

平成 27 年度(2015 年度) 修士論文

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
地下水イオンの経年変動パターン解析

平成 28 年 3 月

首都大学東京大学院 都市環境科学研究科

都市基盤環境学域

14885426 築山 裕哉

(指導教授 河村 明)

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地下水イオンの経年変動パターン解析

学修番号 14885426 築山裕哉
 都市基盤環境学域 環境システム分野
 指導教授 河村 明

1. はじめに

本研究で対象とする紅河デルタを流れる紅河は高濃度の浮遊物質を含んでおり、生活用水の大半を地下水に依存している。しかしながら近年、急激な人口増加や産業発展により地下水の過剰取水を行われ、地下水位の低下や地盤沈下などの問題が生じている¹⁾。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。そこで本研究では1993年、2002年、2011年における不圧・被圧地下水イオンデータを対象にSOMを適用し、経年変動パターンの解析を行った。

2. 対象流域および使用データ

紅河デルタは面積約13,000 km²、人口約2020万人(2012年)であり、乾季(11~4月)と雨季(5~8月)がある熱帯モンスーン地域である。使用した地下水イオンデータは4つの陽イオン(Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺)と4つの陰イオン(HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, CO₃²⁻)データであり、地下水イオンデータに欠測がある観測井に対してはデータの補間を行った。本研究では、1993年、2002年、2011年の2月(乾季)と8月(雨季)の不圧・被圧地下水の地下水イオンデータを使用した。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における52の観測井を示す。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る。SOMは入力ベクトルを基に参照ベクトルと呼ばれる多次元ベクトルが入力ベクトルのパターンに漸近するように学習される手法である²⁾。また、より詳細な変動特性を捉えるために、参照ベクトルのクラスター化を行った。クラスターの最適数は、k-means法を用いて得られた最小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。

4. SOMによるイオン特性解析結果及びその考察

本概要においては、被圧地下水におけるイオン特性解析結果及びその考察について述べる。被圧地下水の使用データ数は全52井の1993年、2002年、2011年の2月と8月におけるイオンデータから補間できなかったデータを除く272であり、イオンデータの詳細は8つのイオン(Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, CO₃²⁻)である。これより、入力

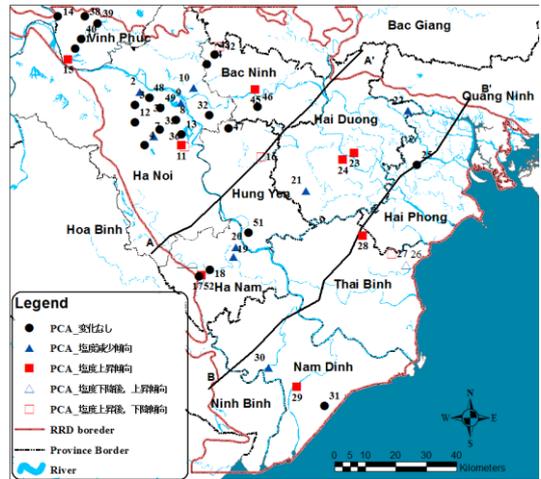


図-4 紅河デルタと被圧地下水の乾季における経年変動パターン分布

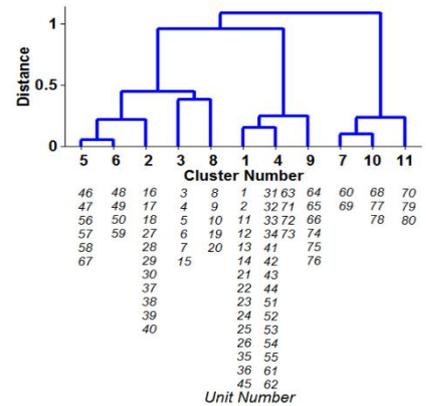


図-2 ウォード法による被圧地下水の階層図

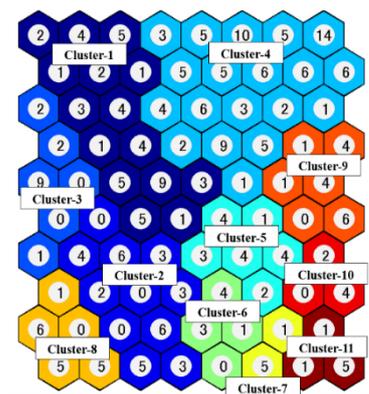


図-3 被圧地下水のクラスター分類結果

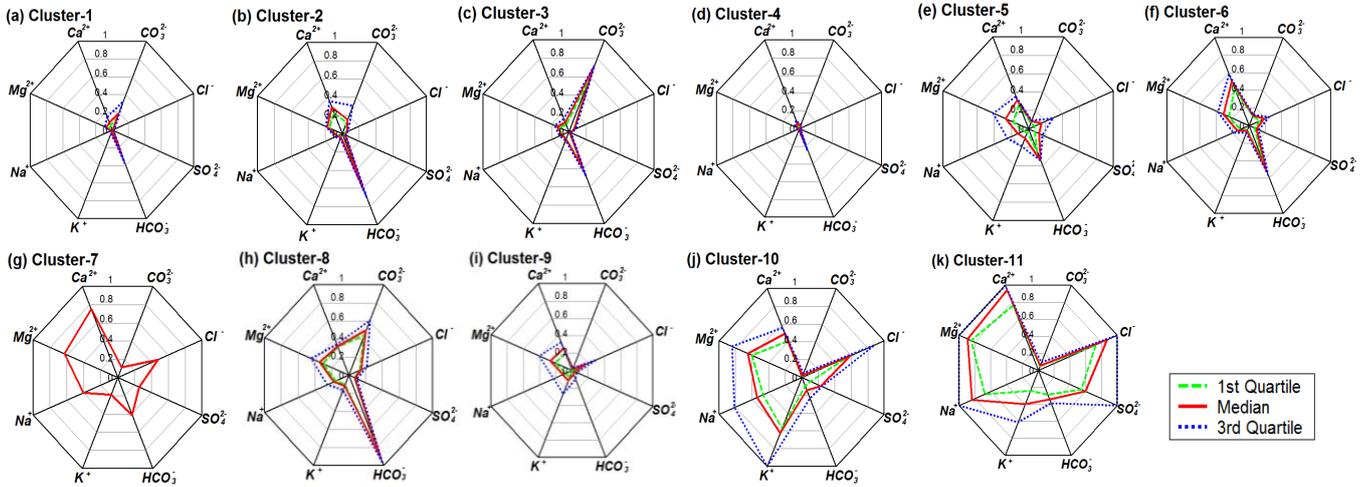


図-4 被圧地下水における各クラスターのレーダーチャート

ベクトルの数は 272 の 8 次元である。図-2 はウォード法による階層図を示しており、k-means 法から得られた最適クラスター数である 11 のクラスターに属するノード番号を示している。図-3 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-4 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。

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	

図-2 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。また図-4 より、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7, 10, 11), HCO₃⁻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される。

表-1 に、1993 年、2002 年、2011 年の 3 年間に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 つの変動パターンに分類された。また全 46 井の内、約 80% にあたる 36 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た。

次に図-1 から、乾季における経年変動の空間分布を示す。変化なしを示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、中流域、西側の下流域に分布している事が確認できる。これらの地域は表面水の水質改善により、淡水タイプの水が地下水涵養し、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、紅河デルタの不圧・被圧地下水における 8 つイオンデータ 3 年間分に適用し、不圧・被圧地下水の経年特性の解析を行った。その結果、被圧地下水イオンは、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 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% 観測井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。

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,
- 2) Kohonen, T., Self-organizing Maps, third edition. Springer-Verlag, Berlin, 2001

目 次

第 1 章 序論

- 1-1 研究の背景と目的1
- 1-2 本論文の構成2

第 2 章 紅河デルタの概要

- 2-1 紅河デルタの概要 3
- 2-2 紅河デルタの帯水層構造 5

第 3 章 使用データの概要とデータ補間

- 3-1 国家水文地質データベースプロジェクトの概要 9
- 3-2 観測地点の詳細 10
- 3-3 使用データの概要 11
- 3-4 データの補間 11

第 4 章 自己組織化マップについて

- 4-1 自己組織化マップの概要 18
- 4-2 自己組織化マップのアルゴリズム 18
- 4-3 参照ベクトルのクラスタリング 23

第 5 章 自己組織化マップによるイオン変動パターン解析

- 5-1 入力データの設定 24
- 5-2 被圧地下水の適用結果 25
 - 5-2-1 被圧地下水における自己組織化マップ適用結果
 - 5-2-2 被圧地下水における経年変動パターン特性
 - 5-2-3 被圧地下水における季節変動パターン特性
- 5-3 不圧地下水の適用結果 38
 - 5-3-1 不圧地下水における自己組織化マップ適用結果
 - 5-3-2 不圧地下水における経年変動パターン特性
 - 5-3-3 不圧地下水における季節変動パターン特性

第6章 結論	51
参考文献	52
<u>謝辭</u>	53

第 1 章

序論

第1章 序論

1-1 本研究の背景と目的

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。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。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不圧・被圧地下水イオンデータを対象にSOMを適用し、経年変動パターンの解析を行った。

1-2 本研究の構成

本研究の構成は以下の通りとなる。

第1章は序論であり，本研究の背景および目的について述べるとともに，本論文の構成を示す。

第2章では，対象流域である紅河デルタの概要および紅河デルタにおける地下水帯水構造について述べた。

第3章では，使用データの概要および使用データのデータ補間について述べた。本研究の使用データは，ベトナムの国家水文地質データベースプロジェクトから得られた，全68観測地点（不圧47井，被圧52井）の地下水イオンデータである。使用データは8つのイオンデータ（ Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} ）を用い，欠測に関しては補間を行った。

第4章は本研究で使用するSOMの概要とその設定について述べている。SOMは，フィンランドの情報処理研究者のKohonen(1982)により提案された分類手法であり，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る。

第5章では，SOMを用いて不圧・被圧地下水イオンの変動パターン解析を行い，その結果について考察した。考察については，経年変動パターン，季節変動パターン，空間変動パターンの3つの観点から行った。

第6章はまとめであり，本研究で得られた知見をまとめ，総括を述べた。

第2章

紅河デルタの概要

第2章 紅河デルタの概要

2-1 紅河デルタの概要

本研究対象である紅河デルタは、ベトナム北部に位置し、図 2-1 に示すように首都ハノイとハイフオンの2つ中央直轄市及び8つ市（ヴィンフック、タイビン、ナムディン、ニンビン、ハイズオン、バクニン、ハナム、フンイエ）から成る、2012年現在、紅河デルタではベトナムの総人口の約23%を占める約2,000万人（Vietnam General Statistics Office 2013）が生活している。人口密度は1,538人/km²であり、ベトナムの全国平均の5倍である。また、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であり、両デルタとも灌漑農業が盛んに行われており、ベトナム国内では紅河デルタはメコンデルタに次ぐコメの生産地である。

紅河デルタは乾季と雨季がある熱帯モンスーン地域に位置している。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%は雨季による降水である。年間平均湿度は約80%であり、平均気温は約24°Cである。年間の蒸散平均は900mm程度である¹⁾。河川網は約0.7km/km²の密度で、非常に広範に河川が広がっている。ハノイ市で観測された紅河の平均流出量は乾季では1,160m³/s、雨季では3,970m³/sである。



図 2-1 紅河デルタ

紅河デルタを流れる紅河の水質は、高濃度の浮遊物質を含んでおり濁度の高い水が流れている。また、都市化の進むハノイ等の上流域におけるインフラの未整備や産業廃棄物の管理の悪さにより、都市における湖沼、池や水路は、未処理である高濃度の生活排水に汚染されている。一方で、地下水は人間活動や地表面でにおける汚染の影響を受けにくく、比較的きれいな水であるために、人々が最も安心して利用できる水源となっており、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、紅河デルタにおける急速な人口増加や経済発展により、紅河デルタにおける水の利用量が増加し地下水の過剰取水が行われた結果、地下水位の低下や井戸の枯渇、地盤沈下などの問題が発生している状態となっている。

2-2 紅河デルタの帯水層構造

紅河デルタは河川によって運ばれた堆積物によって形成された沖積平野である。著者らは以前の研究から、図2-2に示すように紅河デルタを対称に3つの横断線と2つの縦断線を設け、紅河デルタにおける地下水帯水層構造の解析を行った²⁾。図2-2から紅河デルタ流域の地表面においては、完新世（1万年前～現代）の不圧帯水層（Holocene Unconfined Aquifer）、完新世-更新世間の難透水層（Holocene-Pleistocene Aquitard）、更新世（170万年前～1万年前）の被圧帯水層（Pleistocene Confined Aquifer）、そして中生代（2億5000万年前～6500万年前）の岩層（Mesozoic Bedrocks）が占めていることが分かる。特に不圧帯水層の割合は高く、紅河デルタ流域の約88%を占める約11,450 km²の地域に広く分布していた。また、デルタ北部に位置する岩層は、風化などによって岩層にひび割れや隙間が生じて、水を溜めることの出来る中生代の破碎帯(Mesozonic Fractured Zone)が形成されることが分かった。

また、図2-3および図2-4は、それぞれ図2-2に示す3つの横断線および2つの縦断線における地層断面図である。図2-3および図2-4から紅河デルタの帯水層構造は上から完新世の不圧帯水層、完新世-更新世間の難透水層、更新世の被圧帯水層、そして新第3紀（2,303万年前～258万年前）の含水層(Neogene Water bearing Layer)の順に構成されており、紅河デルタが最大100mの厚さをもつ堆積層で構成されている事が判明した。

