

ベトナム・紅河デルタにおける被圧地下水の水文地球化学的特性

首都大学東京	都市環境科学研究科	学生員	○山地	秀幸
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	中川	直子
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	T.T.Nguyen	

1. はじめに

ベトナムの首都ハノイを含む紅河デルタは、ベトナムで最も人口が密集している地域の一つであり、紅河デルタに住む約 2,000 万人が主要な水源として地下水を使用している。しかし、近年、紅河デルタにおける急速な人口増加および経済発展に起因した地下水の利用量増加により、地下水位の低下や地下水の水質劣化が発生し、紅河デルタにおける地下水の持続的な管理が求められている。地下水を持続的に管理するために、ベトナムでは紅河デルタにおける水資源に関して多くの研究がなされているが、紅河デルタ全体における被圧地下水の水文地球化学的特性に関する研究を行った例はほとんど見受けられない。

以上の背景の下、本研究では、紅河デルタにおける 31 の観測井より得られた 1993 年と 2011 年の乾季・雨季の被圧地下水を対象に、地下水質のイオン特性を表現するパイパーダイアグラムおよびギブスダイアグラムを適用し、紅河デルタにおける被圧地下水の水文地球化学的特性を明らかにした。さらに、本結果をもとに、季節変動、空間的特性、経年変化の観点から考察を行った。

2. 対象地域と使用データ

図-1 で示したベトナムの首都ハノイを含む紅河デルタ（面積は約 13,000km²）は、乾季と雨季がある熱帯モンスーン地域に位置し、乾季は 11 月から 4 月、雨季は 5 月から 10 月である。年間平均降水量は 1,600mm 程度であり、その 75%は雨季での降水である。

地下水の水文地球化学的特性の評価には地下水質データが不可欠であるが、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施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得る事ができたものの、そのデータは体系的に整理されておらず限られた人しか利用できなかった。そこで、ベトナム政府が主導となり、国家水文地質データベースプロジェクトが 2000 年に開始された。本研究では紅河デルタにおける被圧地下水の水文地球化学的特性を明らかにするために、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、1993 年と 2011 年の 2 月（乾季）と 8 月（雨季）の被圧地下水の地下水質データを使用した。使用した地下水質データは TDS, pH, 陽イオン (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺), 陰イオン (HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻), NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻ の 12 の地下水質パラメータである。なお、以下のパイパーダイアグラムで必要となる炭酸イオン (CO₃²⁻) については重炭酸塩 (HCO₃⁻) と pH から算出した。図-1 には、本研究で用いた紅河デルタにおける被圧地下水を対象とする 31 の観測井の位置を示している。本研究では被圧地下水の空間的特性を明らかにするために、図-1 に示すように、紅河デルタを上流域（観測井 1~15）、中流域（観測井 16~24）、下流域（観測井 25~31）の 3 つの地域に分割した。なお、被圧地下水の経年変化を考察するために利用した

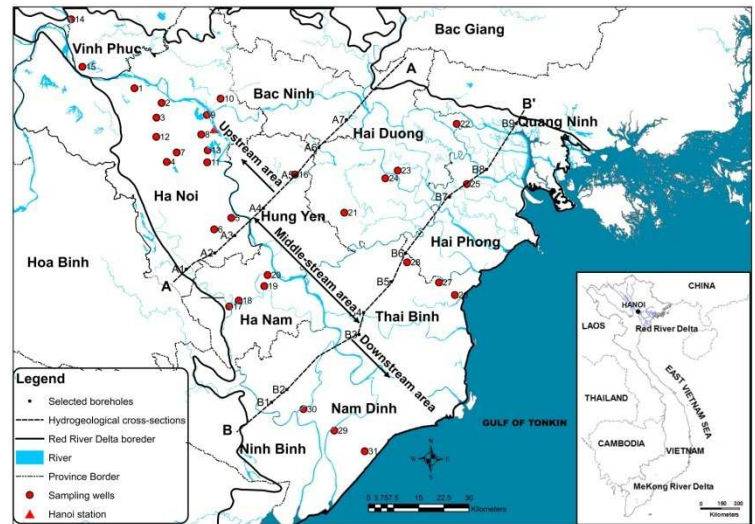


図-1 ベトナム・紅河デルタと観測井

キーワード 水文地球化学的特性, パイパーダイアグラム, ギブスダイアグラム, 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 : yamaji-hideyuki@ed.tmu.ac.jp

