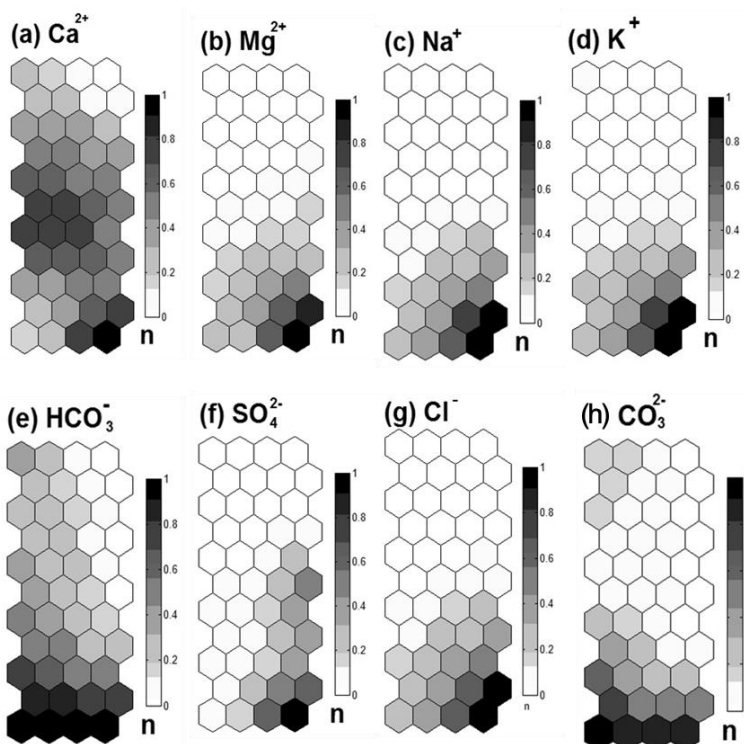


図-4 各イオンの参照ベクトル値

5. 各クラスターの空間分布

図-6 は各クラスターに属する観測井が実際にどのように分布しているかを示している。黒色のマークは雨季、白色のマークは乾季を表している。淡水タイプであるクラスター1と5に属するほぼ全ての観測井が上流域および中流域南西部に集中している。一方、高塩度タイプであるクラスター4や低塩度タイプであるクラスター2と3に属する観測井は主に下流域に位置している。下流域に位置する観測井は、海水侵入の影響によりこのような高・中塩度特性を示していると考えられる。しかし、図中に青色の丸で示しているNo.29の観測井においては、下流域で海岸沿いに位置しているにも関わらず淡水タイプのクラスター1を示した。この観測井のある地域のNam Dinhは、本来は土壌の塩分濃度が高い地域であったが、稲作の生産を拡大させるため、1990年代に「土壌乾燥技法」を導入することにより塩分濃度を下げることに成功した⁵⁾。この土壌乾燥技法とは、種まき前に河川水を引き込み4~5回にわたってかけ流すことで、土壌の塩分を洗い流す技法である⁵⁾。このため、No.29の観測井は淡水タイプとなっておりと考えられる。次に、低塩度タイプのクラスター3に属する観測井は、No.24やNo.57やNo.60など上流域と中流域の北東部に分布している。図-5より、このクラスター3は Ca^{2+} の値が高い特性を持つことを確認できる。この要因としては、該当地域では集約的な灌漑農業が盛んであり⁶⁾、虫の筋収縮に効果のある Ca^{2+} を主成分とする農薬が土壌に浸透しているためと考えられる。

6. クラスターの季節変動

図-7は乾季から雨季にかけてクラスターの季節変動が生じた8つの観測井を示している。青色のマークは塩度の下がる方向に変動した観測井を示しており、赤色のマークは塩度の上昇する方向に変動した観測井を示している。そして中を塗りつぶしたマークはクラスターのみならず水質タイプも変動した観測井を表している。8つの観測井の内7つの観測井で塩度が下がる方向に変動している。これは、雨季における降雨の流入量増加によって地下水が希釈されたためと考えられる。さらに、雨季においては河川流量が増大し、河川をさかのぼる海水の範囲が狭まることも要因として挙げられる。一方、No.30の観測井は、水質タイプの変化は無いものの、クラスター3からクラスター2へ少し塩度の上昇する方向へと変動している。すなわち、図-5より、この変動は主に CO_3^{2-} と HCO_3^- の増加に起因しており、この理由として、この観測井周辺のダイ川沿いの地域には石灰岩