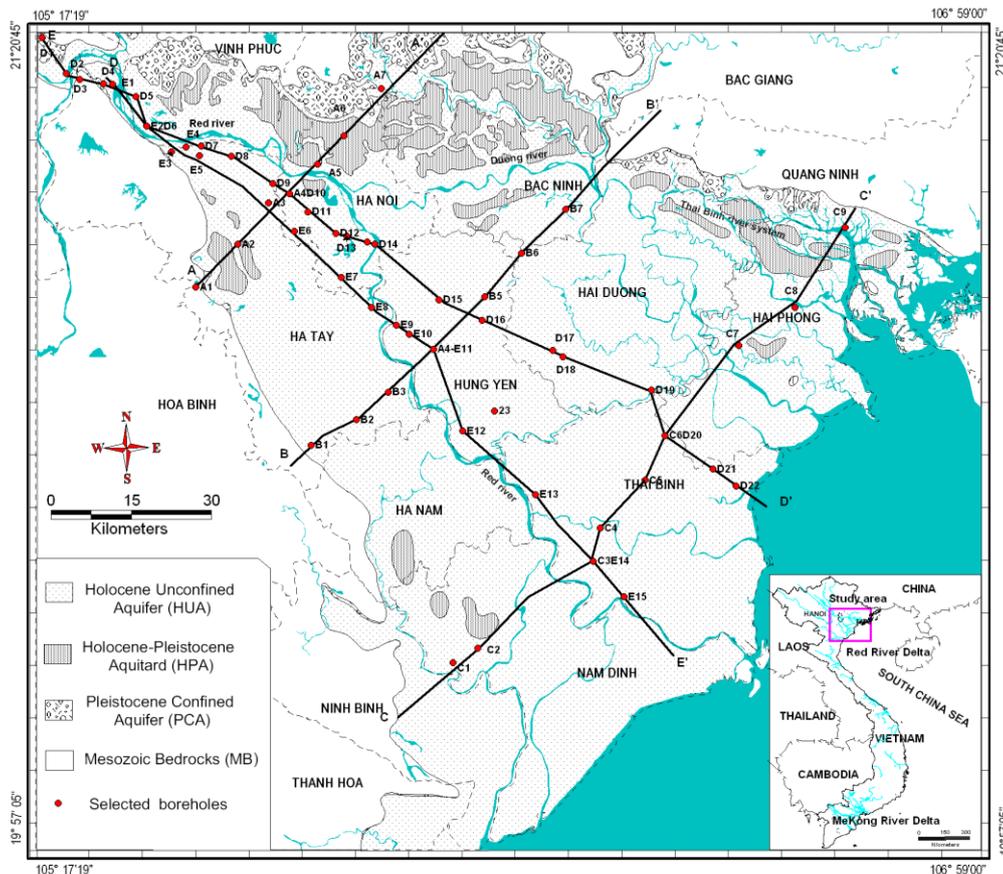


図 2-2 紅河デルタにおける地表面地層図

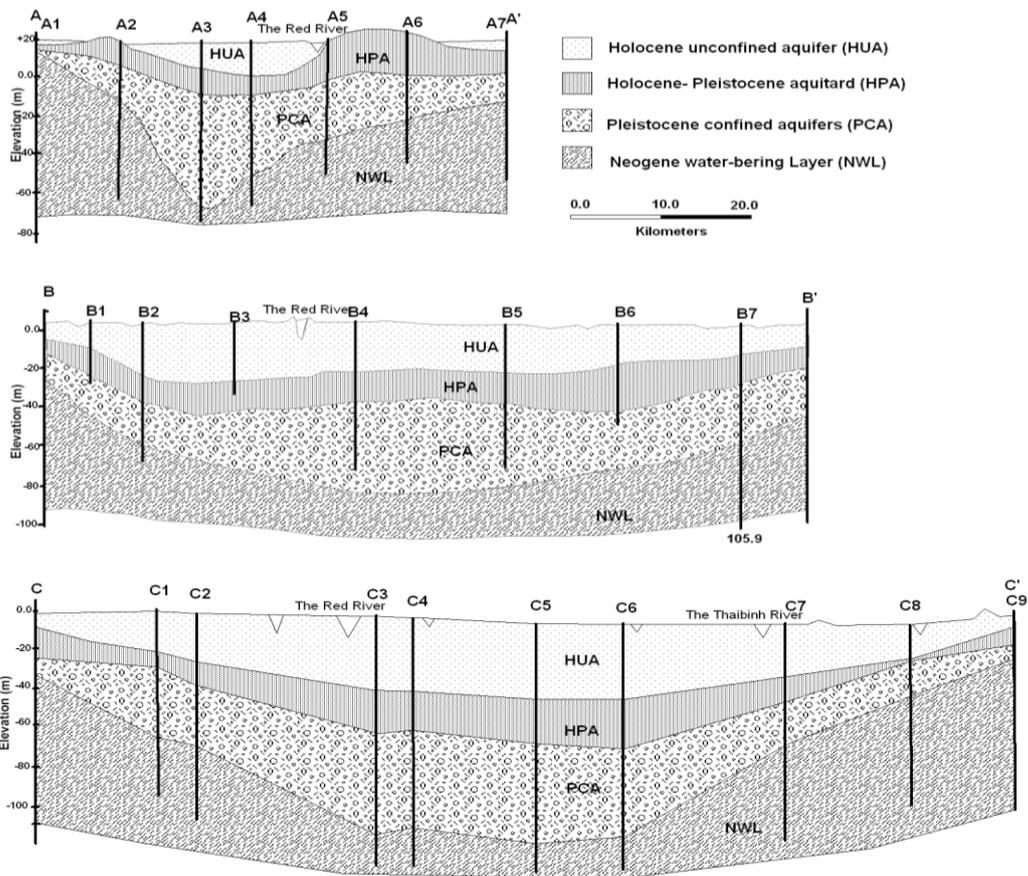


図 2-3 紅河デルタにおける地層横断

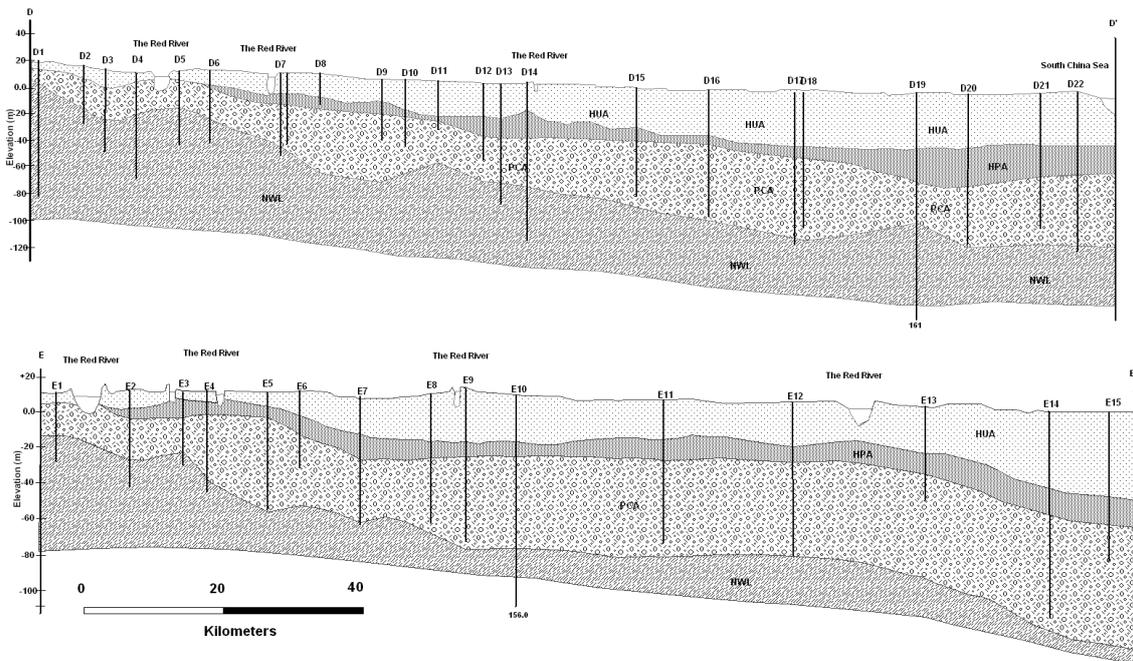


図 2-4 紅河デルタにおける地層縦断面

表2-1は紅河デルタの帯水層構造の分類を示している²⁾。不圧帯水層はシルト質粘土と砂利を含む様々な砂で構成されている。不圧帯水層の厚さは0～60 m，平均で15mの厚さの層である。また，透水量係数 (T) は10～2,123 m³/dayであり，地下水として高い潜在性があることが分かる。一方，被圧帯水層は丸石と小石が混合した砂で構成され，不圧帯水層と比べ深い所に位置している。被圧帯水層の厚さは平均35m，0～80 mの広範囲にわたって変動しており，図2-4から紅河デルタの北部から南部にかけて徐々に厚さが増加している事が分かる。透水量係数は1～6,720 m³/dayであり，不圧帯水層同様に地下水として高い潜在性を秘めている事を示している。

比容量(q)
総溶解性蒸発残留物 (TDS)
透水量係数(T)
貯留係数(S)
地層の厚さ(y)

表 2-1 紅河デルタの帯水層構造の分類

Aquifer system	Geological Ages	Hydrogeological conditions	Depth to the layer's top (m)	Thickness (m)	q (L/s/m)	TDS(g/L)	T (m ² /day)	Sy/S	Materials	Groundwater potential	Groundwater Storage capacity, billion m ³
HUA	Holocene	Unconfined aquifer	0	0-60	0.3-20.87	0.02-19.83	10-2,123	0.09-0.1	Clay slurry, sandy dust, and gray sand	High potential	10
HPA	Holocene-Pleistocene	Aquitard	0-60	0-40	No data	No data	No data	No data	Silty clay, clay sand, clay	No potentials	No data
PCA	Pleistocene	Confined aquifer	0-70	0-80	0.04-71	0.01-23.39	1-6,720	0.00004 - 0.066	Medium-coarse sands, gravel, cobble	Highest potential	13
NWL	Neogene	Discontinuous aquifer	0-100	0-1,000	0.1-15.1	0.1-12.2	1-3,724	No data	Cemented gravel, cemented clay, arkosic sand-stone, argillite, and clay carbon	Medium potential	No data
MFZ	Mesozoic	Fractured zones	No data	No data	0.12-6.15	0.15-0.293	64 - 305	No data	Sandstone and porphyry	Low potential	No data

第3章

使用データの概要とデータ補間

第3章 使用データの概要とデータ補間

3-1 国家水文地質データベースプロジェクトの概要

紅河デルタ流域においては前述の通り、地下水資源を持続的に管理することが求められている。しかしながら、地下水の地下水質の基礎特性の評価には大量の地下水質データが不可欠であるにもかかわらず、ベトナムでは地下水質データが不足しており、地下水資源を持続的に管理するための地下水質に関する基礎的研究を実施しにくい状況になっていた。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、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。また、様々な観測井から集められたこれらの地下水質データは、データ形式・品質およびストレージメディアに大きな違いがあった。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、1993年以降のデータがデータベース化された³⁾。これらの地下水質データは、地下水質の解析に重要な役割を果たしているにもかかわらず、まだ一般に公開されておらず、国家水文地質データベースプロジェクトの実施に関与している人々しか利用できない状態である。このプロジェクトとデータベースの詳細については、国水文地質データベースプロジェクトの報告書(2004)に記載されている。

3-2 観測地点の詳細

図 3-1 は、本研究で用いた紅河デルタにおける不圧および被圧地下水を対象とする地下水観測点の位置を示している。なお図 3-1 に示すとおり観測点 1~31 は不圧および被圧観測井、観測点 32~52 は被圧観測井、観測点 53~68 は不圧観測井の観測が行われている。また、本研究では不圧・被圧地下水の空間特性の解明のため、図 3-1 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的に紅河デルタを上流域（観測井 1~15, 32~50, 53~57）、中流域（観測井 16~24, 51~52, 58~64）、下流域（観測井 25~31, 65~68）の 3 つの地域に分割した。

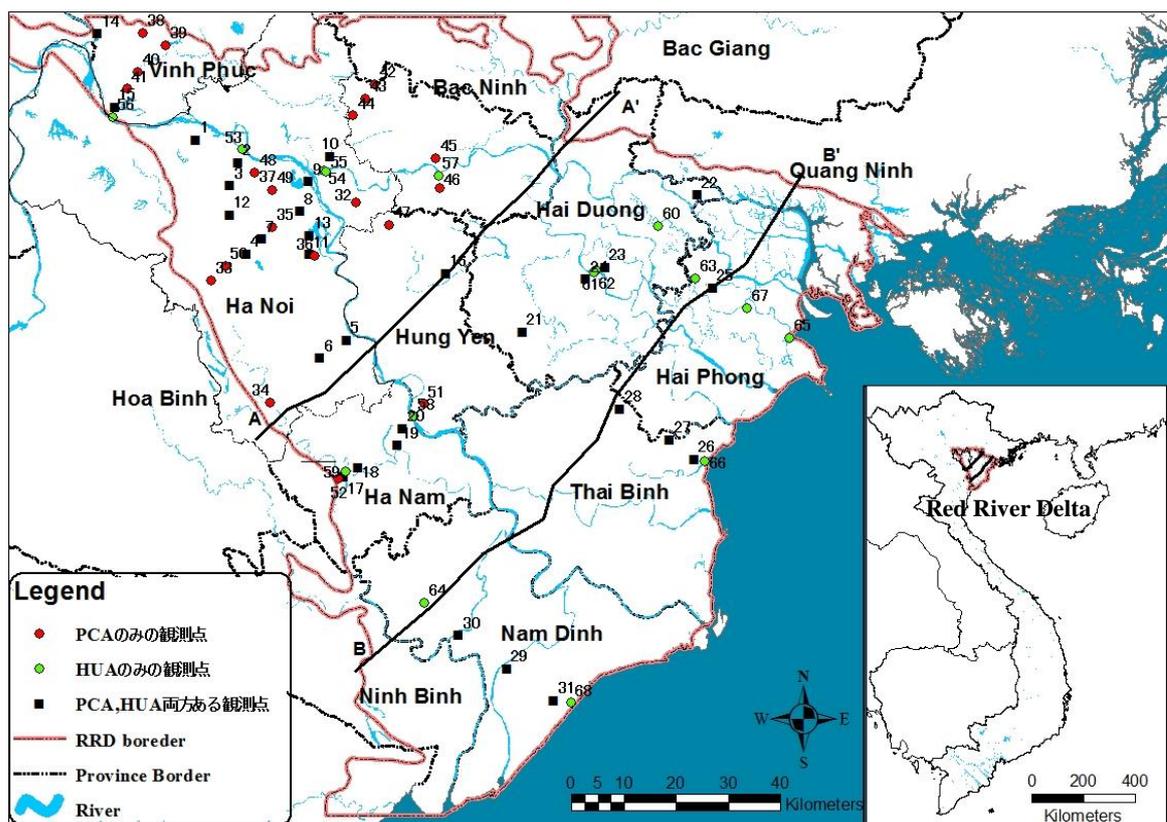


図 3-1 紅河デルタにおける観測点位置

3-3 使用データの概要

本研究の入力データとして使用するイオンデータは陽イオン (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) , 陰イオン (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-}) の8つのイオンデータとした。これらのイオンは地下水質のイオン特性を把握するために非常に重要であり、代表的な手法であるパイパーダイアグラムにも用いられるパラメータである⁴⁾。

本研究における使用データは、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た地下水質データであり、不圧・被圧地下水における1993年～2011年の19年間分を保有している。また本データは、各年ごとに2月（乾季）と8月（雨季）の2回、観測が行われている。国家水文地質データベースプロジェクトから得られた地下水質データから、pH、4つの陽イオン (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) , 3つの陰イオン (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) の8つのパラメータを使用した。また、炭酸イオン (CO_3^{2-}) の値は、観測されたpHおよび炭酸水素イオン (HCO_3^-) 用いて以下の式から算出した¹⁾。

$$[\text{CO}_3^{2-}] = \frac{10^{-10.33} \times [\text{HCO}_3^-]}{10^{\text{pH}}} \quad (3-1)$$

$[\text{CO}_3^{2-}]$: 水中に含まれる炭酸イオン濃度 (mmol/L)

$[\text{HCO}_3^-]$: 水中に含まれる炭酸水素イオン濃度 (mmol/L)

pH : 水中の pH の値

なお、使用するイオンデータの単位は [mg/L] とし、炭酸水素イオン (HCO_3^-) に関しては分子量 (60.01) を掛けた値を使用した。

3-3 データの補間

(a) 欠測データ状況およびデータの補間方法

表 3-1～表 3-4 に国家水文地質データベースプロジェクトから得られた、被圧地下水および不圧地下水における観測データの状況を示している。なお、観測データの状況の対象としたパラメータは国家水文地質データベースプロジェクトから得られた地下水質データから、pH、4つの陽イオン (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) , 3つの陰イオン (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) の8つである。表 3-1～表 3-4 から観測データは主に古いデータほど観測データが少なくなっており、また、特定のイオンに対して欠測が多いことが確認できる。このことから、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地下水質データでは、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あることが示唆される。そこで、経年変動の観点から解析を行うためにデータの補間を行う事とした。補間方法は、以下に示す。

- (1) 各観測点における各季節ごとの8つのパラメータの時系列を基に、欠測前後のデータから線形補間を行う。
- (2) 観測点のデータが8つ全て欠測である場合で欠測前後1年のデータもまた8つ全て欠測である時 (1993年, 2011年で欠測または、ある観測点で2年連続で8つ全て欠測) は、補間を行わず欠測扱いとする。

表 3-1 被圧地下水 (PCA) における乾季 (2月) の観測データ状況

PCA (乾季) 井番号	観測年																	データ有 欠測		データ有 欠測 一部欠測			
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	○	×	○	×
1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	○	×	○	×
2	△(K,S04)	○	○	○	○	○	○	△(S04)	○	○	○	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△(S04)
3	△(S04)	○	○	○	○	○	○	△(S04)	△(S04)	○	○	○	△(S04)	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	○
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	○
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	○
7	△(S04)	△(S04)	○	○	○	△(S04)	○	△(S04)	○	○	○	○	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△(S04)
8	○	○	○	○	○	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
9	△(S04)	○	○	○	○	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10	○	○	○	○	○	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11	○	△(S04)	△(S04)	○	x	△(K)	△(K,S04)	△(K,S04)	△(K,S04)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
12	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
13	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
14	○	○	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
16	○	○	○	△(HG03)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
17	△(K)	△(K,S04)	△(K,S04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○
18	△(K)	△(K,S04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○
19	△(K)	○	x	△(K)	x	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
20	△(K,S04)	△(K)	△(K,S04)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
21	○	○	x	○	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
22	x	x	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○
23	x	x	x	△(K,S04)	△(K,S04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○
24	x	x	x	△(K,S04)	△(K,S04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○
25	x	○	○	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
26	△(K,S04)	△(K,S04)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
27	○	△(HG03)	△(HG03,S04)	△(S04)	△(K,H003,S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
28	○	○	○	x	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
29	x	x	○	△(S04)	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
30	x	x	△(S04)	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
31	x	x	△(S04)	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
32	○	△(S04)	○	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
33	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	○
34	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	○
35	△(S04)	○	○	△(S04)	△(S04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○
36	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
37	△(K,S04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K,S04)	△(K,S04)	△(K,S04)	△(K,S04)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
38	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
39	△(S04)	○	x	○	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
40	○	△(S04)	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
41	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
42	△(K,S04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○
43	○	△(S04)	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
44	○	△(HG03)	△(HG03)	△(HG03)	△(HG03)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
45	○	△(S04)	○	○	△(K)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
46	△(S04)	△(S04)	○	△(S04)	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
47	○	△(S04)	○	x	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
48	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
49	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
50	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	○
51	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
52	○	x	○	△(S04)	△(S04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

表 3-3 不圧地下水 (HUA) における乾季 (2月) の観測データ状況

HUA (乾季) 井番号	観測年																	データ有				
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	○	データ有 x 欠測 △(欠測データ)	
1	O	O	△(S04)	O	O	△(S04)	O	△(S04)	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
2	△(K.S04)	△(K)	△(K)	△(K.S04)	△(K)	△(K)	△(K.S04)	△(K.S04)	O	O	O	△(S04)	O	O	O	O	△(S04)	O	O	O	O	O
3	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K.S04)	△(K)	△(K)	△(K)	x	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
4	x	x	△(O&K)	△(K)	△(K.S04)	△(K)	△(K.S04)	x	x	x	x	△(S04)	△(S04)	O	O	△(S04)	△(S04)	O	O	O	O	O
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	△(S04)
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	O
7	△(K)	△(K.S04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K.S04)	△(K)	△(K.S04)	△(S04)	O	O	△(S04)	△(S04)	O	O	△(S04)	O	△(S04)	O	O	O	O
8	△(S04)	O	x	O	△(K.S04.01)	△(K)	△(K)	△(K.S04)	O	O	O	O	O	△(S04)	O	O	△(S04)	O	O	O	O	O
9	△(K.S04)	O	O	O	△(K)	△(K.S04)	△(K)	△(K)	△(S04)	O	O	△(S04)	O	O	O	O	O	O	O	O	O	△(S04)
10	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K.S04)	△(K.S04)	△(K.S04)	O	O	O	△(S04)	O	O	O	△(S04)	O	O	O	O	O	O
11	x	△(K.S04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	x	△(K.S04)	△(S04)	O	O	△(S04)	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
12	△(S04)	O	O	O	△(K)	△(K)	△(K)	△(K.S04)	O	O	O	O	x	x	x	x	O	O	x	O	O	O
13	O	△(S04)	O	O	△(K.S04)	△(K.S04)	△(K.S04)	△(K.S04)	O	x	O	O	O	O	△(S04)	O	O	O	△(S04)	O	O	△(S04)
14	△(K)	△(K)	△(K.01)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
15	△(K.S04)	△(K.S04)	△(K)	△(K)	△(K.S04)	x	△(K)	△(K)	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
16	O	△(H03)	O	O	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
17	O	O	△(S04)	O	△(S04)	O	O	△(K)	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
18	O	O	O	O	△(S04)	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
19	△(K)	O	x	△(S04)	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
20	O	△(K.S04)	△(S04)	△(S04)	△(S04)	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
21	x	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	
22	△(K)	△(K)	O	△(K)	△(K.S04)	△(K.PH)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	
23	x	x	x	△(K.S04)	△(K.S04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	
24	x	x	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)
25	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)
26	△(K)	△(K.S04)	△(K)	△(K.S04)	△(K.S04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)
27	△(K.H03.S04)	△(K.S04)	△(K)	△(K.H03.S04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)
28	△(K.S04)	△(K)	x	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)
29	x	x	△(K)	△(K.S04)	△(K.S04)	△(K)	△(K)	△(K)	O	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)
30	x	x	O	△(S04)	△(S04)	O	O	O	O	△(pH)	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
31	x	x	△(K.S04)	△(S04)	△(K.S04)	△(K)	△(K)	△(K)	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
53	△(K.S04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K.S04)	△(K)	△(K)	x	△(K.S04)	△(K)	△(K)	△(K.S04)	△(K)	O	O	O	x	x	x	x	x	△(S04)
54	x	x	△(K.PH)	x	△(K)	x	x	△(K.S04)	△(K.S04)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	O
55	x	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	O
56	△(K.S04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	O
57	△(K.S04)	△(K.S04)	△(K)	x	△(K.S04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	O
58	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	O
59	△(S04)	O	△(S04)	△(S04)	△(S04)	O	O	O	x	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
60	x	x	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	O
61	x	x	x	x	△(K.S04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	O
62	x	x	x	△(K)	△(K.S04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	O
63	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	O
64	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K.S04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	O
65	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	O
66	x	O	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	O
67	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	O
68	x	x	△(K)	△(K)	O	△(K)	△(K)	△(K)	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	O