1993年の地下水質データは、ハノイ市周辺の10観測井（観測井1~3, 7~13）のみで観測されていた。

3. 研究手法

本研究では紅河デルタにおける被圧地下水の水文地球化学的特性を明らかにするために、被圧地下水のイオン濃度データを、図-2で示したパイパー・ダイアグラム上にプロットした。パイパーダイアグラムにおける左右の三角チャートを用いる事により、各観測井において有力である陽イオンタイプおよび陰イオンタイプをそれぞれ識別する。左側の三角チャートは $[Ca^{2+}]$, $[Mg^{2+}]$, $[Na^{+}+K^{+}]$ の陽イオン濃度の割合により、イオンタイプが $[Ca^{2+}]$, $[Mg^{2+}]$, $[Na^{+}]$ の3つの陽イオンタイプの領域に分類される。また同様に、右側の三角チャートは $[HCO_3^{-}+CO_3^{2-}]$, $[Cl^{-}]$, $[SO_4^{2-}]$ の陰イオン濃度の割合により、 $[HCO_3^{-}]$, $[Cl^{-}]$, $[SO_4^{2-}]$ の3つの陰イオンタイプの領域に分類される。各観測井における地下水で有力である陽イオンタイプおよび陰イオンタイプをそれぞれ識別する事により、地下水質のイオン特性を表現する事ができる¹⁾。本研究では、パイパーダイアグラムを用いてイオンタイプの季節変動、空間的特性、経年変化について検討した。

紅河デルタにおける被圧地下水の水文地球化学的特性を決定づける要因を明らかにするために、本研究ではギブスダイアグラムを適用した。Gibbsは対数縦軸上にTDS、横軸が陽イオンのギブス比 $Na/(Na+Ca)$ または陰イオンのギブス比 $Cl/(Cl+HCO_3)$ であるギブスダイアグラム上において、表流水の大部分は図-3に示した水色の範囲に位置する事を見出した²⁾。また、表流水の水文地球化学的特性を決定づける要因は、3つの支配領域(降水支配領域, 岩石支配領域および蒸発支配領域)に分類される事を明らかにした。さらに、Kumarはこれらの支配領域をより明確に判断できるようにするために、紅色で示した境界を設けた³⁾。本研究では、ギブスダイアグラムによる被圧地下水の水文地球化学的特性を決定づける要因の季節変動、空間的特性、経年変化について検討した。

4. パイパーダイアグラムによる考察

図-4に被圧地下水のイオンタイプに関し、パイパーダイアグラムで得られた結果を示す。図中の番号は図-1で示した観測井に対応しており、円と非円形の記号はそれぞれ雨季と乾季を示している。左側の三角チャートから、乾季と雨季それぞれで観測した62の地下水質データのうち、24の地下水質データが $[Ca^{2+}]$, 33の地下水質データが $[Na^{+}]$ に分類される一方、5の地下水質データだけが $[Mg^{2+}]$ と分類された。右側の三角チャートでは62の地下水質データのうち、30の地下水質データが $[HCO_3^{-}]$, 31の地下水質データが $[Cl^{-}]$ に分類され、1つの地下水質データだけが $[SO_4^{2-}]$ に分類された。また、乾季で5のイオンタイプ、雨季で6のイオンタイプが存在し、 $[Ca-HCO_3]$ タイプ, $[Na-Cl]$ タイプ, $[Na-HCO_3]$ タイプ, $[Mg-HCO_3]$ タイプの地下水が乾季と雨季の両シーズンで検出された一方、 $[Na-SO_4]$ タイプの地下水は乾季のみで、 $[Mg-Cl]$ タイプ, $[Ca-Cl]$ タイプの地下水が雨季だけに検出された。