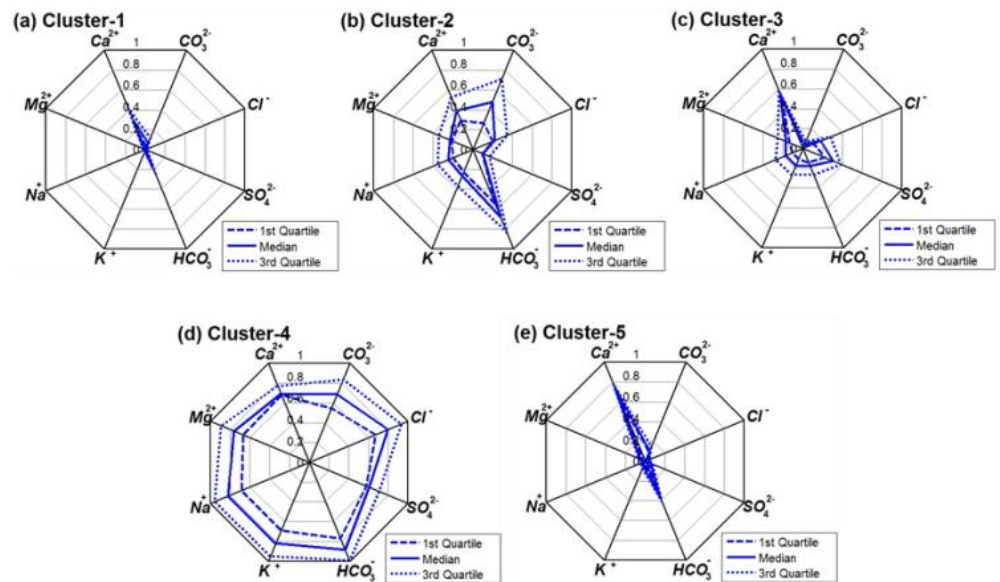


図-5 各クラスターのレーダーチャート

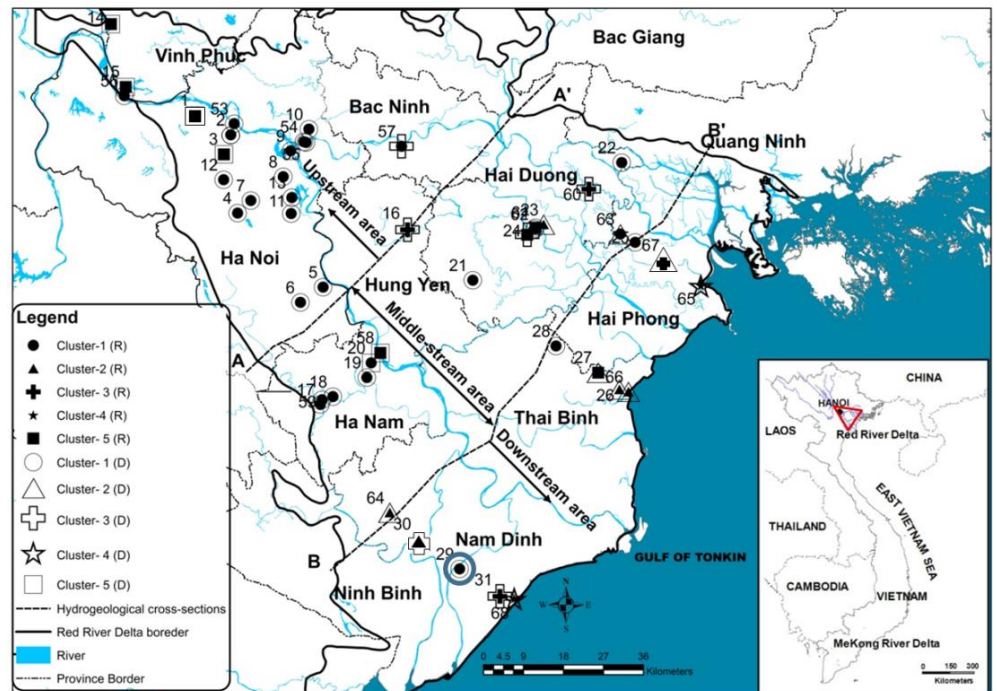


図-6 各クラスターの空間分布

石が多く存在し⁷⁾、降雨によってそれらが溶出し地下水に流入したためと考えられる。

7. むすび

本研究では、紅河デルタのHUA地下水のイオンデータを、SOMを適用することによりクラスター化してパターン分類し、「空間分布」と「季節変動」について検討を行った。

SOMによるパターン分類では地下水イオンデータは5つのクラスターに分けられ、さらに高塩度タイプ(クラスター4)、低塩度タイプ(クラスター2,3)、淡水タイプ(クラスター1,5)の3つの代表的な水質タイプにグルーピングされた。高塩度と低塩度の水質タイプは主に中流域の北東部と下流域に分布し

ており、一方で淡水タイプは主に上流域と中流域の南西部に分布していることを示した。これら3つの水質タイプの空間分布の内特異な水質タイプの要因を検討した結果、主として上流域と中流域の北東部に分布する低塩度タイプのクラスター3に属する観測井では集約的な灌漑農業の農薬に影響を受けていることが考えられ、海岸沿いであるにも関わらず淡水タイプである観測井では「土壌乾燥技法」の導入により淡水化していると示唆された。乾季から雨季におけるクラスターの季節変動は8つの観測井で見られ、希釈効果などの要因により主に塩度が下がる方向に変動をしていることが分かった。逆に、塩度が上昇する方向の変動に関しては、主に CO_3^{2-} と HCO_3^- が増加するように変動しており、これは周囲の石灰岩石の溶出などの要因が挙げられた。