表 3-4 不圧地下水 (HUA) における乾季 (8 月) の観測データ状況

○	データ有
x	欠測
△(欠測データ)	一部欠測

HUA (雨季) 井番号	観測年																			
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
1	△(s04)	△(s04)	○	○	○	△(s04)	△(s04)	○	△(s04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2	○	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K,s04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△(s04)	○	△(s04)
3	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4	x	x	○	△(K)	△(K,s04)	x	△(K,s04)	△(K)	△(K)	○	△(s04)	○	x	○	x	x	△(s04)	○	△(s04)	
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	△(s04)	○	△(s04)	
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	△(s04)	○	△(s04)	
7	△(K)	○	△(K)	△(K)	△(K)	△(K,s04)	△(K,s04)	△(K,s04)	△(K,s04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
8	△(K,s04)	△(s04)	△(s04)	△(K)	x	△(K)	△(K)	x	△(K)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
9	△(K)	△(s04)	○	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K,s04)	○	○	○	○	○	○	○	○	△(pH)	○	△(s04)	○
10	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K,s04)	△(K)	△(K)	△(K,s04)	△(s04)	△(s04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11	x	○	△(K)	△(K)	△(K)	△(K,s04)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
12	△(s04)	○	○	△(K)	△(K,s04)	△(K,s04)	△(K,s04)	△(K)	○	○	x	○	x	○	x	x	△(pH)	x	○	○
13	△(s04)	○	○	△(K,s04)	△(K,s04)	△(K,s04)	△(K)	△(K,s04)	○	○	○	○	○	△(s04)	○	○	○	△(s04)	○	○
14	△(K)	△(K)	△(K,s04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
15	△(K)	△(K)	○	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
16	○	○	○	○	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
17	△(s04)	○	○	○	△(s04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
18	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
19	△(K,s04)	△(K)	x	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
20	△(K)	△(K)	○	○	△(s04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
21	x	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○
22	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○
23	x	x	△(K)	△(K,s04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K,pH)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○
24	x	x	△(K)	△(K,s04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○
25	△(K)	△(K)	△(K,s04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
26	△(K)	△(K,s04)	△(K,s04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○						
27	△(K,s04)	△(H009,s04)	△(K,H009)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○						
28	△(K)	△(K)	△(K)	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
29	x	△(s04)	△(K)	△(K)	△(K,s04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○
30	x	○	○	○	△(s04)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
31	x	○	△(K)	△(K)	△(K,s04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
53	○	△(K)	△(K,s04)	△(K,s04)	△(K)	△(K,s04)	△(K)	△(K,s04)	△(K,s04)	△(K,s04)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	△(s04)	x	○	○
54	△(K,s04)	x	△(K)	○	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	x	○	○
55	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○
56	△(K)	△(K)	△(K,s04)	△(K)	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	x	○	○	○	○	○	○
57	△(K,s04)	△(K,s04)	△(K)	△(K,s04)	△(K,s04)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○
58	○	△(K)	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○						
59	○	○	△(K)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
60	x	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	x	○	○	○	○	○	○
61	x	x	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	x	x	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○
62	x	x	x	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	x	x	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○
63	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○
64	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○
65	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○
66	x	○	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○
67	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	○	○	○	○	○	○	○
68	x	○	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	△(K)	x	○	○	○	○	○	○

(b) データ補間前後の使用可能データ

図 3-2, 図 3-3 に被圧地下水および不圧地下水における補間前後の各年の観測データ数のグラフ示す。図 3-2, 図 3-3 から欠測値の補間により欠測値を大幅に減らすことが確認できる。

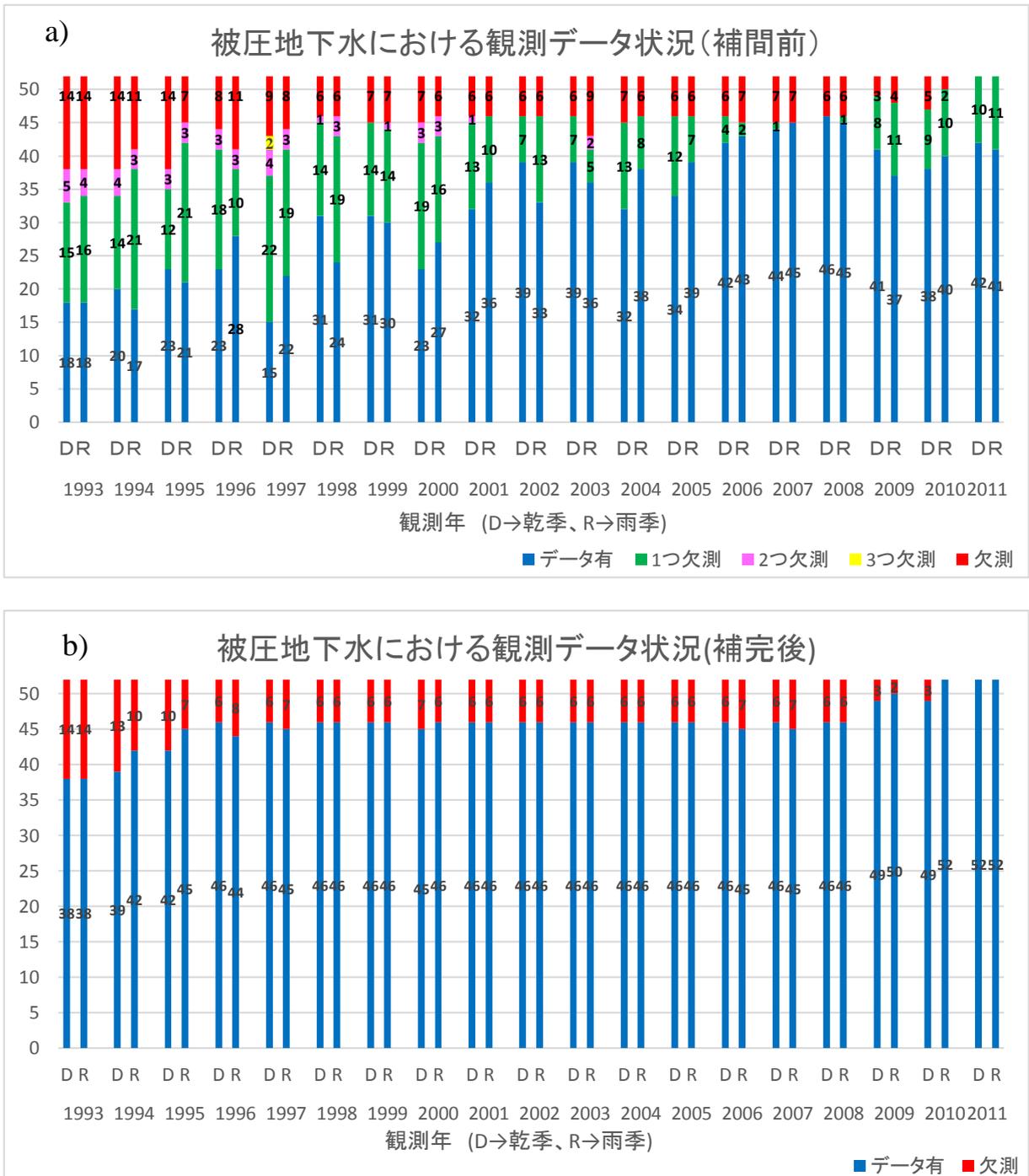


図 3-2 紅河デルタにおける被圧地下水の観測データ状況
(a : 補間前, b : 補間後)

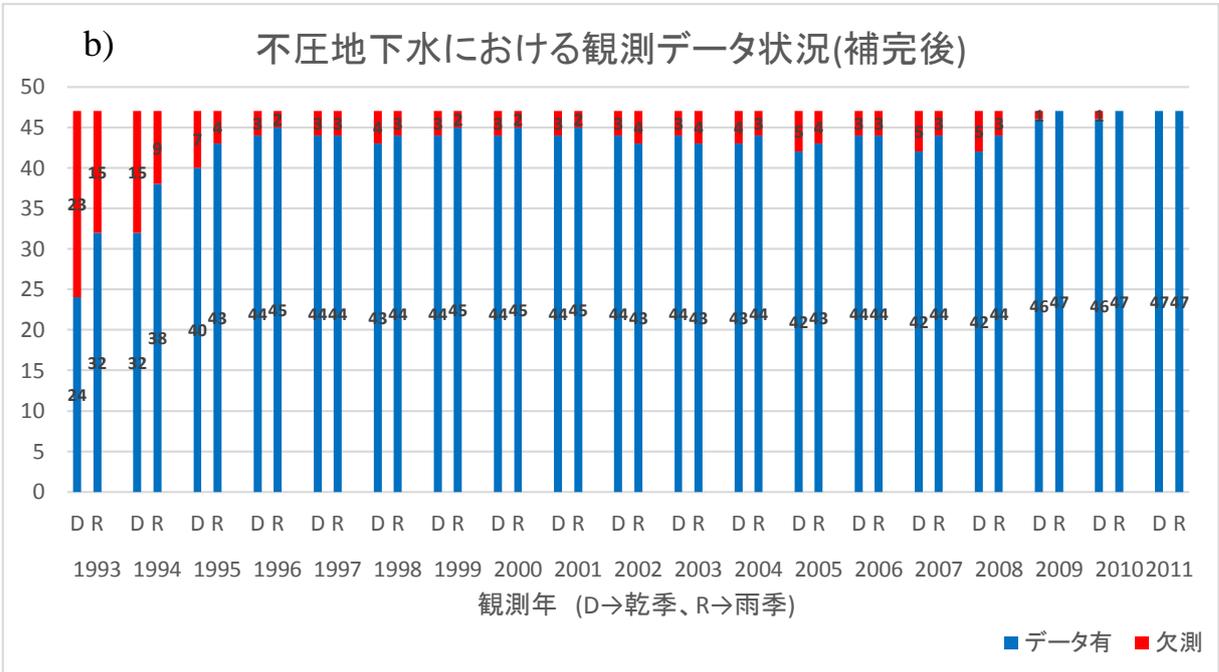
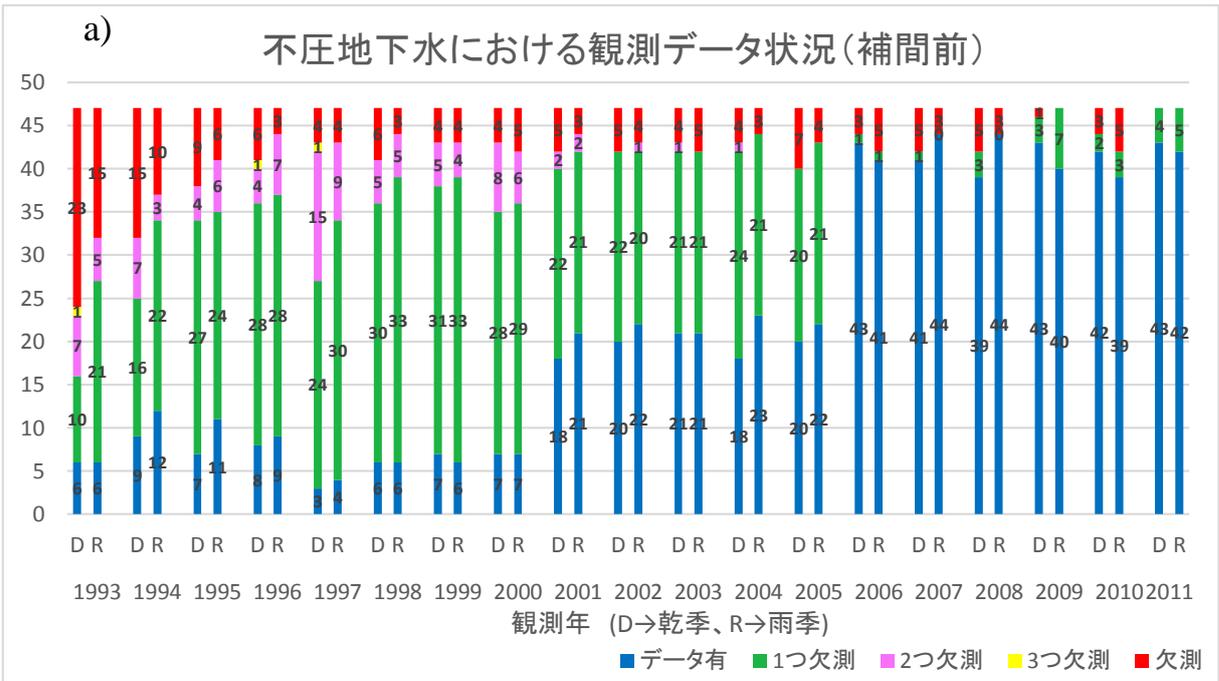


図 3-3 紅河デルタにおける不圧地下水の観測データ状況
(a: 補間前, b: 補間後)

第4章

自己組織化マップについて

第4章 自己組織化マップについて

4-1 自己組織化マップの概要

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、フィンランドの情報処理研究者の Kohonen(1982)により提案された分類手法である³⁾。SOM は多次元データを二次元平面上 (マップ) に分類できることにより、より客観的かつ可視的に表現することが出来る分類手法である。

4-2 自己組織化マップのアルゴリズム

図 4-1 に SOM マップのノード配列の例を示す。SOM は一般的に入力層と出力層の 2 層構造となっており、入力層には入力ベクトル $X(j)$ ($j=1\sim n, n$:入力データ数) (分類したい入力データ)、出力層は複数のノードにより構成されている。このノードには参照ベクトル $R(k)$ ($k=1\sim m, m$:全ノード数) と呼ばれる入力ベクトルと同次元の多次元ベクトルが配置されている。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が入力ベクトルのパターンに漸近するような形で学習する。学習により得られた参照ベクトルは、互いの距離に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。学習を終えた後、全入力ベクトルは各参照ベクトルと比較し、ユークリッド距離が最小になるものに分類される。

本研究で用いた SOM プログラムは Vesanto らが作成した Matlab の SOMtoolbox を基に作成

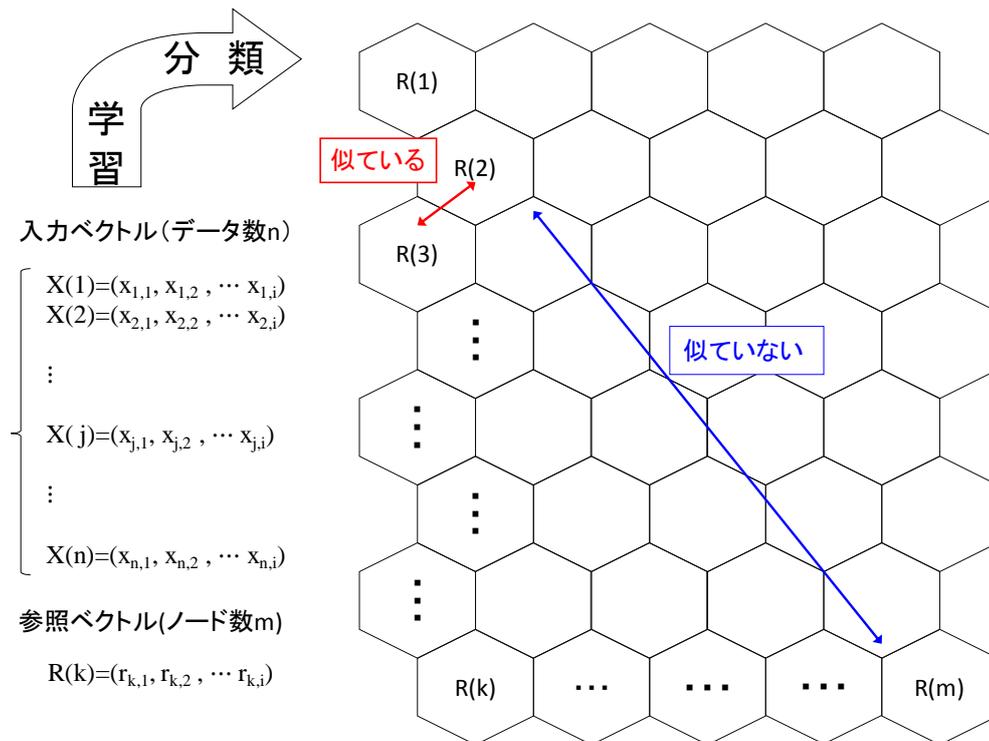


図 4-1 SOM ノード配列例

した⁵⁾。図 4-2 に本研究で用いた自己組織化マップのフローチャートを示し、以降このフローチャートに基づき概要を記す。

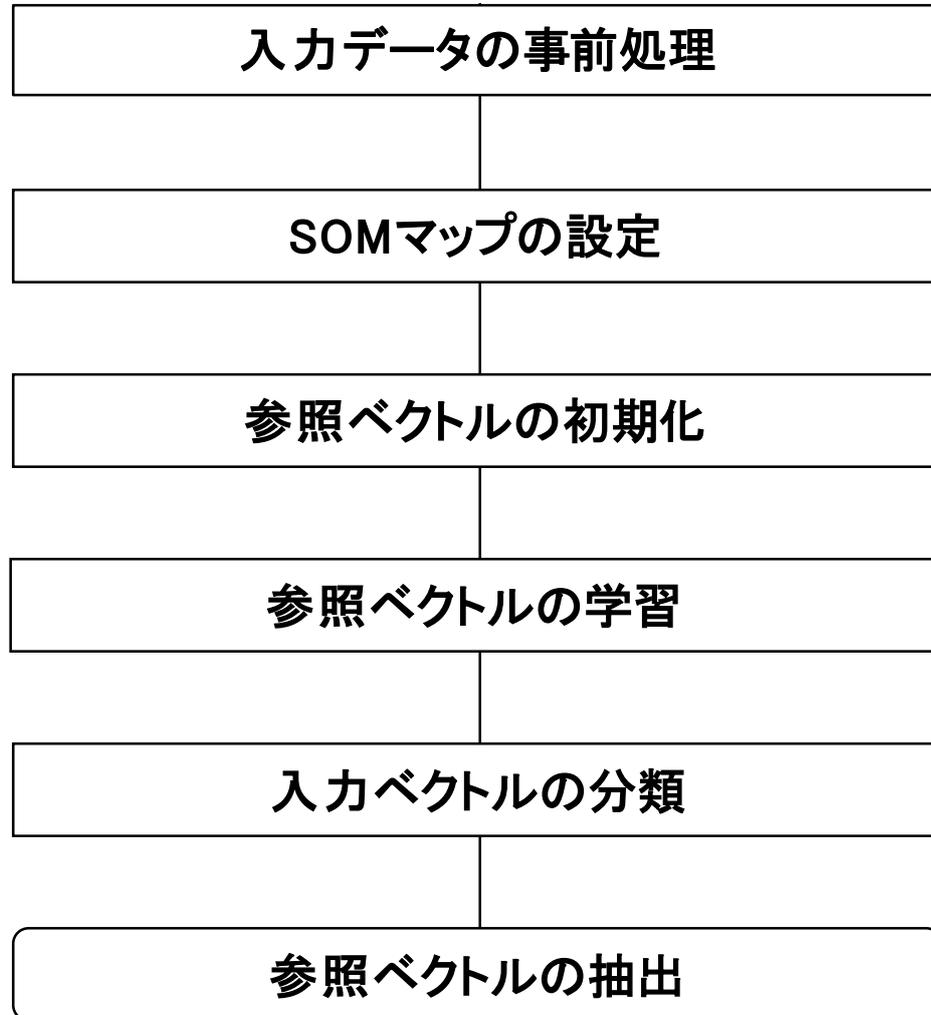


図 4-2 SOM アルゴリズムの計算フロー

(1) データ入力

図 4-3 に入力データ例を示す。入力データの形式はテキストファイル形式で作成しており、1 行目は入力データの次元数、2 行目に本研究で使用する凡例、3 行目以降に数値データを入れている。なお形式上、2 行目の凡例は入力データ番号、各イオンデータの順であり、3 行目以降に数値データは各イオンデータ、入力データ番号の順に並んでいる。入力データの設定に関しては、第 5 章 1 節にて詳細を記す。