次に、乾季から雨季にかけて31の観測井のうち9の観測井がイオンタイプの季節変動を示した。9の観測井のうち8の観測井で $[Mg^{2+}] \rightarrow [Ca^{2+}]$, $[Na^{+}] \rightarrow [Ca^{2+}]$, $[Na^{+}] \rightarrow [Mg^{2+}]$, $[Ca^{2+}] \rightarrow [Mg^{2+}]$, $[Ca^{2+}] \rightarrow [Na^{+}]$ のように、陽イオンに関する変化を示したが、観測井16だけ陰イオンに関する変化($[SO_4^{2-}] \rightarrow [Cl^{-}]$)が見られた。これらの季節変動より、雨季において不圧地下水の影響を受けている事が示唆される。

図-5に被圧地下水の陽および陰イオンタイプの空間的特性を示す。図中における白と黒の記号はそれぞれ

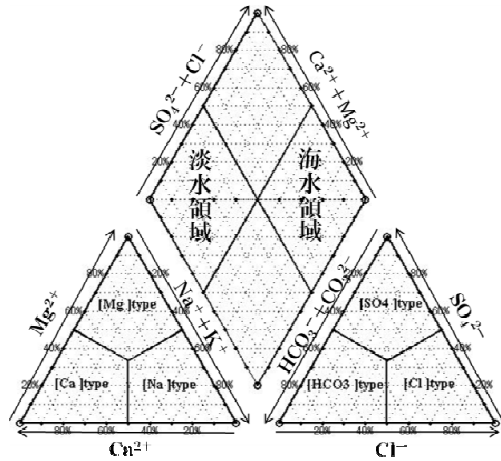


図-2 パイパーダイアグラムの概念図

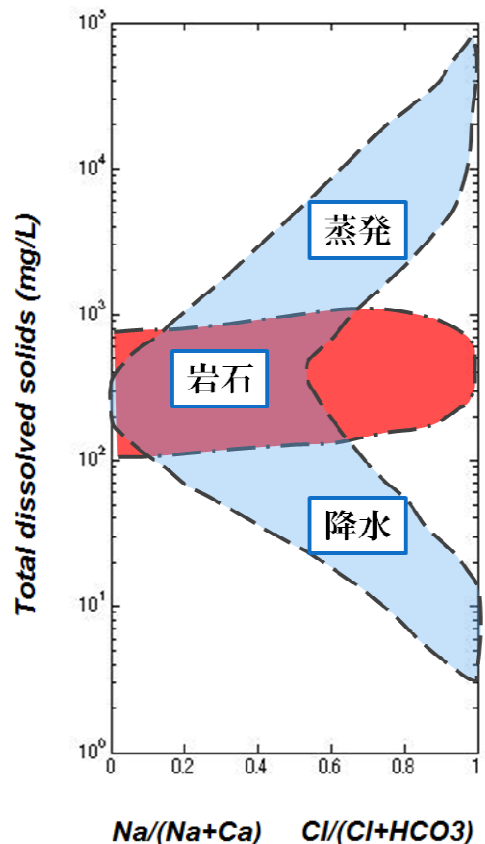


図-3 ギブスダイアグラムの概念図

乾季と雨季を示し、円形，三角形，四角形，六角形，星印，十字型，米印の記号はそれぞれ[Ca-HCO₃]，[Na-HCO₃]，[Na-Cl]，[Mg-HCO₃]，[Mg-Cl]，[Ca-Cl]，[Na-SO₄]を示す。

図-5 より，[Ca-HCO₃]タイプの地下水が紅河デルタの上流域で観測されるのに対し，[Na-Cl]タイプの地下水は下流域だけでなく中流域や上流域南部まで検出されている。これは，塩水侵入のみならず化石塩水が被圧地下水のイオンタイプに影響を与えている事を示唆している⁴⁾。