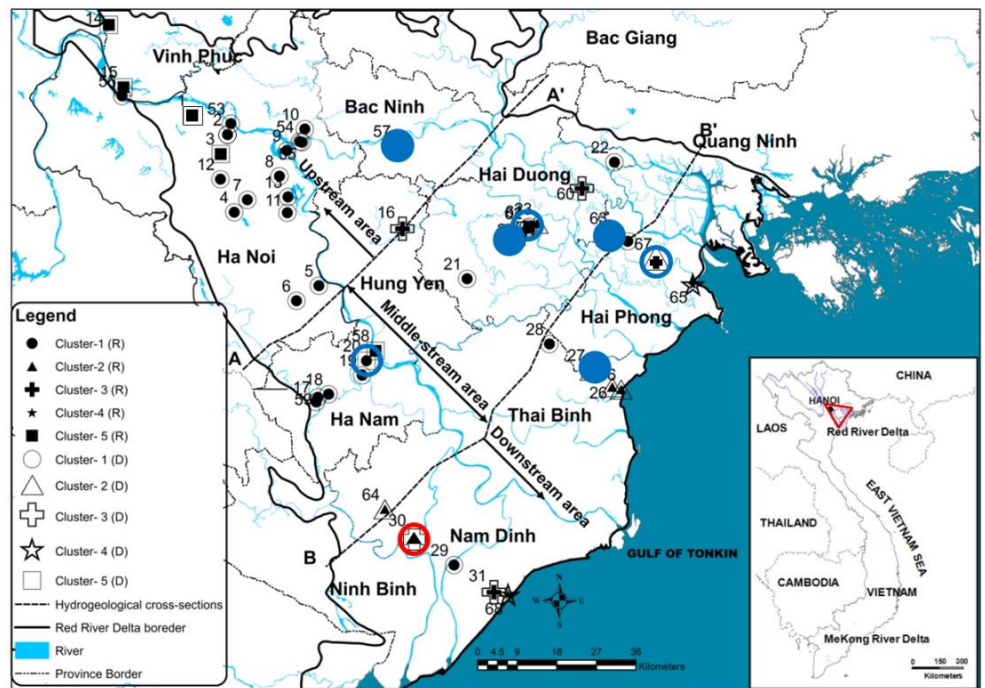


図-7 水質タイプおよびクラスターの季節変動

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) 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.
- 3) Kohonen, T., Self-organizing Maps, third edition. Springer-Verlag, Berlin, 2001.
- 4) 石原成幸, 河村明, 天口英雄, 高崎忠勝, 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に伴う東京における地下水位の変動特性評価 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.69, No.4, pp. I_541-I_546, 2013
- 5) 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, 2004
- 6) Asia Development Bank, Final Report on Management Study on Land Use and Water Management, Red River Basin Water Resources Management Project, 2000.
- 7) 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.17~19, 2004