1	8								
2	#n	Ca	Mg	Na	K	HCO3	SO4	Cl	CO3
3	71.14	21.89	10	3	390.53	16.81	10.64	0.483445679	1-'11D'
4	40.08	12.16	24.25	2.9	268.49	1.8	11.52	0.117929212	2-'11D'
5	43.09	26.14	19.5	3.6	320.36	4.8	24.82	2.335240246	3-'11D'
6	96.2	18.24	21.5	1.78	433.24	2.4	35.45	0.203902161	4-'11D'
7	55.11	33.44	30	3.95	381.38	3.36	37.22	0.0783522	5-'11D'
8	55.18	41.91	299.5	8.9	479.01	45.63	467.94	0.620923164	6-'11D'
9	85.17	31.01	48.5	1.6	814.62	12.01	23.93	0.392327138	7-'11D'
10	44.09	19.45	39.5	2.35	295.95	2.4	62.92	0.247691798	8-'11D'
11	33.32	10.18	4	1.25	167.81	1.6	7.09	0.104114476	9-'11D'
12	38.08	10.33	10	3.75	210.52	4.2	8.86	0.031331894	10-'11D'
13	41.08	17.03	61	3.8	500.36	21.61	18.61	1.207746717	11-'11D'
14	32.06	13.74	11.5	1.35	204.42	2.4	9.75	0.042975077	12-'11D'
15	24.65	14.23	28.25	4.7	265.44	2.4	12.94	0.969749692	13-'11D'
16	20.79	5.87	8.25	3.8	146.45	6	10.64	0.028079066	14-'11D'
17	103.21	22.49	8.6	1.45	463.75	0	7.09	0.322832467	15-'11D'
18	74.15	71.13	165	11.9	146.45	456.29	186.11	0.13439486	16-'11D'
19	92.69	53.2	160	5.3	250.18	12.01	475.03	0.129105835	17-'11D'
20	205.4	106.41	687.5	7.85	405.78	12	1637.8	1.073949647	18-'11D'
21	77.15	31.62	51	6.1	433.24	4.8	67.36	0.890065216	19-'11D'

図 4-3 入力データ例

(2) 入力データの事前処理

本研究では、入力データの特徴を適切に反映させるため、SOM による計算を行う前に、事前処理を行った。事前処理方法として、下記の式 4-1 に示す方法により、入力データの範囲を [0,1] に収まるように設定した。ここで x_{ji} は基準化後の入力データ、 $x_{j,i}$ は基準化前の入力データであり、 j 番目のデータの i 次元を示しており、 $\min(x_i)$ は i 次元におけるデータの最小値、 $\max(x_i)$ は i 次元におけるデータの最大値となっている。

$$x_{ji} = \frac{x_{j,i} - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (4-1)$$

(3) SOM マップの設定

SOM マップの設定では、SOM の全ノード数の決定と SOM マップの縦横比の設定を行っている。SOM の全ノード数 M は、全入力データ数 n を用い、式 4-2 により算出される^{6,7)}。

$$M = 5\sqrt{n} \quad (4-2)$$

なお、得られた全ノード数 M の小数部分に関しては切り上げを行い整数としている。

次に SOM マップの縦横比の設定を行う。SOM マップを設定する際には、全ノード数を適切に設定するだけでなく、図 4-4 に示す SOM マップ縦横比 (n_1/n_2) も適切に設定する必要がある。本研究においては、既往研究より、式 4-3 を用いて導出した^{6,7)}。

$$\frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{e_1}{e_2}} \quad (4-3)$$

ここで n_1 は縦のノード数、 n_2 は横のノード数を示しており、 e_n は全入力データの共分散行列における固有値の第 n 成分を表している。 e_n に関しては、固有値の第 1・2 成分のみを使用している。式 4-2、4-3 を組み合わせることにより、 n_1 、 n_2 は式 4-4、4-5 のように表記できる。

$$n_1 = \sqrt{M \sqrt{\frac{e_1}{e_2}}} \quad (4-4)$$

$$n_2 = \sqrt{M \sqrt{\frac{e_2}{e_1}}} \quad (4-5)$$

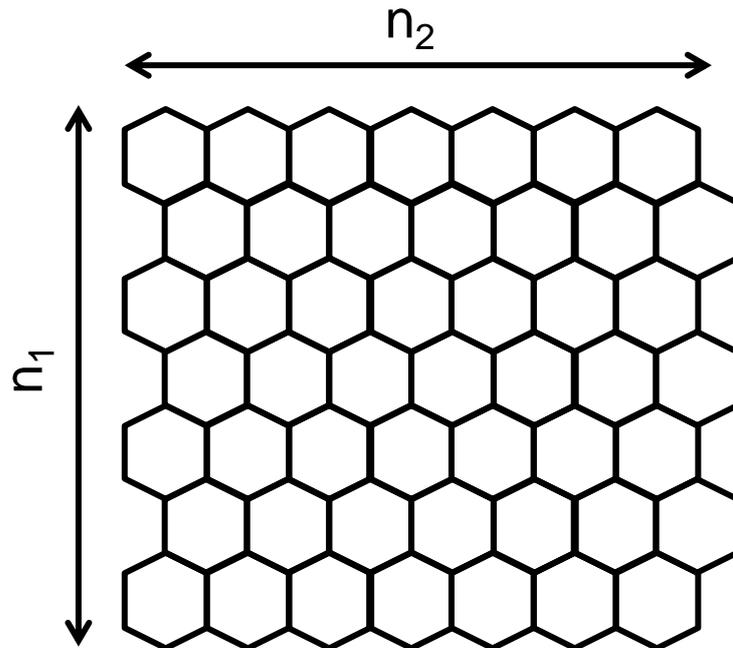


図 4-4 SOM マップの縦横比図

(4) 参照ベクトルの初期化

参照ベクトル $R_{k,i}$ の設定方法として、入力データの特徴を捉えた形で初期化を行うために、既往研究より、式 4-6 を用いて設定した⁸⁾。

$$R_{k,i} = me(i) + V \times Cd \quad (4-6)$$

$me(i)$ は全入力データの平均値であり、各次元ごとに求めている。 V は、全入力データの固有値パラメータであり、 Cd はマップサイズ補正パラメータとなっている。この式より、参照ベクトルは各ノードごとに線形的に導出している。

(5) 参照ベクトルの学習

参照ベクトルの学習方法としては、逐次学習 (on-line learning) と、バッチ学習 (batch learning) に大別される。逐次学習は、学習に使用する入力データが逐次参照ベクトルと比較し更新される学習法であり、次々と新しいデータで学習していく場合に有効である。しかし、入力データの順序などにより、分類結果に影響が出る場合もある。一方、バッチ学習は、一括学習とも呼ばれ、参照ベクトルの学習を行う前に全入力データをマップに反映させた後に、学習を行っていく。本研究では、入力データが追加されないことや、学習による再現性に重視したため、バッチ学習を採用した。以下に、バッチ学習における計算のフローについて記す。

まず、参照ベクトルにおいてボロノイ分割を行い、この分割区分に全入力データを当てはめる。これにより、入力ベクトルは、最も近いノードに配置されることになる。その後、入力ベクトルと各ノードとのユークリッド距離が最小となるノード (勝者ノード) を探査し、式 4-7 を用いて勝者ノードとその近辺の参照ベクトルを更新する⁷⁾。

$$R_i(t+1) = \frac{\sum_{j=1}^n h_{ic}(t)x_j}{\sum_{j=1}^n h_{ic}(t)} \quad (4-7)$$

ここで、 R_i は i 番目のノードの参照ベクトルを意味し、 t は学習ステップ数となる。また、 h_{ic} は近傍関数と呼ばれ、勝者ノードから計算の影響が及ぶノード半径を表し、ガウス関数を採用している。 x_j は入力ベクトルである。 c は入力ベクトルと参照ベクトルのユークリッド距離が最小となる参照ベクトルの番号である。

この参照ベクトルの学習を収束するまで繰り返し行うことにより、入力ベクトルの特徴を捉えた参照ベクトルとなる。

(6) 入力データの分類

参照ベクトルの学習を終えた後に、入力ベクトルの分類を行う。各入力ベクトルはユークリッド距離が最小となる参照ベクトルに分類される。これにより各入力ベクトルは、全ノード数に分類されたことになる。

(7) 参照ベクトルの抽出

分類された入力データの傾向を捉えるために、学習の終わった各参照ベクトルを抽出している。抽出方法としては、各参照ベクトルの下位四分位、中央値、上位四分位を抽出し、全

体的な変動パターン傾向を捉えられるようにした。

4-3 参照ベクトルのクラスタリング

本研究では、分類傾向をより詳細に把握するために、参照ベクトルのクラスタ化を行った。クラスタの最適数として K-means 法を適用した場合の最小 DBI 値(Davies-Bouldin Index)を採用した⁹⁾。K-means 法とは、MacQueen らにより提唱された非階層型クラスタリング手法の一つであり、指定する K の値まで、分割する代表的なクラスタリング手法である。DBI 値は式 4-8 により導出されるクラスタ数の妥当性を示す指標であり、この数値が小さいほど妥当なクラスタ数と言える。

$$DBI = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^c R_i \quad (4-8)$$

最小の DBI 値により最適クラスタ数が決定した後、ウォード法を用いてクラスタ化を行った¹⁰⁾。ウォード法は各クラスタ間の分散が最小となるように結合していく手法であり、結合の進捗に伴いクラスタ内の平方和が増加するため、明瞭なデンドログラム描くことが可能であり、視覚的にクラスタ間の関係性を捉えることが出来る。

第5章

自己組織化マップによる 経年変動パターン解析

第5章 自己組織化マップによるイオン変動パターン解析

5-1 入力データの設定

第3章にて使用データの概要およびデータの補間について述べたが，ここでは，計算に使用した入力データの詳細に関して記す．本研究では，不圧・被圧地下水の経年変動パターンの解析を行うために，第3章にて補間したデータの内，最も最新のデータである2011年，最も古い1993年，そして中間の年にあたる2002年の3年間分を対象として自己組織化マップに適用した．なお自己組織化マップに適用する入力データ数は被圧地下水272（1993年：乾季38，雨季38，2002年：乾季46，雨季46，2011年：乾季52，雨季52），不圧地下水237（1993年：乾季24，雨季32，2002年：乾季44，雨季43，2011年：乾季47，雨季47）とし，入力データの項目は陽イオン（ Ca^{2+} ， Mg^{2+} ， Na^{+} ， K^{+} ），陰イオン（ HCO_3^{-} ， Cl^{-} ， SO_4^{2-} ， CO_3^{2-} ）の8つのイオンデータを用いた．

5-2 被圧地下水の適用結果

ここでは、被圧地下水のイオンデータに SOM を適用した結果を示す。

5-2-1 被圧地下水における自己組織化マップ適用結果

(a) SOM によるイオン特性パターンの分類結果

表5-1は、SOMを適用した被圧地下水イオンデータにおける8つのイオンの相関係数の値を示す。また図5-1に示すSOMマップは、被圧地下水における全8イオンのクラスタリング結果を示し、[0,1]に規準化をした8イオン濃度ごとの参照ベクトルの平面要素を表している。(a)~(h)は、5章1節にて示した入力データの8項目に対応している。このような要素平面を相互に比較することで、パラメータであるイオンの関係性が明らかにできる。

次に、図5-2は前述に示されたSOMマップの特徴をより容易に確認するためk-means法によるクラスタ分類を行った結果を表しており、クラスタ数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、クラスタ数を11とした。図5-3はウォード法による階層図を示しており、11のクラスタの類似関係を示すと共に、それに属するノード番号を示している。図5-4では、SOMマップ上の各クラスタ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。なお、各ノードに分類された入力データ（観測井番号、年、季節）の詳細については、第5章2節2項の表5-2に示す。また表5-2は、各クラスタと全イオンデータにおける、イオン濃度の平均値およびベトナムの飲料水基準値を示しており、分類されたイオンデータの具体的なイオン濃度や飲料水としての適正を把握できる。図5-5は被圧地下水の各クラスタ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7については中央値のみをプロットしている。

表 5-1 被圧地下水における 8 イオンの相関係数

	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
Mg ²⁺	0.917						
Na ⁺	0.839	0.965					
K ⁺	0.593	0.827	0.866				
HCO ₃ ⁻	0.305	0.171	0.044	-0.103			
SO ₄ ²⁻	0.811	0.832	0.888	0.570	0.047		
Cl ⁻	0.852	0.969	0.993	0.878	-0.027	0.867	
CO ₃ ²⁻	-0.145	-0.062	-0.083	-0.101	0.515	-0.144	-0.158