さらに，被圧地下水のイオンタイプの経年変化を見るために，図-6 に1993年と2011年の乾季・雨季の被圧地下水を対象としたパイパーダイアグラム適用結果を示す。なお，2011年については図-4 から観測井1~3，7~13におけるパイパーダイアグラム適用結果を抽出したものである。図-6 より，1993年と2011年のどちらも[Ca-HCO₃]タイプの地下水が多く存在する事が分かった。なお空間分布については，1993年の空間分布は2011年の空間分布とほとんど同様の結果が得られた事を確認した。また，上流域の観測井13において1993年から2011年にかけて雨季で検出された地下水質データのイオンタイプが[Na-HCO₃]から[Ca-HCO₃]に変化しているが，これは観測井13がベトナムの首都であるハノイ市の中心に位置しており，ハノイ市の生活排水の影響を受けている事が示唆される。

5. ギブスダイアグラムによる考察

図-7 にギブスダイアグラムによる適用結果を示す。図-4 と同様，図中の番号は図-1 で示した観測井に対応しており，円と非円形の記号はそれぞれ雨季と乾季を示している。図-7 より，上流域（観測井1~16），中流域南部（観測井17~20），下流域南部（観測井29~31）における被圧地下水は観測井6と乾季における観測井31を除き岩石支配領域に位置し，中流域北部（観測井21~24），下流域北部（観測井25~28）の被圧地下水は蒸発支配領域に位置している事が分かる。これは，上流域における被圧地下水の水地球化学的特性を決定づける要因は炭酸塩を含んだ岩石の風化であり，下流域にお