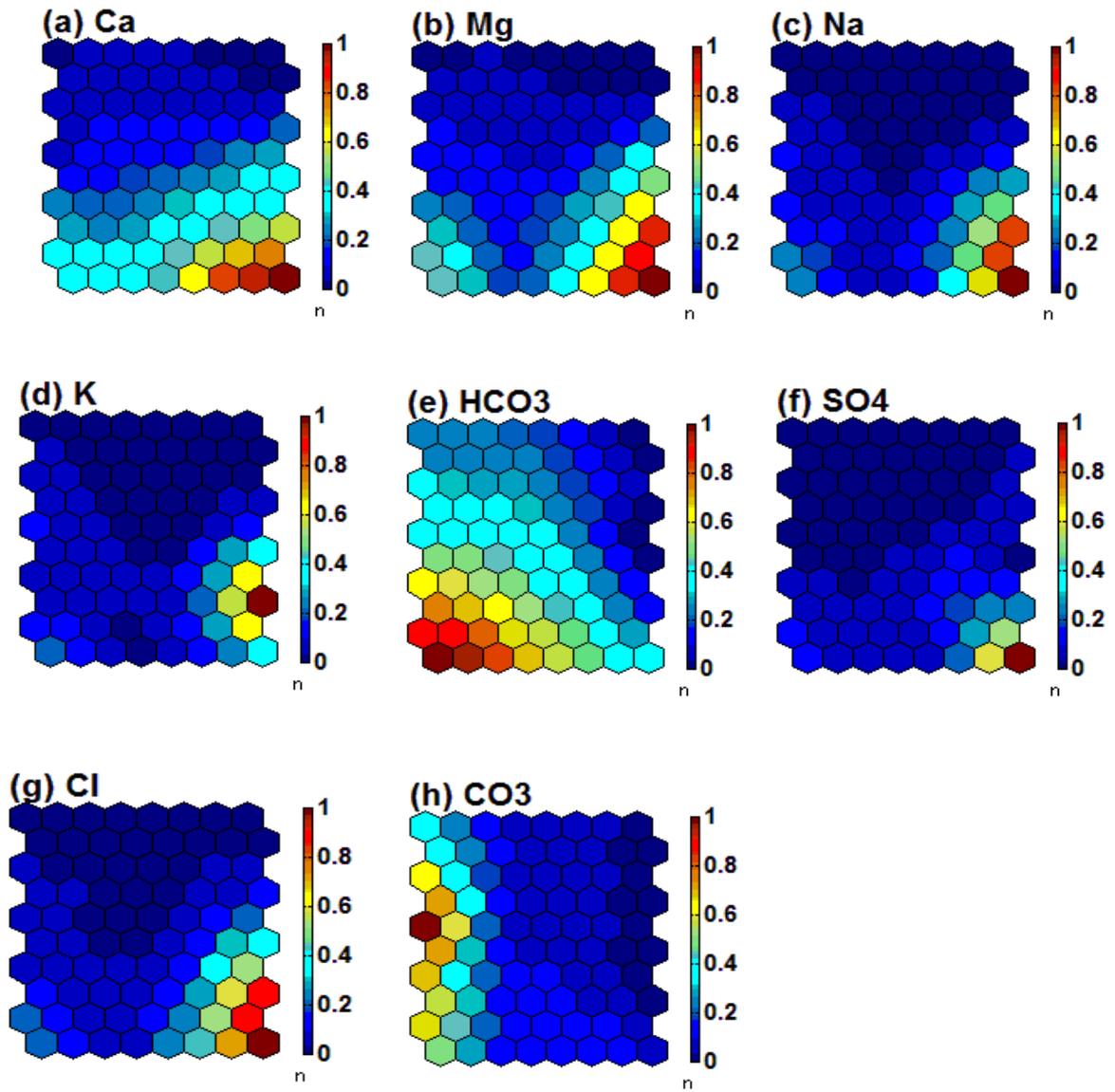


図 5-1 被圧地下水における 8 イオンのクラスタリング結果

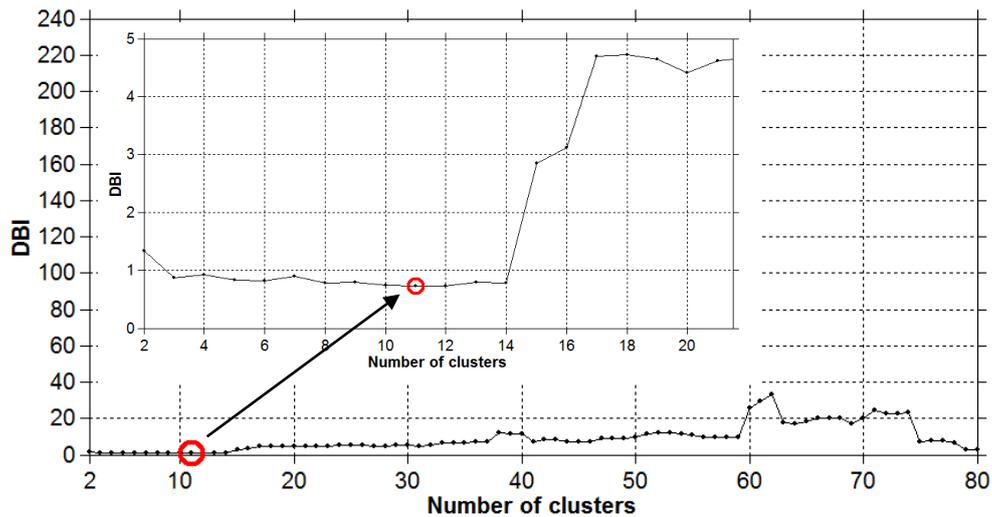


図 5-2 k-means 法による被圧地下水の DBI 値の計算結果

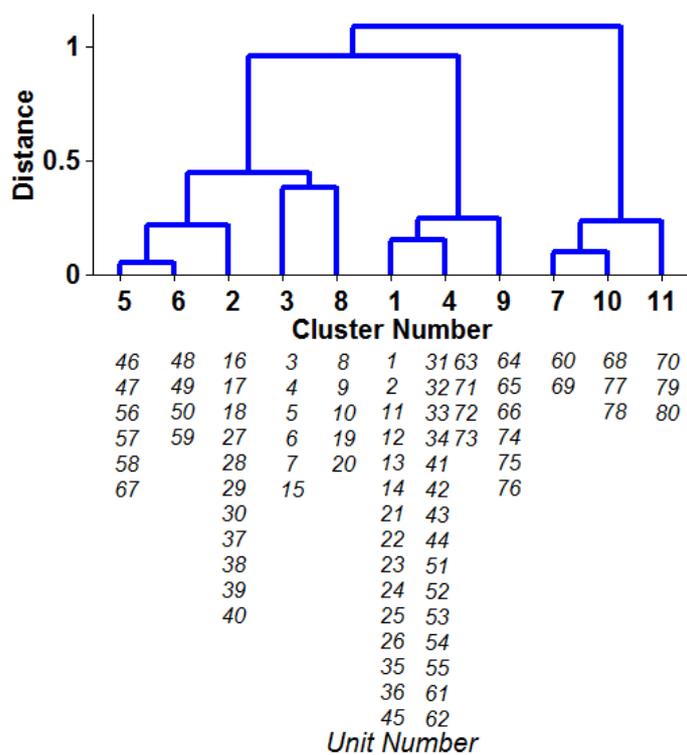


図 5-3 ウォード法による被圧地下水の階層図

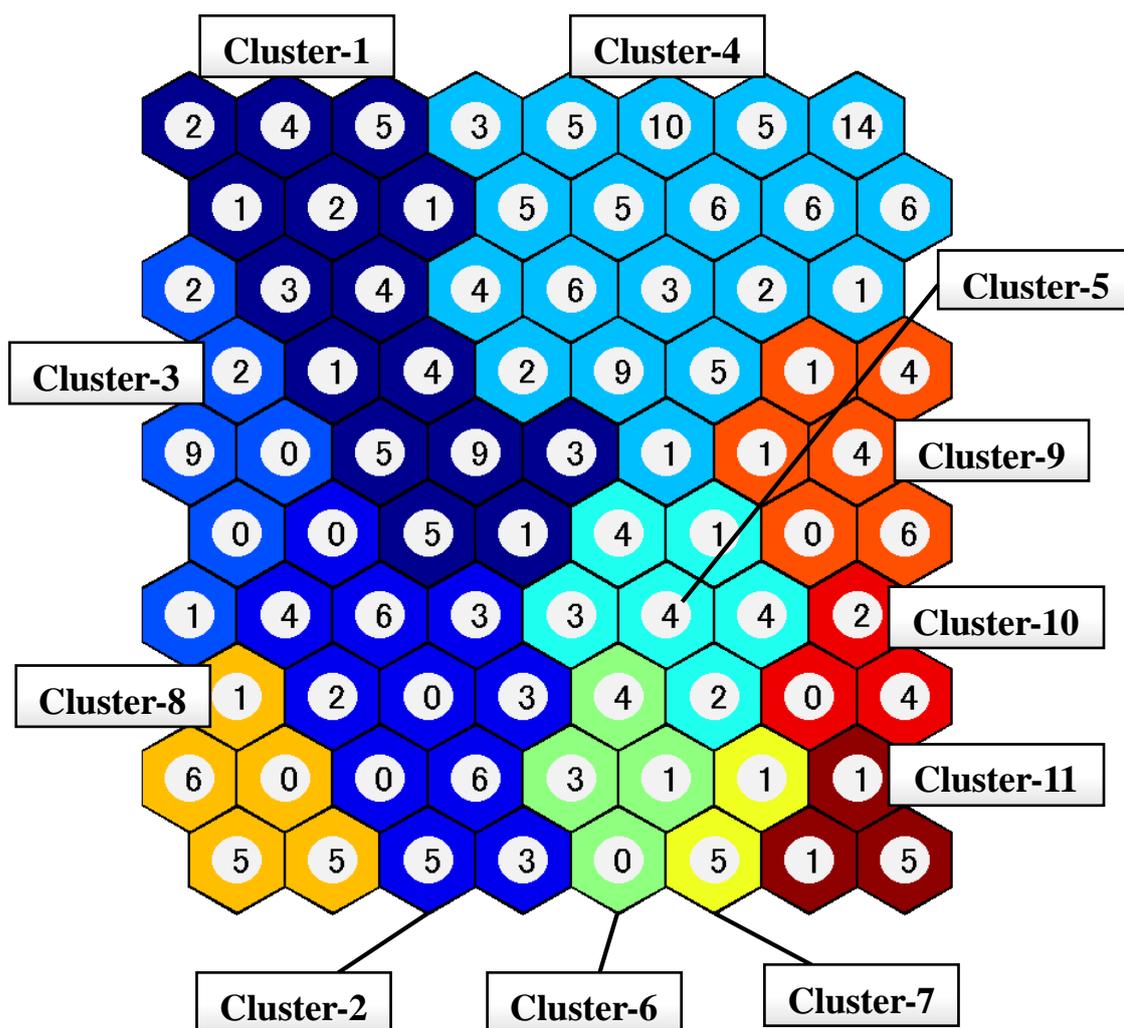


図 5-4 被圧地下水のクラスター分類結果

表 5-2 被圧地下水における各クラスターと全データのイオン濃度の平均値および飲料水基準値

	Ca ²⁺ [mg/L]	Mg ²⁺ [mg/L]	Na ⁺ [mg/L]	K ⁺ [mg/L]	HCO ₃ ⁻ [mg/L]	SO ₄ ²⁻ [mg/L]	Cl ⁻ [mg/L]	CO ₃ ²⁻ [mg/L]
クラスター1	29.15	33.44	92.13	4.15	306.10	16.23	149.31	1.06
クラスター2	99.57	82.56	312.89	7.84	605.57	38.86	531.94	0.90
クラスター3	35.19	65.52	428.50	15.67	409.92	22.20	611.58	3.97
クラスター4	21.12	16.01	32.52	1.78	183.21	11.95	115.08	0.23
クラスター5	107.86	124.81	647.34	19.78	341.88	132.94	1458.81	0.47
クラスター6	171.94	145.19	730.98	12.45	508.94	101.45	1734.83	0.66
クラスター7	257.58	294.54	2095.09	37.19	416.59	271.30	4516.41	0.64
クラスター8	108.58	162.86	920.36	23.29	911.02	81.09	1406.76	2.82
クラスター9	87.87	125.95	582.71	23.77	46.88	41.29	1622.09	0.09
クラスター10	168.27	305.98	2777.94	123.35	143.80	249.80	5602.55	0.13
クラスター11	322.22	418.74	4291.76	78.68	343.35	638.86	8263.05	0.32
全データ平均	58.66	35.98	210.17	5.32	259.83	43.74	380.81	0.50
飲料水基準 (最大値)	-	-	200.00	-	-	250.00	250.00	-

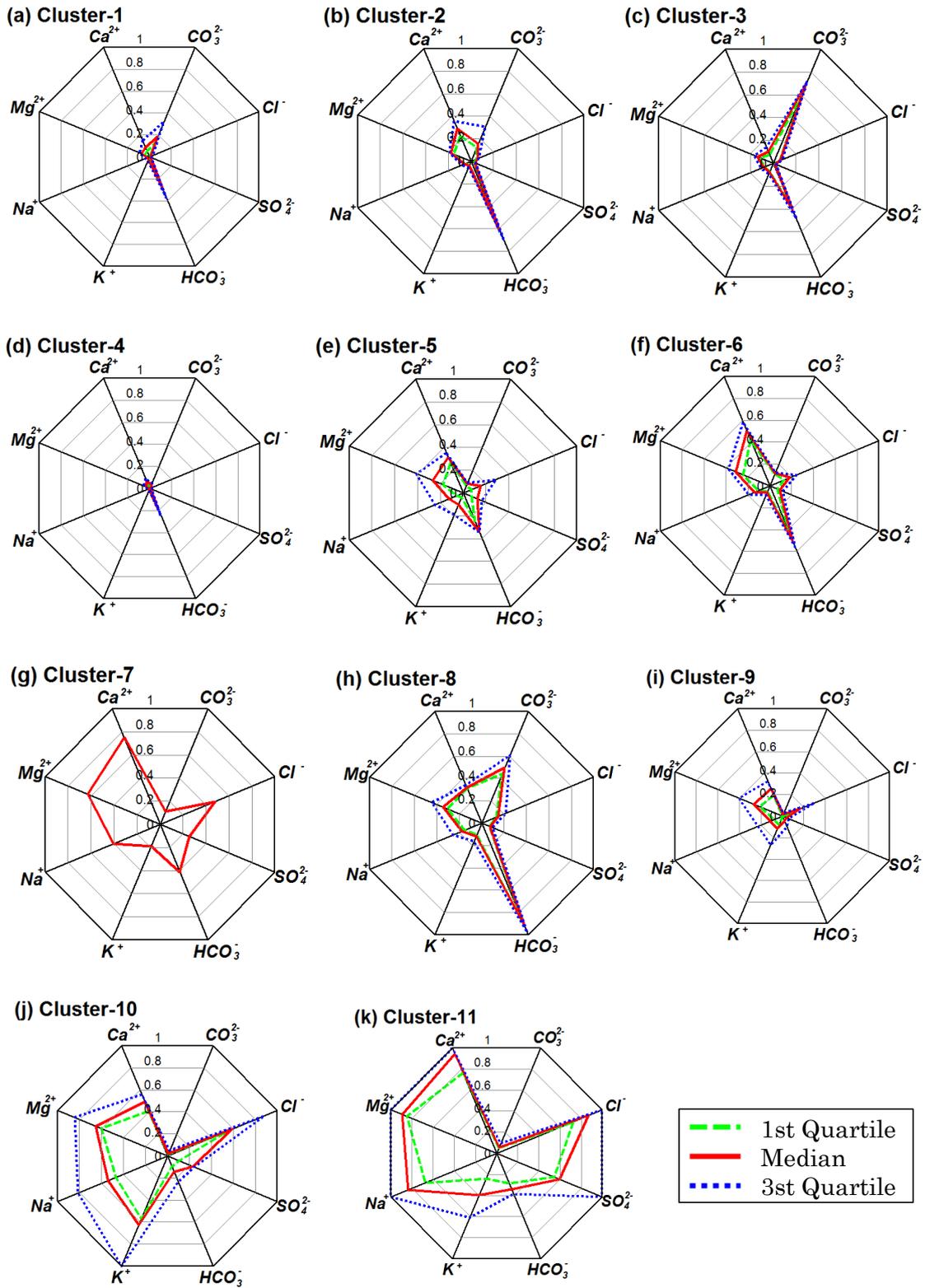


図 5-5 被圧地下水における各クラスターのレーダーチャーター

(b) イオン特性パターンおよび各クラスターのイオン特性について

図 5-1 および表 5-2 から、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ と SO_4^{2-} の 4 つのイオンに着目すると、イオンの濃度分布が類似していることが分かる。また、相関係数の値も高いことから分かり、特に Na^+ と Cl^- の相関係数は 0.993 と非常に高い相関が見て取れる。これより、4 つのイオン(Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-})に正の相関関係があることが分かる。また、 K^+ および Ca^{2+} もそれぞれ、4 つのイオン(Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-})との相関が高いが、 K^+ 、 Ca^{2+} 同士の相関はあまり高くないことが分かる。さらに、 HCO_3^- と CO_3^{2-} に着目すると、他の 6 つのイオン(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^-)とのとはノードパターンが似ておらず、 HCO_3^- と CO_3^{2-} 同士のノードパターンもあまり似ていないことが見て取れる。また、他の 6 つのイオン(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^-)相関係数も低く、 HCO_3^- と CO_3^{2-} 同士の相関係数あまり高くないことから、 HCO_3^- と CO_3^{2-} は、他のイオンとの相関関係がほとんど無いことが分かる。

次に図 5-5 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することができる。これら 3 つの水質タイプの分類は図 5-4 のワード法による階層図からも確認する事ができ、同じ水質タイプに分類されたクラスターは性質が似ていることが確認できる。また、表 5-2 より各クラスターの平均値と飲料水基準を比較してみると、全ての飲料水基準値を満たしているクラスターは淡水タイプに分類したクラスター 1, 4 のみであり、その他の淡水タイプのクラスター 9 や低塩度タイプや高塩度タイプに分類されたクラスターでは飲料水としてそのまま利用するには適さない水質であることが分かる。さらに、全データの平均値についても飲料水基準値を満たしておらず、特に Cl^- の値が基準値を大きく上回っている。そのため、飲料水として利用するにあたり、何らかの処理を行う必要がある観測井が多数あると考えられる。

5-2-2 被圧地下水における経年変動パターン特性

(a) 経年変動パターンの分類

表 5-3 に被圧地下水における 1993 年, 2002 年, 2011 年の 3 年間の乾季・雨季それぞれの水質タイプを分類した表を示す. 分類表の中に示された数字はクラスター番号および SOM ノードマップのノード番号を表している. また, 表の色分けされた箇所は前述の 5-2-1 に示した 3 つの水質タイプ示しており, 青色の部分は淡水タイプ, 黄色は低塩度タイプ, 赤色は高塩度タイプのイオンデータである. 本研究では経年変動パターン特性を把握するために, これら 3 つの水質タイプを経年変動の判断基準とし, 乾季と雨季に分けて経年変動パターンの分類を行った.

表 5-4 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パターンを示す. 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. 表 5-3 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, 下降傾向, 塩度下降後, 上昇傾向)に分類された. また全 46 井の内, 約 80% にあたる 36 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おり, 乾季と雨季における経年変動パターンの変化はあまり見られない事が示唆される.

変動パターンそれぞれを見てみると, 変化なしのパターンが最も多く 27 井で確認され, 内 20 井は乾季・雨季両方で変化が見られなかった. また, 塩度減少傾向パターンの観測井が 12 井(内 20 井は乾季・雨季両方), 塩度上昇傾向パターンの観測井が 9 井(内 5 井は乾季・雨季両方)を示し, 若干ではあるが塩度減少傾向の観測井が多いことが確認できる. さらに, 塩度上昇後減少傾向パターンを示す観測井が 7 井(内 2 井は乾季・雨季両方)あり, これらの観測井では 2002 年前後で水質の悪化が生じていることが考えられる.

表 5-3 被圧地下水における水質タイプ分類表(左：乾季，右：雨季)

井番号	乾季(2月)			井番号	雨季(8月)		
	1993年	2002年	2011年		1993年	2002年	2011年
1			2(37)	1			2(40)
2	2(30)	1(24)	4(34)	2	4(53)	4(33)	1(24)
3	2(30)	2(17)	3(5)	3	2(37)	2(27)	2(17)
4		2(30)	2(39)	4		8(20)	2(38)
5			2(37)	5			2(27)
6			2(18)	6			2(27)
7	8(20)	2(27)	8(20)	7	2(30)	2(27)	9(74)
8	1(35)	1(45)	1(35)	8	1(35)	1(25)	1(35)
9	2(40)	4(52)	4(53)	9	4(44)	4(54)	4(44)
10	5(46)	4(51)	4(43)	10	4(51)	4(61)	1(23)
11	1(26)	4(43)	2(17)	11	1(26)	1(35)	8(20)
12	4(32)	1(12)	4(43)	12	4(42)	1(22)	4(42)
13	1(35)	1(35)	1(13)	13	4(33)	1(25)	4(33)
14	4(44)	4(41)	4(51)	14	4(71)	4(41)	4(41)
15	4(62)	1(36)	2(39)	15	4(44)	2(38)	2(39)
16	4(72)	11(80)	5(67)	16	4(62)	5(57)	4(62)
17	9(75)	5(57)	5(57)	17	1(25)	2(30)	5(47)
18	7(60)	7(60)	7(60)	18		2(40)	7(60)
19	2(38)	6(49)	2(18)	19	3(7)	2(39)	1(26)
20	2(39)	2(39)	9(76)	20	5(47)	5(46)	6(59)
21	5(57)	2(27)	9(64)	21	8(9)	3(5)	9(65)
22		11(80)	5(58)	22		11(80)	6(48)
23		8(10)	10(77)	23		8(10)	10(77)
24		5(58)	10(78)	24		10(78)	9(76)
25		6(48)	6(48)	25	5(46)	5(47)	6(48)
26	8(9)	9(76)	10(78)	26	9(76)	9(76)	9(76)
27	9(75)	11(79)	9(74)	27	9(75)	9(75)	9(74)
28	4(72)	6(49)	3(5)	28	4(72)	6(49)	4(63)
29		1(25)	3(4)	29		5(56)	1(13)
30		7(69)	4(54)	30		5(67)	4(54)
31		11(80)	10(78)	31		11(80)	3(5)
32	4(51)	4(51)	4(32)	32	1(11)	1(21)	1(11)
33			4(61)	33			8(10)
34			3(5)	34			1(2)
35	4(43)	1(24)	1(26)	35	1(35)	1(23)	1(26)
36	4(32)	3(3)	1(1)	36	4(44)	1(11)	4(31)
37	4(34)	4(51)	4(51)	37	1(21)	1(1)	4(51)
38	4(43)	1(25)	4(33)	38	1(23)	5(46)	1(11)
39	4(63)	4(42)	4(53)	39	4(72)	4(42)	4(52)
40	4(62)	4(71)	4(71)	40	4(71)	4(71)	4(71)
41	1(12)	4(44)	4(44)	41	4(52)	1(45)	4(44)
42	4(54)	11(70)	4(44)	42	4(55)	7(60)	4(54)
43	4(71)	4(71)	4(71)	43	4(52)	4(71)	4(71)
44	4(73)	4(72)	4(71)	44	9(74)	4(72)	4(71)
45	1(13)	3(5)	3(5)	45	1(14)	3(4)	3(5)
46	4(61)	4(52)	4(62)	46	4(61)	4(52)	4(62)
47	1(21)	4(51)	4(71)	47	1(21)	4(42)	4(61)
48	4(43)	1(23)	1(35)	48	4(41)	1(24)	1(45)
49	4(32)	4(31)	4(32)	49	3(3)	4(31)	4(51)
50			4(41)	50			1(21)
51	8(9)	8(10)	5(67)	51	8(9)	2(17)	5(67)
52	8(8)	8(9)	8(10)	52	3(5)	8(20)	8(9)

注) 中の数字: クラスター番号(ノード番号)

	水質タイプ	クラスター
	淡水	1, 4, 9
	低塩度	2, 3, 5, 6, 8
	高塩度	7, 10, 11

表 5-4 被圧地下水における各経年変動パターン分類表

	井番号		
	乾季・雨季	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, 29
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, 38
塩度減少後, 上昇傾向		26	

(b) 経年変動パターン特性における空間分布特性

図 5-6 及び図 5-7 に、被圧地下水の乾季及び雨季における 5 つの経年変動パターンの空間分布を示す。図 5-6 及び図 5-7 から、変化なしの傾向に分類され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る。これより、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。

塩度減少傾向に分類された観測井は主にハノイ市周辺の上流域 (No2, 7, 9, 10, 49), 紅河デルタの中流域 (No19, 20, 21, 22), 紅河デルタ西側の下流域 (No29(雨季), 30, 31) に分布している事が確認できる。表 5-3 から、ハノイ市周辺で塩度減少傾向に分類された観測井は全て HCO_3^- の値が共通して高い低塩度タイプから淡水タイプへ変化していることが分かる。ハノイ市では、周辺河川や湖沼の水質悪化を改善するために 1995 年から JICA 協力の下、表面水に対して水環境改善事業が行われており¹¹⁾、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考えられる。また、西側の下流域では表 5-3 より、高塩度タイプから低塩度タイプまたは淡水タイプに変化していることが確認できる。この地域では 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り¹²⁾、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。

塩度上昇傾向に分類され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。表 5-2 より、乾季・雨季の両季節において塩度上昇傾向を示した 5 井の内 4 井 (No11, 15, 17, 45) で淡水タイプから低塩度タイプに変化していることが確認できる。これらの観測井は灌漑や Ca^{2+} が主成分の農薬の利用¹³⁾ 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。

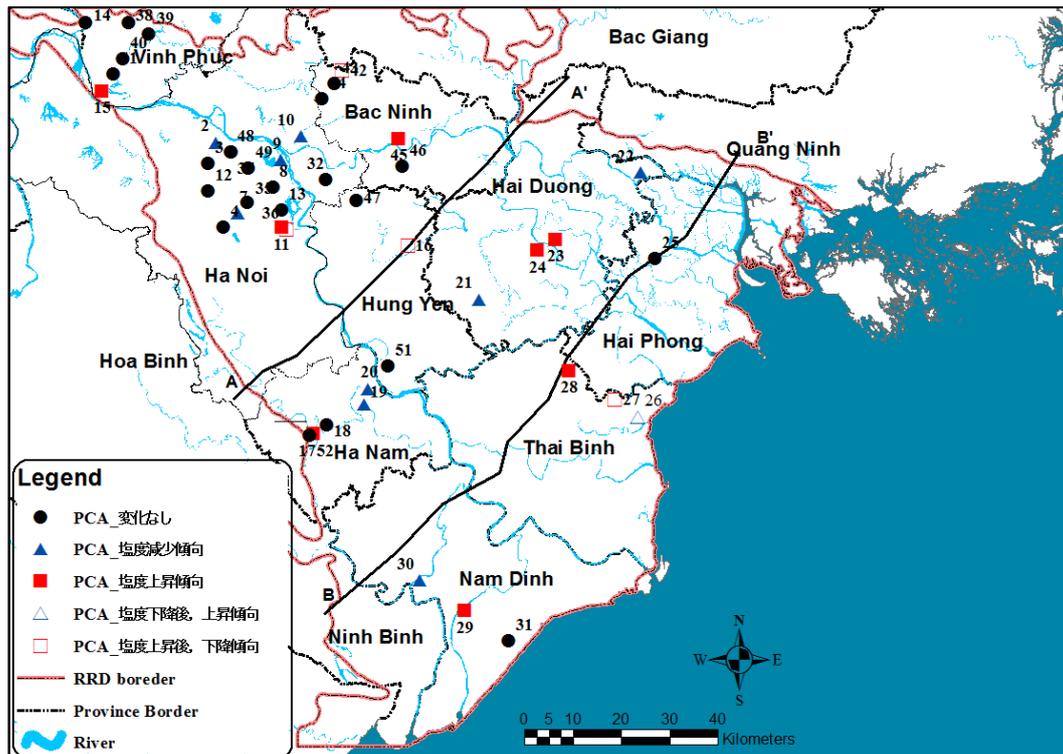


図 5-6 被圧地下水における経年変動パターンの空間分布(乾季)

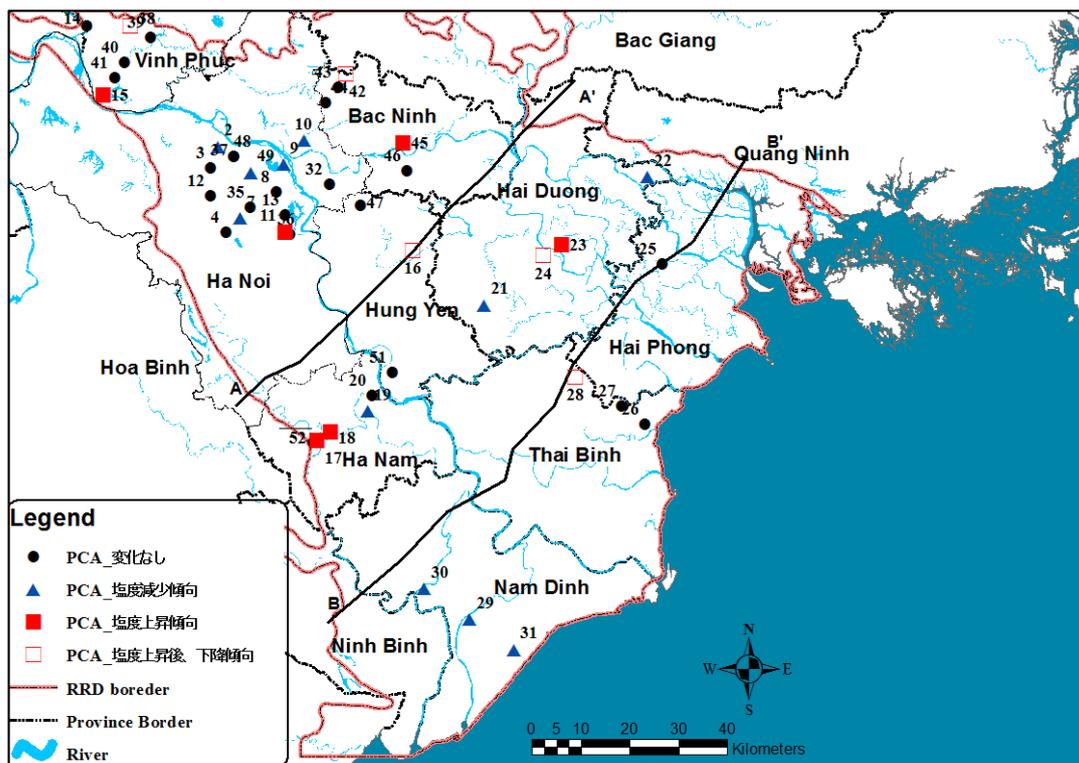


図 5-7 被圧地下水における経年変動パターンの空間分布(雨季)

5-2-3 被圧地下水における季節変動パターン特性

表 5-5 は、被圧地下水の季節変動を確認した観測井の分類表を示す。本研究では、ある観測井において当該年の乾季から雨季にかけて水質タイプが異なる事を季節変動の判断基準とした。季節変動の対象は欠測を除く全 135 件(1993 年：37, 2002 年：46, 2011 年：52)である。表 5-4 より、全 135 件中 25 件において季節変動を確認し、その内 18 件で乾季から雨季にかけて塩度の下がる傾向、残りの 7 件では、乾季から雨季にかけて塩度の上がる傾向を示した。また、本研究の結果からは全ての年に対して季節変動を示す観測井は無く、2年間季節変動を確認できる観測井も観測井 No26 のみであった。さらに、観測井 No.24, 29 では、2011 年、2002 年、1993 年の 3 年間で塩度上昇傾向と塩度減少傾向の両方の傾向を示した。

次に図 5-8 には、表 5-5 に示した被圧地下水の季節変動を示した観測井の空間分布を示しており、2011 年、2002 年、1993 年の 3 年間で一度でも乾季から雨季にかけて水質タイプの変化した観測井をプロットしている。図 5-8 より、塩度減少傾向を示した観測井はデルタ全域に分布し、乾季から雨季にかけて地下水流入量の増加に伴い地下水の希釈が生じ、水質タイプが塩度減少する傾向を示したと考えられる。逆に、塩度増加傾向を示した観測井はデルタ上流域の西側 (No.15, 33, 38) に多く分布していることが分かる。これらの観測井では、淡水タイプから低塩度タイプへの変化であり、 Ca^{2+} と HCO_3^- の増加に起因している。これらの地域では、石灰岩(炭酸塩岩石)が多く存在し¹⁴⁾、雨季における降雨によりそれらが溶出し地下水に流入したことが示唆される。

表 5-5 被圧地下水における季節変動の分類表

	水質タイプの変化	井番号		
		1993年	2002年	2011年
塩度上昇傾向	淡水→低塩度	49	15, 29, 38	20, 33
	低塩度→高塩度		24	
	淡水→高塩度			
塩度減少傾向	低塩度→淡水	2, 9, 10, 26	36	7, 16, 19, 28, 29, 34
	高塩度→低塩度		16, 18, 30	31
	高塩度→淡水		27	24, 26

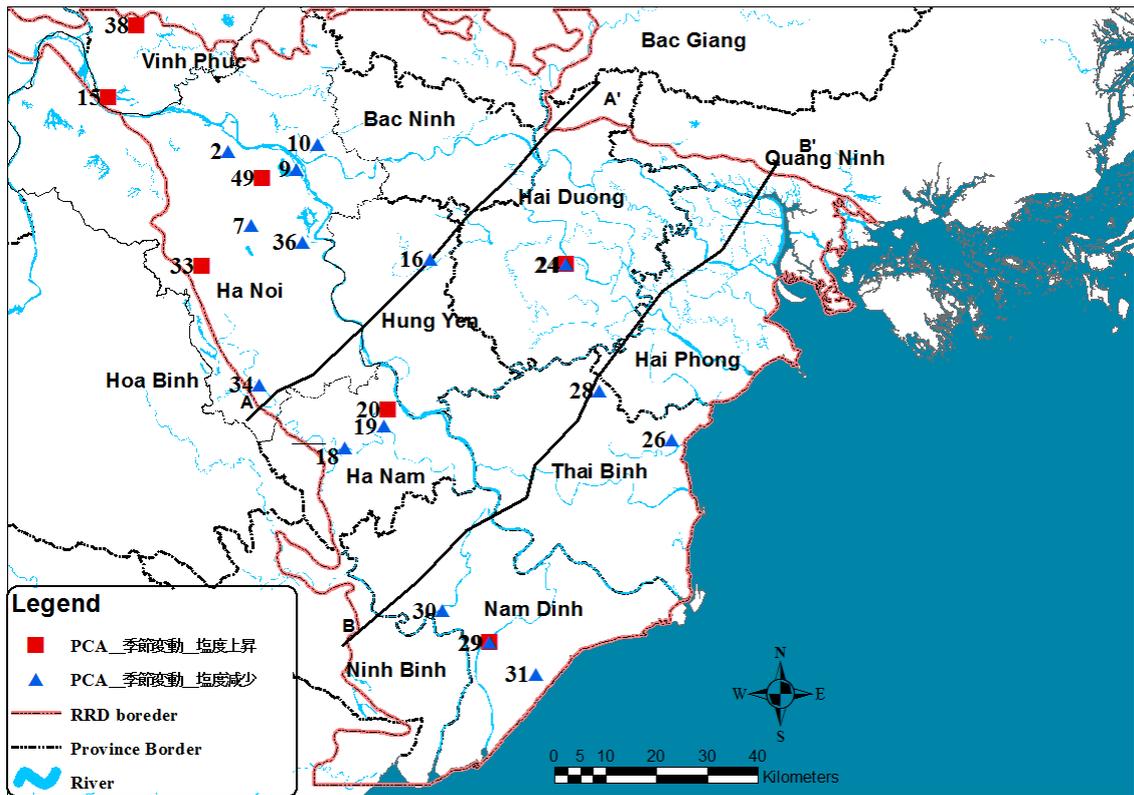


図 5-8 被圧地下水における季節変動パターンの空間分布

5-3 不圧地下水における適用結果

ここでは、不圧地下水のイオンデータに SOM を適用した結果を示す。

5-3-1 不圧地下水における自己組織化マップ適用結果

(a) SOM によるイオン特性パターンの分類結果

第5章2節1項で述べた被圧地下水と同様に、不圧地下水におけるSOMの適用結果を以下に示す。表5-6は不圧地下水イオンデータにおける8つのイオンの相関係数の値、図5-9は全8イオンのクラスタリング結果を示し、[0,1]に規準化をした全8イオン濃度ごとの参照ベクトルの平面要素を表している。図5-10はk-means法によるクラスタ分類を行った結果を表しており、クラスタ数2~全ノード数78に対するDBI値の計算結果を示し、これより最少DBI値として13が得られ、クラスタ数を13とした。図5-11はウォード法による階層図を示しており、13のクラスタに属するノード番号を示している。図5-12では、SOMマップ上の各クラスタ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。また表5-7は、各クラスタと全イオンデータにおける、イオン濃度の平均値およびベトナムの飲料水基準値を示している。図5-13は不圧地下水の各クラスタ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4, 5, 6, 11, 12については中央値のみをプロットしている、また、分類されたノードの数が1つのみであったクラスタ13については、そのノードの参照ベクトル値をプロットしている。

表 5-6 不圧地下水における 8 イオンの相関係数

	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
Mg ²⁺	0.691						
Na ⁺	0.624	0.991					
K ⁺	0.571	0.964	0.979				
HCO ₃ ⁻	0.464	0.650	0.674	0.669			
SO ₄ ²⁻	0.792	0.846	0.789	0.697	0.352		
Cl ⁻	0.637	0.996	0.996	0.977	0.647	0.809	
CO ₃ ²⁻	0.226	0.599	0.637	0.629	0.868	0.295	0.615