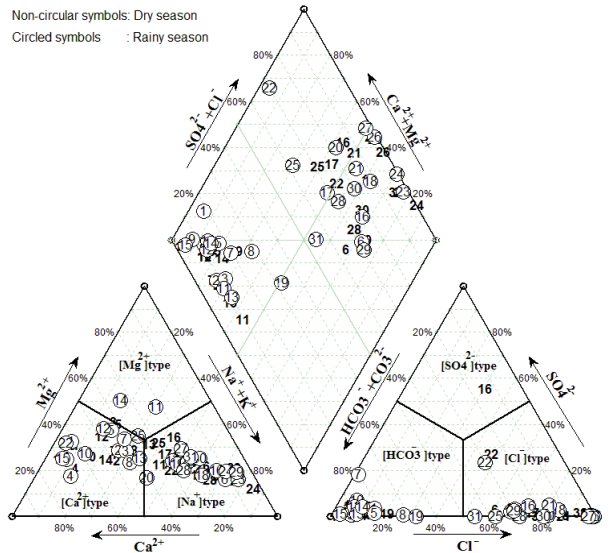


図-4 パイパーダイアグラム適用結果

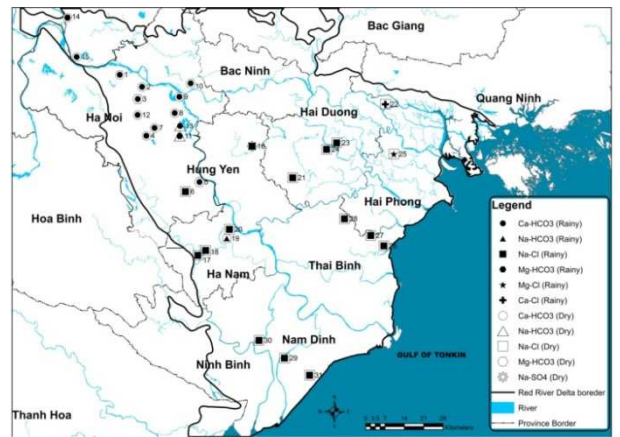


図-5 被圧地下水の空間的特性

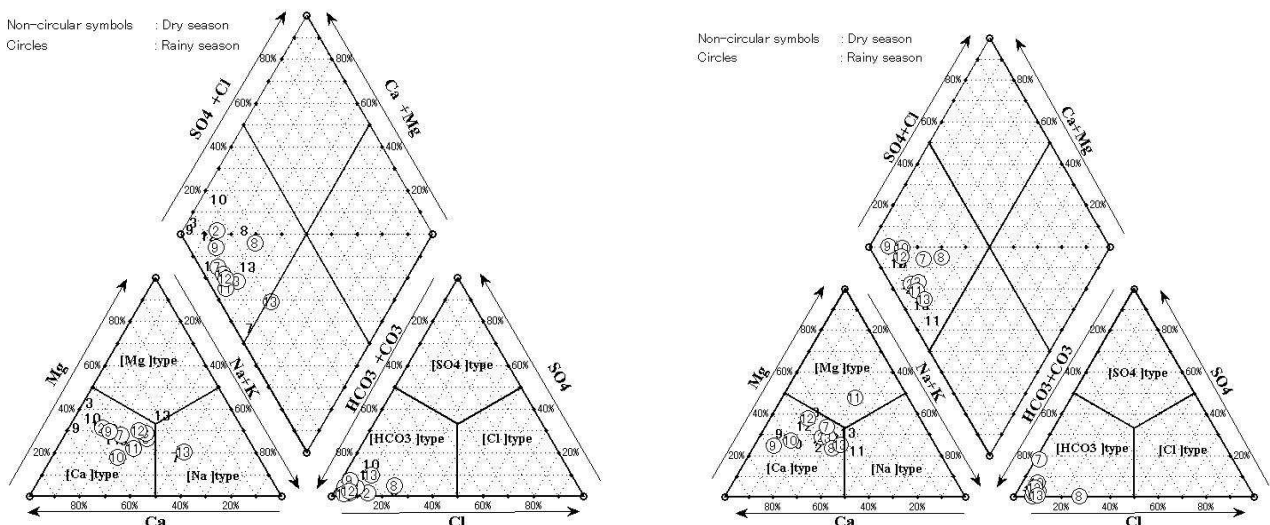


図-6 被圧地下水の経年変化（左図：1993年 右図：2011年）

る被圧地下水の水文地球化学的特性を決定づける要因は、塩水浸入および化石塩水である事を示唆している。また、観測井 31 において乾季から雨季にかけ蒸発支配領域から岩石支配領域に変化を示しているが、これは雨季において降雨や表流水の浸透の影響を受けている事が示される。

さらに、被圧地下水の水文地球化学的特性を決定づける要因の経年変化を見るために、図-8 に 1993 年の乾季・雨季の被圧地下水を対象としたギブスダイヤグラム適用結果を示す。図-8 より、図-7 と比較して被圧地下水の水文地球化学的特性を決定づける要因にほとんど変化が見られなかったものの、支配領域内において陽イオンおよび陰イオンのギブス比が大きく異なる事が分かった。また、1993 年から 2011 年にかけて、上流域の観測井 3 は乾季における陽および陰イオンのギブス比が増加している一方、乾季における上流域の観測井 7 の陽イオンのギブス比が減少している事が判明した。これはベトナムの土地利用変化図を照査した結果、観測井 3 では農業活動により肥料の利用量が増加しているが、観測井 7 では紅河デルタにおける人口増加によって都市化が進行し、肥料の利用量が減少したからだと考えられる。

5. むすび

本研究では、紅河デルタにおける 1993 年と 2011 年の被圧地下水を対象に、地下水質のイオン特性を表現するパイパーダイヤグラムとギブスダイヤグラムを適用し、紅河デルタにおける被圧地下水の水文地球化学的特性を明らかにした。さらに、本結果をもとに、季節変動、空間的特性、経年変化の観点から考察を行った。その結果、パイパーダイヤグラムからは、陽および陰イオンタイプの季節変動、経年変化が一部の観測井で検出され、 $[Ca-HCO_3]$ タイプの地下水が紅河デルタの上流域に多く存在し、 $[Na-Cl]$ タイプの地下水が中・下流域に多く存在する事が判明した。またギブスダイヤグラムより、紅河デルタの上流域、中・下流域南部における被圧地下水が岩石支配領域に位置する一方、中・下流域北部における被圧地下水は蒸発支配領域に位置する事が分かった。