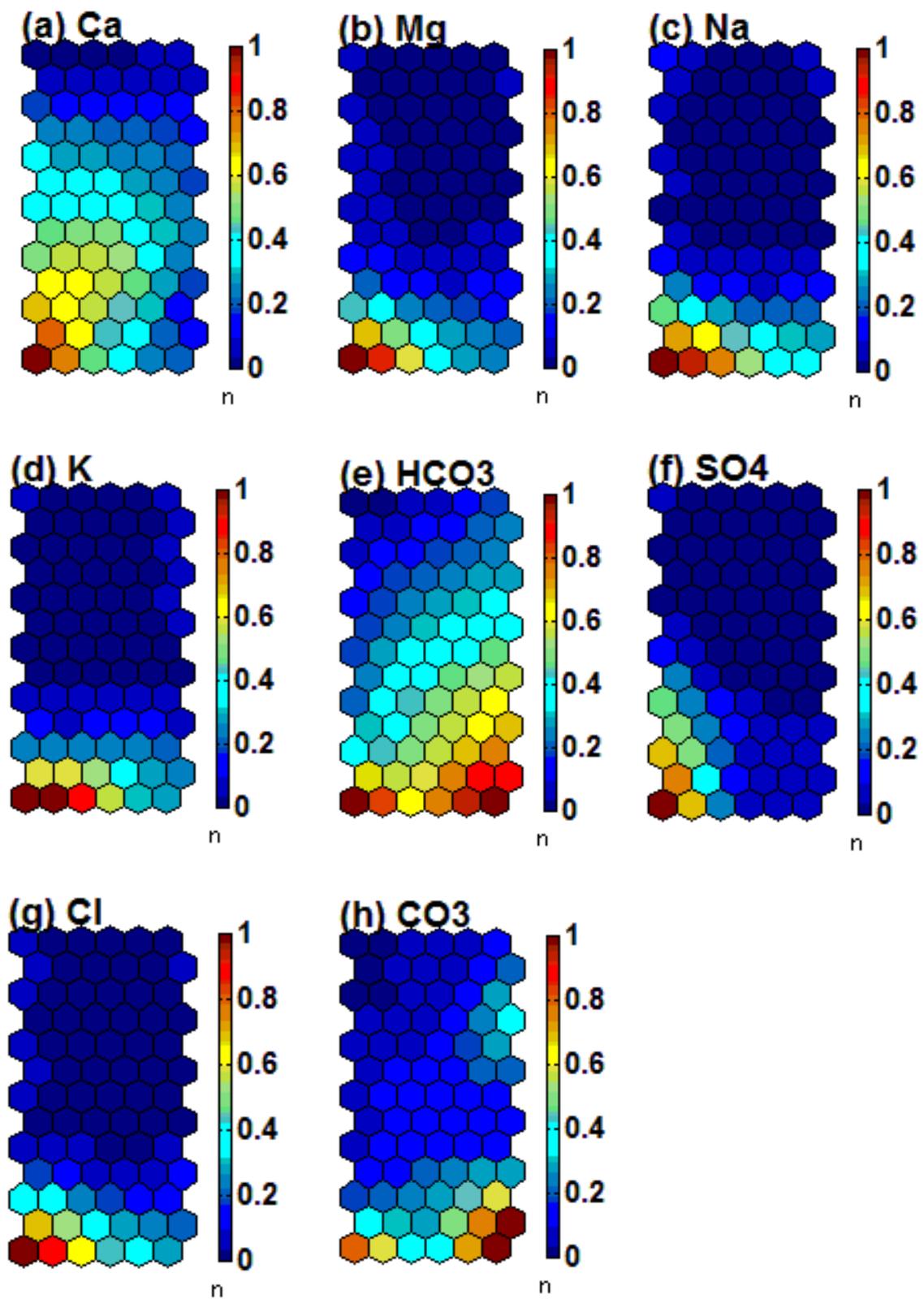


図 5-9 不圧地下水における 8 イオンのクラスタリング結果

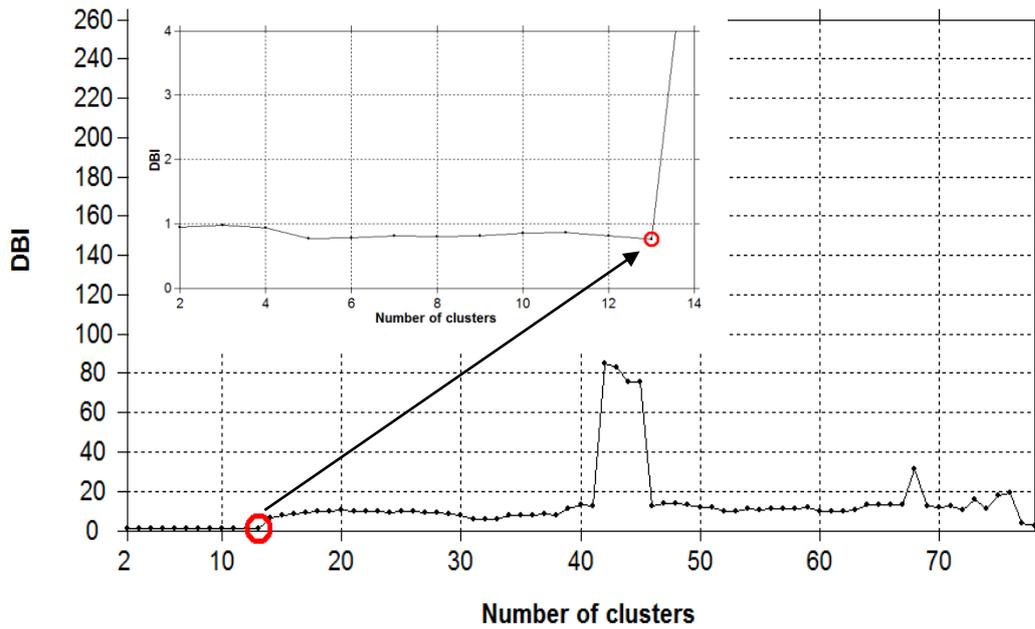


図 5-10 k-means 法による不圧地下水の DBI 値の計算結果

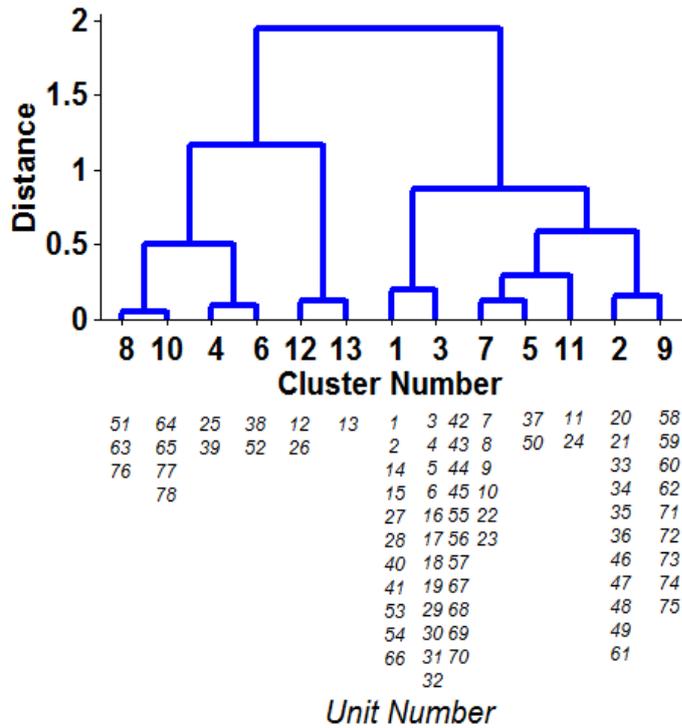


図 5-11 ウォード法による不圧地下水の階層図

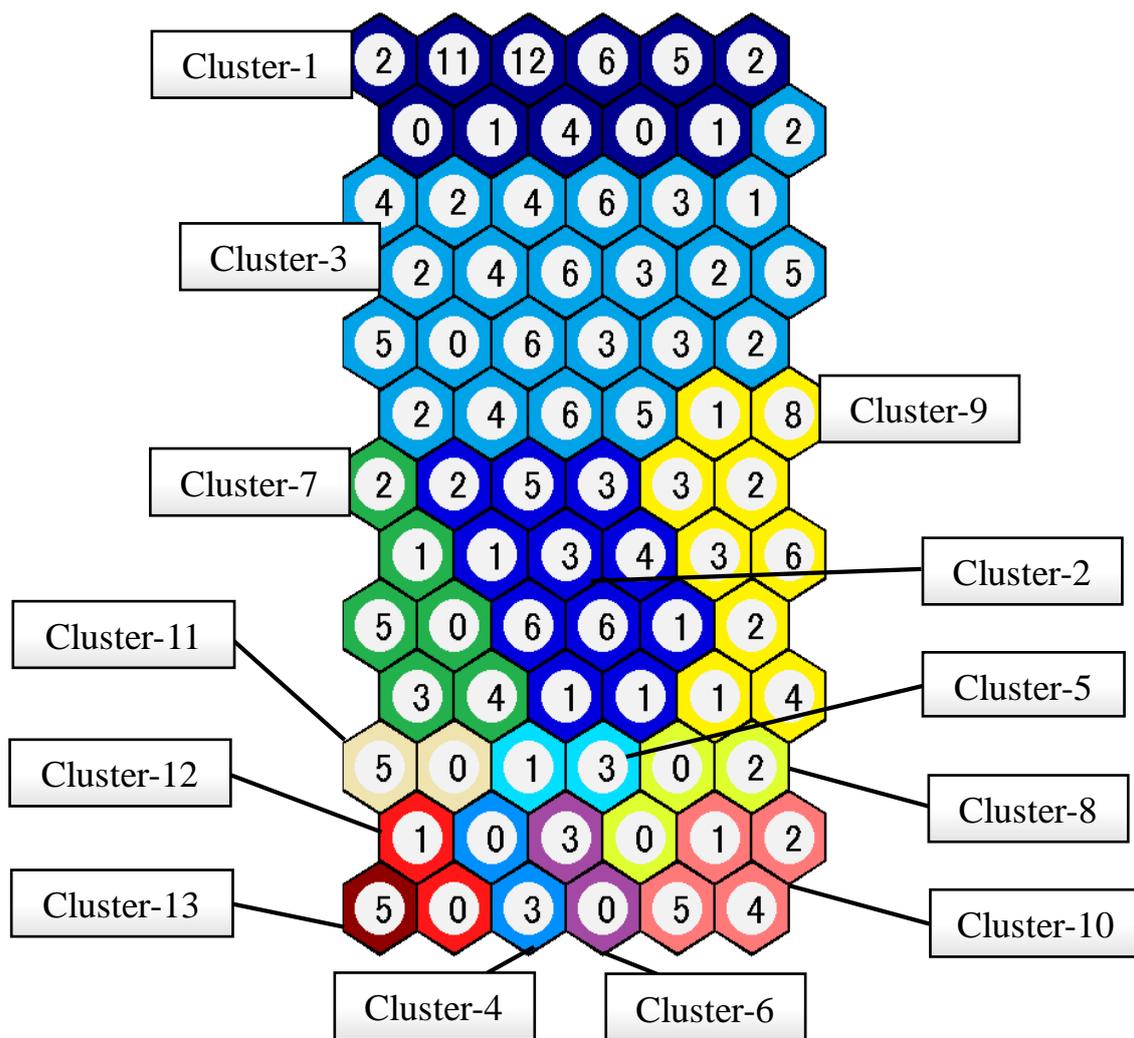


図 5-12 不圧地下水のクラスター分類結果

表 5-7 不圧地下水における各クラスターと全データのイオン濃度の平均値および飲料水基準値

	Ca ²⁺ [mg/L]	Mg ²⁺ [mg/L]	Na ⁺ [mg/L]	K ⁺ [mg/L]	HCO ₃ ⁻ [mg/L]	SO ₄ ²⁻ [mg/L]	Cl ⁻ [mg/L]	CO ₃ ²⁻ [mg/L]
クラスター1	25.62	11.14	108.22	2.08	152.36	16.91	173.88	0.60
クラスター2	145.69	47.24	228.88	6.38	692.21	57.39	315.45	1.85
クラスター3	73.66	21.78	107.71	3.08	368.68	8.87	142.52	1.14
クラスター4	167.89	588.04	6433.21	205.02	959.78	549.97	9495.37	3.93
クラスター5	158.55	236.50	2296.37	73.37	824.28	250.87	3315.61	3.05
クラスター6	123.14	409.81	4662.97	151.10	1042.14	174.28	6682.25	4.25
クラスター7	167.62	132.99	955.71	13.09	437.50	446.72	1206.06	1.19
クラスター8	100.25	190.32	2018.24	62.16	1159.92	85.75	2730.44	5.72
クラスター9	81.68	38.82	237.07	7.94	818.37	17.66	265.80	2.00
クラスター10	71.23	259.76	3072.57	75.11	1424.34	74.98	4220.96	10.61
クラスター11	209.94	418.96	4057.85	68.74	662.91	1034.12	5997.39	2.26
クラスター12	245.51	826.70	8002.25	220.22	1171.03	1282.97	12820.16	6.04
クラスター13	243.64	1076.16	9619.48	281.00	1562.11	1753.10	16484.25	12.11
全データ平均	89.17	87.78	590.62	17.07	452.05	126.02	1023.84	0.92
飲料水基準 (最大値)	-	-	200.00	-	-	250.00	250.00	-

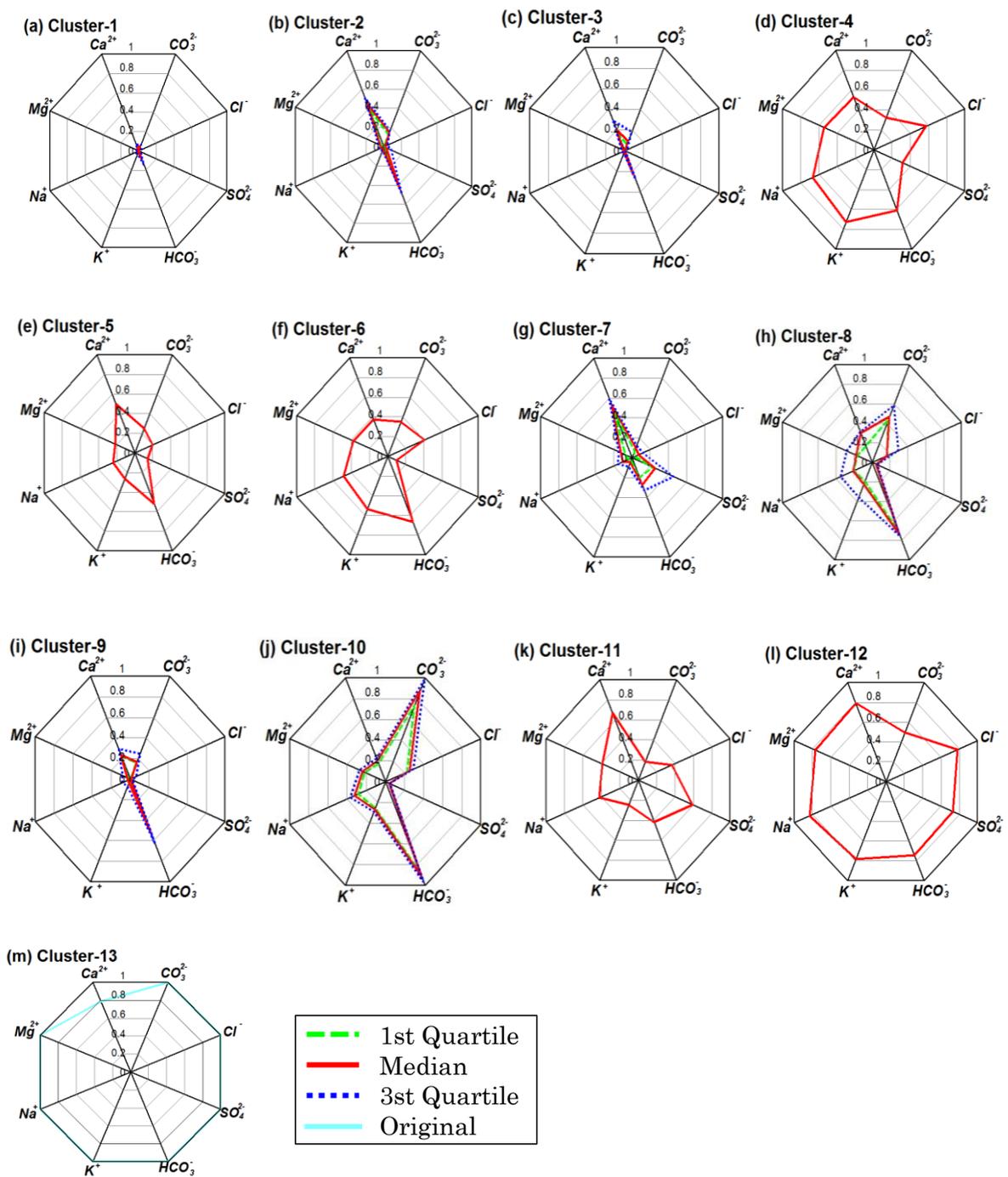


図 5-13 不圧地下水における各クラスターのレーダーチャート

(b) イオン特性パターンおよび各クラスターのイオン特性について

図 5-9 および表 5-6 から、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- の 4 つのイオンに着目すると、イオンの濃度分布が類似していることが分かる。相関係数も全て 0.95 よりも高い値を示しており、4 つのイオン(Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^-)に非常に高い正の相関関係があることがわかる。また、 SO_4^{2-} も 4 つのイオン(Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^-)との相関が高いことが見て取れる。逆に、 HCO_3^- と CO_3^{2-} に着目すると、他の 6 つのイオン(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^-)とはノードパターンが似ておらず、相関係数も低いことが見て取れる。 HCO_3^- と CO_3^{2-} 同士のノードパターンはにており、相関係数も高いことから、2 つのイオン(HCO_3^- 、 CO_3^{2-})は正の相関関係があることが分かる。

次に図 5-11 から、間の距離が近いクラスター同士は互いに性質が似ているクラスターであることが分かる。これよりクラスター 1, 3, クラスター 2, 5, 7, 9, 11, クラスター 4, 6, 8, 10, クラスター 12, 13 はクラスター間の距離が近く性質が似ていることが分かる。また図 5-13 からそれぞれのクラスターの性質についてみて見ると、クラスター 1, 3 は全てのイオンの値が低い淡水のクラスターであり、特にクラスター 1 は全 13 クラスター中全てのイオンの値が最も低いクラスターである。逆に、クラスター 12, 13 は全てのイオンの値が高い高塩度のクラスターであり、クラスター 13 は、全 13 クラスター中全てのイオンの値が最も高いクラスターである。また、クラスター 2, 5, 7, 9, 11 は、 HCO_3^- と Ca^{2+} の値が共通して高いクラスターであることが確認できる。クラスター 4, 6, 8, 10 は、 HCO_3^- の値が共通して高いクラスターであることに加え、クラスター 8, 10 は CO_3^{2-} の値、クラスター 4, 6 は 4 つの陽イオン (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+) と Cl^- の値が高いクラスターである。

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、高塩度タイプ(クラスター 4, 12, 13)、中塩度タイプ(クラスター 4, 6, 8, 10)、低塩度タイプ(クラスター 2, 5, 7, 9, 11)、淡水タイプ(クラスター 1, 3)の 4 つの水質タイプに分類することができる。また、表 5-7 より各クラスターの平均値と飲料水基準を比較してみると、全ての飲料水基準値を満たしているクラスターは被圧地下水と同様に淡水タイプに分類したクラスター 1, 3 のみであり、その他のクラスターでは飲料水としてそのまま利用するには適していない。全データの平均も基準値を上回っており、特に Na^+ と Cl^- の値は大きく上回っている。これは、海岸沿いの観測井において海水侵入している井戸があることが大きく影響していると示唆される。

5-3-2 不圧地下水の経年変動パターン特性

(a) 経年変動パターンの分類

表 5-8 に不圧地下水における 1993 年, 2002 年, 2011 年の 3 年間の乾季・雨季それぞれの水質タイプを分類した表を示す. 分類表の中に示された数字はクラスター番号および SOM ノードマップのノード番号を表している. また, 表の色分けされた箇所は前述の第 5 章 2 項 1 節にて示した 4 つの水質タイプを示しており, 青色は淡水タイプ, 緑色は低塩度タイプ, 黄色は中塩度タイプ, 赤色は高塩度タイプのイオンデータである. 被圧地下水と同様に, これら 4 つの水質タイプを経年変動の判断基準とし, 乾季と雨季に分けて経年変動パターンの分類を行った.

表 5-9 に, 1993 年, 2002 年, 2011 年の 3 年間ににおける不圧地下水の経年変動パターンを示す. 表 5-3 から経年変動の対象とした観測井は全 47 井の内, 2011 年でしか入手できなかった観測井(No5, 6)を除く 45 井とした. なお, 観測井 No54 は雨季のみ, 観測井 No61, 62 は乾季のみを対象とした. 表 5-3 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, 塩度下降後, 上昇傾向) に分類された. また, 乾季と雨季の両季節を経年変動の対象とした全 43 井の内, 約 60%にあたる 25 井で両季節において同様の経年傾向を示しており, これらの観測井では経年変動パターンの変化はあまり見られない事がわかる.

変動パターンそれぞれを見てみると, 変化なしのパターンが最も多く 33 井で確認され, 内 26 井は乾季・雨季両方で変化なしのパターンを示した. また, 塩度減少傾向パターンの観測井は 11 井 (内 1 井は乾季・雨季の両方), 塩度上昇傾向パターンの観測井は 15 井 (内 8 井は乾季・雨季両方) であり, 増加傾向の方が減少傾向の観測井より多く被圧地下水の傾向と逆の結果を示した. さらに, 塩度上昇後減少傾向パターンを示す観測井は 2 井, 塩度減少後上昇傾向パターンを示す観測井は 1 井のみであった.

表 5-8 不圧地下水における水質タイプ分類表(左：乾季，右：雨季)

井番号	乾季(2月)		
	1993年	2002年	2011年
1	2(46)	2(33)	2(34)
2	9(71)	1(15)	3(30)
3	7(8)	7(10)	7(23)
4		3(19)	3(32)
5			3(42)
6			3(4)
7	9(74)	9(73)	9(73)
8	3(29)	1(40)	1(53)
9	3(42)	1(27)	1(27)
10	3(29)	3(29)	3(31)
11		1(28)	1(40)
12	1(27)	1(53)	1(27)
13	9(74)	2(61)	9(71)
14	1(28)	2(20)	2(35)
15	2(33)	2(35)	2(48)
16	3(4)	7(9)	7(9)
17	3(17)	3(44)	3(19)
18	3(3)	9(71)	3(55)
19	3(31)	9(72)	3(32)
20	3(3)	9(60)	2(46)
21		9(71)	3(67)
22	3(57)	3(6)	3(5)
23		9(75)	10(65)
24		3(19)	7(23)
25		1(14)	1(14)
26	3(5)	9(75)	8(76)
27	3(3)	9(75)	5(50)
28	1(66)	1(28)	3(69)
29		9(71)	9(71)
30		10(65)	10(78)
31		2(36)	6(38)
53	3(44)	3(17)	3(69)
54			3(32)
55		1(27)	3(30)
56	2(35)	2(35)	3(45)
57	1(14)	1(14)	7(9)
58		3(55)	2(47)
59	3(31)	3(30)	3(57)
60		7(10)	3(67)
61		3(45)	3(57)
62		2(48)	3(56)
63		7(23)	10(77)
64		11(11)	8(76)
65		13(13)	13(13)
66		11(11)	11(11)
67		10(78)	10(78)
68		12(12)	4(39)

井番号	雨季(8月)		
	1993年	2002年	2011年
1	1(53)	3(30)	2(48)
2	1(53)	3(17)	3(43)
3	7(10)	7(7)	2(49)
4		2(33)	3(43)
5			1(54)
6			3(45)
7	9(73)	9(58)	9(73)
8	1(40)	1(40)	1(27)
9	3(31)	1(27)	1(27)
10	3(42)	3(42)	3(70)
11		1(28)	1(40)
12	1(27)	1(53)	1(40)
13	9(73)	9(60)	9(73)
14	3(17)	2(20)	2(21)
15	3(56)	2(34)	2(48)
16	1(14)	7(9)	7(9)
17	1(27)	3(43)	3(45)
18	3(16)	3(42)	3(55)
19	3(32)	3(30)	3(45)
20	3(31)	9(60)	9(59)
21		3(69)	1(66)
22	2(35)	3(5)	3(5)
23		5(50)	10(64)
24		2(33)	2(34)
25	1(14)	1(14)	1(14)
26	10(65)	10(65)	10(78)
27	3(3)	9(75)	5(37)
28	1(14)	3(29)	3(70)
29		9(71)	9(71)
30		10(65)	3(5)
31		3(6)	6(38)
53	3(30)	3(16)	3(42)
54	2(48)	3(31)	3(69)
55	2(35)	1(27)	3(68)
56	2(33)	2(47)	3(44)
57	1(14)	1(14)	7(7)
58	2(48)	1(27)	2(47)
59	3(32)	3(19)	3(32)
60		1(1)	1(1)
61			2(47)
62			9(59)
63	9(62)	9(72)	9(59)
64	3(69)	11(11)	10(77)
65	13(13)	13(13)	13(13)
66	7(23)	11(11)	6(38)
67		2(46)	5(50)
68		4(39)	4(39)

注) 中の数字: クラスター番号(ノード番号)

	水質タイプ	クラスター
	高塩度	12, 13
	中塩度	4, 6, 8, 10
	低塩度	2, 5, 7, 9, 11
	淡水	1, 3

表 5-9 不圧地下水における各経年変動パターン分類表

	井番号		
	乾季・雨季	乾季のみ	雨季のみ
変化なし	3, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 17, 25, 28, 29, 53, 59, 65, 67	1, 4, 15, 22, 30, 55, 61, 66	2, 18, 19, 21, 24, 26, 60, 63, 68
塩度減少傾向	56	2, 21, 60, 62, 68	4, 22, 30, 54, 55
塩度上昇傾向	14, 16, 20, 23, 27, 31, 57, 64	24, 26, 58, 63	1, 15, 66
塩度上昇後, 減少傾向		18, 19,	
塩度減少後, 上昇傾向			58

(b) 経年変動パターン特性における空間分布特性および考察

図 5-14 及び図 5-15 に、不圧地下水の乾季および雨季における 5 つの経年変動パターンの空間分布を示す。これより、変化なしの傾向に分類された観測井はデルタ全域に分布している、特に上流域では主にハノイ市内に多いことが確認できる。

塩度減少傾向に分類された観測井は主にハノイ市周辺の上流域 (No2(乾季), 54(雨季), 55(雨季)), 紅河デルタの中流域 (No.21(乾季), 22(雨季), 60(乾季), 62(乾季)), 紅河デルタ西側の下流域 (No.30(雨季), 68(乾季)) に分布している事が確認できる。これらの分布傾向は被圧地下水の塩度減少傾向と類似している。よって被圧地下水と同様に、ハノイ市内では表面水に対しての水環境改善事業¹¹⁾, 紅河デルタ西側の下流域では地表の塩度を下げる土壌乾燥技法¹²⁾により、表面水の水質改善され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。

塩度上昇傾向に分類された観測井はハノイ市内を除くデルタの全域に分布している。表 5-8 より、これらの水質タイプの変化は全て淡水タイプから低塩度タイプ、および淡水タイプ・低塩度タイプから中塩度タイプへ変化している。これらの水質タイプの変化は HCO_3^- や CO_3^{2-} , Ca^{2+} の増加が原因と考えられ、灌漑や農薬などの人為的活動により涵養される水質の悪化が原因と示唆される。また、観測井 No.31, 66 のように海岸線に位置する観測井では、低塩度タイプのクラスターから Na^+ と Cl^- が高いのクラスター 6 へ変化しており、海水の影響を受けていることが示唆される。

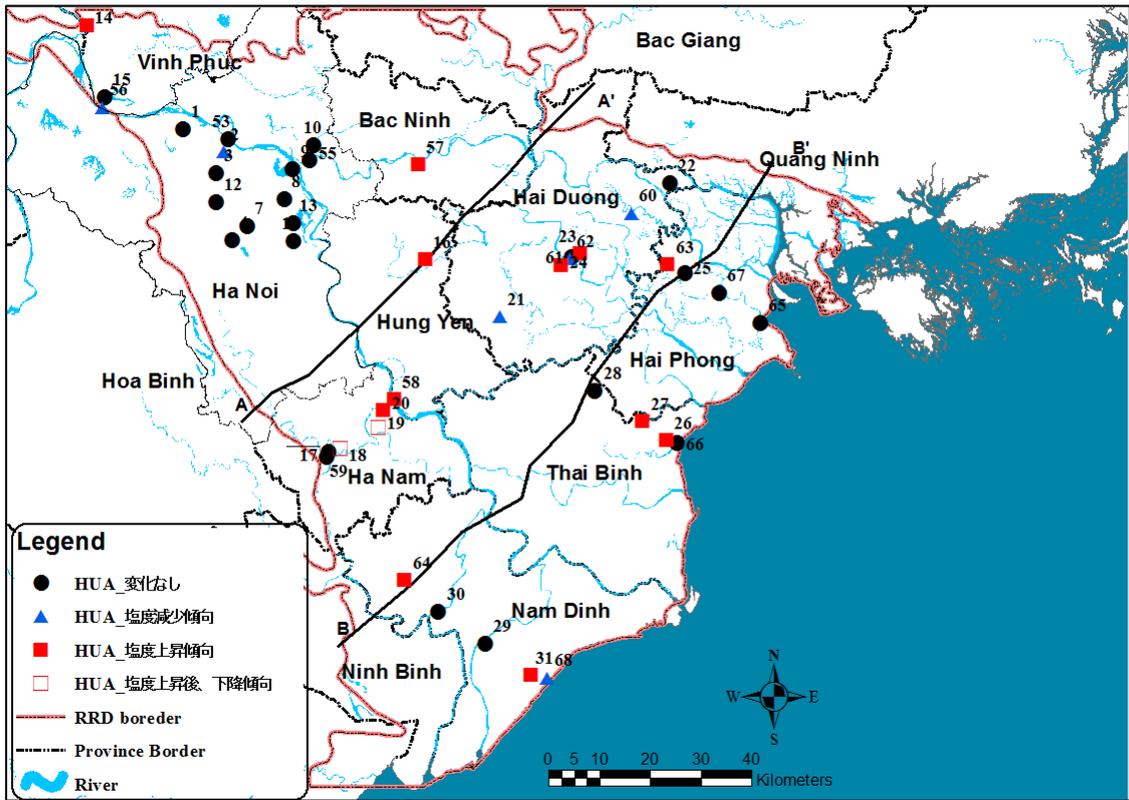


図 5-14 不圧地下水における経年変動パターンの空間分布(乾季)

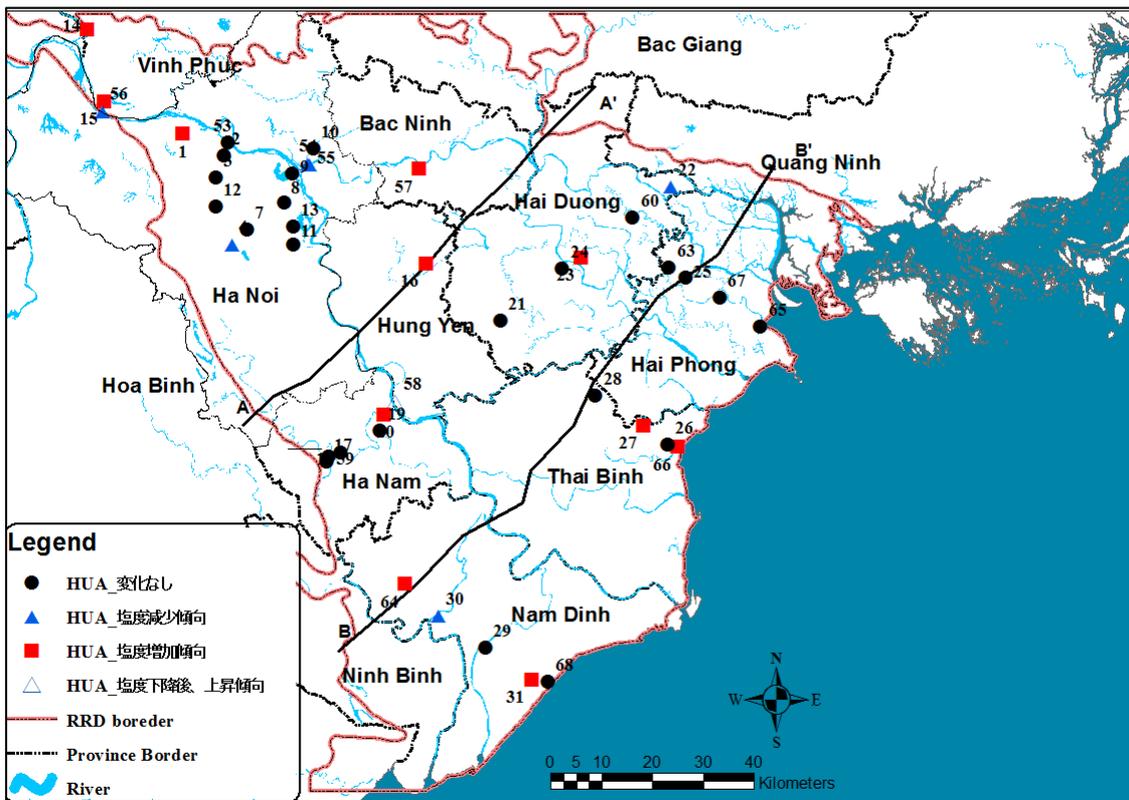


図 5-15 不圧地下水における経年変動パターンの空間分布(雨季)

5-3-3 不圧地下水の季節変動パターン特性

表 5-10 には、不圧地下水の季節変動傾向を示す。本研究では被圧地下水同様に、ある観測井において当該年の乾季から雨季にかけて水質タイプが異なる事を季節変動した事と判断した。季節変動の対象は欠測を除く全 116 件(1993 年:26, 2002 年:43, 2011 年:47)である。表 5-10 より、全 116 件中 22 件において季節変動を確認し、その内 14 件で乾季から雨季にかけて塩度の下がる傾向を示し、残りの 8 件では、乾季から雨季にかけて塩度の上がる傾向を示した。また、被圧地下水の結果と同様に本研究の結果からは全ての年に対して季節変動を示す観測井は確認できなかった。

次に図 5-16 には、表 5-10 に示した不圧地下水の季節変動を示した観測井の空間分布を示しており、2011 年、2002 年、1993 年の 3 年間で一度でも乾季から雨季にかけて水質タイプの変化した観測井をプロットしている。図 5-16 より、被圧地下水と同様に塩度減少傾向を示した観測井はデルタ全域に分布し、乾季から雨季にかけて地下水流入量の増加に伴い地下水の希釈が生じ、水質タイプが塩度減少する傾向を示したと考えられる。逆に、塩度増加傾向を示した観測井はデルタ中流域の東側 (No.22, 24, 61, 62)、下流域の海岸沿い (No.26, 66) に分布していることが分かる。デルタ中流域の東側では、淡水タイプから低塩度タイプへの変化であり、 Ca^{2+} と HCO_3^- のが増加していることが分かる。該当地域では集約的な灌漑農業が盛んであり¹³⁾、虫の筋収縮に効果があるとされている Ca^{2+} が主成分の農薬が土壤に浸透しているためと考えられる。また、下流域の海岸沿いでは低塩度から中塩度への変化であり、海水侵入の影響が考えられる。

表 5-10 不圧地下水における季節変動の分類表

	水質タイプの変化	井番号		
		1993年	2002年	2011年
塩度上昇傾向	淡水→低塩度	22	4, 24	61, 62
	淡水→中塩度	26		
	低塩度→中塩度		26	66
塩度減少傾向	低塩度→淡水	1, 2, 15	1, 18, 19, 21, 31, 60	
	中塩度→低塩度		67	63, 67
	中塩度→淡水			30
	高塩度→中塩度		68	

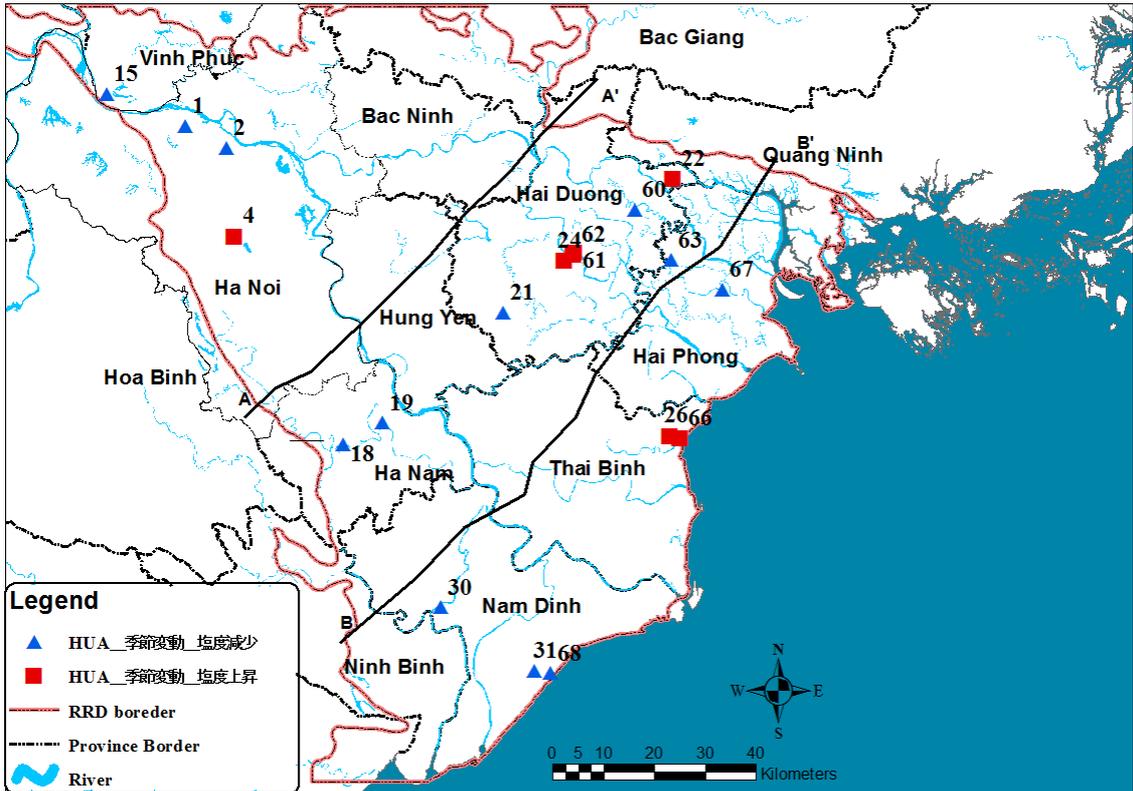


図 5-16 不圧地下水における季節変動パターンの空間分布

第 6 章

結論

第6章 結論

本研究では、ベトナムの国家地質データベースプロジェクトから得られた紅河デルタにおける被圧52井、不圧47井の地下水イオンデータを対象に、パターン分類手法の一種であるSOMを用いて2011年、2002年、1993年の3年間における経年変動パターンの分類を行うとともに、そのパターンの空間分布特性および季節変動特性について明らかにした。

その結果、被圧地下水は全ノード数80で縦横比10:8、クラスター数11のマップが得られ、3つの水質タイプ（高塩度、低塩度、淡水タイプ）に分類された。さらに、3年間における経年変動パターンの分類を行った結果、5つの経年変動パターン（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）に分類された。経年変動パターンの空間分特性と共に経年変動傾向を見ることで、塩度減少傾向の観測井は表面水の水質改善による地下水涵養の水質の変化、塩度上昇傾向の観測井は灌漑や農薬による農薬、生活排水などの人為的活動によって経年変動が起きたと示唆された。また季節変動についても分類を行い、塩度減少傾向を示した観測井は乾季から雨季にかけて地下水流入量の増加により、地下水が希釈されていると示唆される。

不地下水は全ノード数78で縦横比13:6、クラスター数13のマップが得られ、4つの水質タイプ（高塩度、中塩度、低塩度、淡水タイプ）に分類された。さらに、3年間における経年変動パターンの分類を行った結果、被圧地下水と同様の5つの経年変動パターン（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）に分類された。また経年変動パターンの空間分特性から、塩度減少傾向の観測井は被圧地下水の分布結果と類似しており、表面水の水質改善による地下水涵養の水質の変化が原因と考えられる。塩度上昇傾向を示した観測井は、農薬による農薬や海水侵入の影響が示唆される。また季節変動についても分類を行い、被圧地下水同様に塩度減少傾向を示した観測井は乾季から雨季にかけて地下水流入量の増加により、地下水が希釈されていると示唆される。

参考文献

参考文献

- 1) 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, 2014.
- 2) Bui DD, Kawamura A, Tong TN, Amaguchi H, Nakagawa N, Iseri Y (2011) Identification of aquifer system in the whole Red River Delta, Vietnam. *Geosciences Journal* 15(3): 323-338
- 3) Tong, T.N (2004). National hydrogeology database program. Final project report. Department of Geology and Minerals of Vietnam, 120p. (in Vietnamese)
- 4) Piper, A.M/ (1944). A graphical interpretation of water analysis. *Transactions-American Geophysical Union*, 25, 914-928. Kohonen T.: "The Self-organizing Map", *Proc. of the IEEE*, pp. 1464-1480, 1990.
- 5) Jin, Y. H., Kawamura, A., Park, S. C., Nakagawa, N., Amaguchi, H. and Olsson, J.,- 55 -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) 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不圧・被圧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.L_541-L_546, 2013.
- 7) Hilario, L. G. and Ivan, M. G. : Self-organizing map and clustering for wastewater treatment monitoring, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol.17, pp.215-225, 2004.
- 8) J. Vesanto, J. Himberg, E. Alhoniemi and J. Parhankangas, *SOMToolbox for Matlab 5*, Helsinki University of Technology Report A57, 2000.
- 9) Scott, K. E. and Oyana, T. J., : An improved algorithm for segregating large geospatial data, 9th AGILE Conference on Geographic Information Science, pp.177-185, 2006.
- 10) JACA: ハノイ水環境改善事業(I-1)(I-2), http://www2.jica.go.jp/ja/evaluation/pdf/2009_VNV-1_4_f.pdf
- 11) 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
- 12) 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
- 13) Drogue, C., Cat, N.N., Dazy, J., : Geological factors affecting the chemical characteristics of the thermal waters of the carbonate karstified aquifers of Northern Vietnam. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2000.

謝 辞

まず、本研究を進める上で多くの助言や相談に乗って頂いた河村先生に深く感謝申し上げます。河村先生の助けなくしては本論文を完成させることはできなかつたと感じています。

また、仕事の合間を縫って基礎的知識が不足している私に研究に関する質問や疑問に親身に乗って頂いた Thuy さんには大変お世話になりました。ありがとうございました。

最後に研究室の同期並びに後輩、田内さんにもご迷惑をおかけしました。水文研究室の雰囲気はとても居心地が良く、研究にも取り組みやすい環境でした。ありがとうございました。