参考文献

- 1)Piper, A.M/ (1944). A graphical interpretation of water analysis. Transactions-American Geophysical Union, 25, 914-928.
- 2)Gibbs, R.J. (1970). Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 170(3962), 1088-1090.
- 3)Kumar, S.K., Rammodan, V., Sahayam, J.D., & Jeevanandam, M. (2009). Assessment of groundwater quality and hydrogeochemistry of Manimuktha River basin, Tamil Nadu, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 159, 341-351.
- 4) Tran TL, Larsen F, Pham QN et al (2012) Origin and extent of fresh groundwater, salty paleowaters and recent saltwater intrusions in Red River flood plain aquifers, Vietnam. *Hydrogeology journal* 20:1295-1313

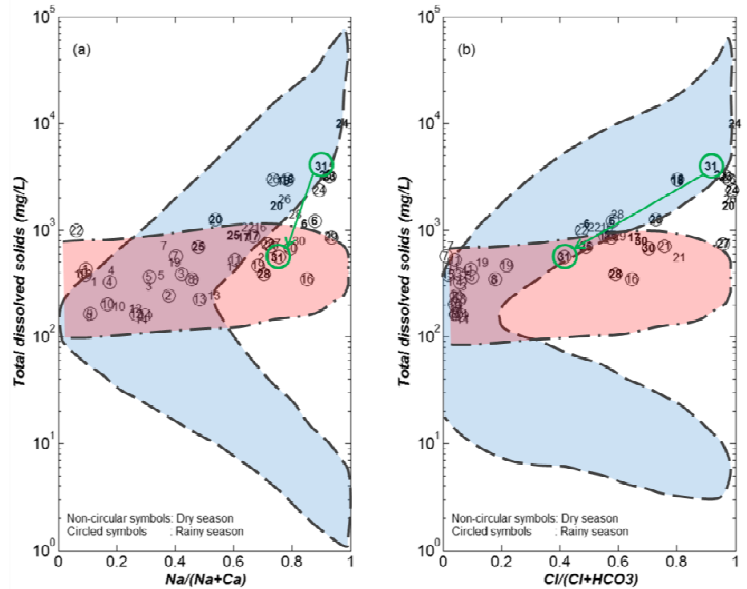


図-7 ギブスダイヤグラム適用結果 (2011 年)

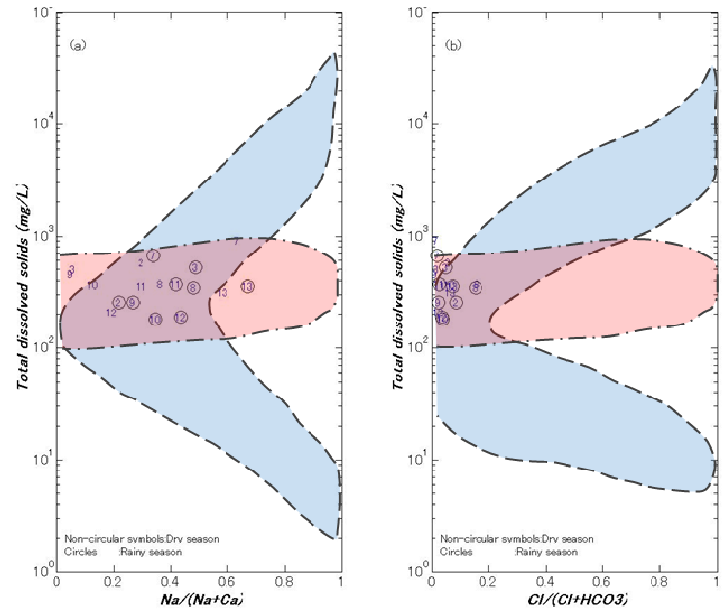


図-8 ギブスダイヤグラム適用結果 (1993 年)