

多変量解析を用いた石灰岩帯水層における 地下水水質の統計的分類

MULTIVARIATE STATISTICAL CHARACTERIZATION OF GROUNDWATER QUALITY IN LIMESTONE AQUIFER, OKINAWA, JAPAN

安元純 聖川健斗 仲栄真史哉 砥綿泰弘 中野拓治

Jun YASUMOTO¹, Kento HIJIKAWA², Fumiya NAKAEMA², Yasuhiro TOWATA³
and Takuji NAKANO⁴

¹正会員 農博 琉球大学 農学部 地域農業工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地)

²非会員 琉球大学 農学部 地域農業工学科 (同上)

³非会員 野村貿易大阪本社 (〒541-8542 大阪市中央区安土町1丁目7番3号)

⁴正会員 工博 琉球大学 農学部 地域農業工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地)

Multivariate statistical techniques, principal component and cluster analysis were applied to the data on groundwater quality of Limestone aquifer in the southern region of Okinawa, Japan, to extract principal factors corresponding to the different sources of variation in the hydrochemistry, with the objective of defining the main controls on the hydrochemistry at the regional scale.

As a result of principal component analysis, ground water quality in the region could be classified into four principal components, that is, the groundwater is affected according to salt water and fertilizer (component 1), limestone dissolution (component 2), a redox state of a ground-water (component 3) and nitrogen accumulation/ denitrification (component 4). The cluster analysis was classified into four clusters according to the pollution situation of groundwater pollution in the study area, and the classification result was affected by season.

Key Words : groundwater, Ryukyu limestone, chemical composition, categories, multivariate analysis

1. はじめに

石灰岩帯水層は水資源として非常に有効であり, 世界の全人口の25%の人々の飲料水を供給するなど¹⁾, 一部の地域では, 唯一利用可能な飲料水あるいは農業用水の貴重な水源となっている。

石灰岩帯水層の大きな特徴は, 鍾乳洞のような空洞や大きな空隙が多数発達しており, 非常に不均一性が高いことである。このような帯水層における地下水システムを把握するのは難しく, 石灰岩の複雑な地質構造の把握や, 各種トレーサーやモデリングを用いた総合的なアプローチが求められる²⁾。地下水中に溶存する化学物質をトレーサーに用いる手法は, ここ50年の間に, 地下水システムを理解するのに重要な役割を果たしてきた⁴⁾。なかでも, 主要イオンを用いた地下水水質の分類は非常に一般的な方法となっており, 流動場や土地利用等の水理化学的な側面から地下水水質を分類するのに有効である。

地下水水質の分類を容易にするため, ヘキサダイアグラムやトリニリアダイアグラムといった伝統的な手法に加え, 多変量解析などの統計的分類手法が多く適用され

てきた⁵⁾。特に, 地下水位や主要イオン等の物理化学的なデータを用いた主成分解析は, 地下水の水質の特徴を把握するために広く用いられており, それらデータの短期的あるいは特徴的な変動と自然や人為活動に起因する季節変動特性とを結びつけるのに非常に有効である^{5) 6)}。

本研究の調査対象地域である沖縄本島南部地域(以下, 調査地域)は, 那覇市に近接する畑地農業地域であり, 古くから農業用水や生活用水として地下水が利用されている⁷⁾。調査地域では農業用水の確保を図るため, 糸満市及び八重瀬町の1,352haの畑地を対象に国営沖縄本島南部水利事業が実施され(1992年~2005年), 米須と慶座の2カ所の地下ダムによって新たな水資源が開発され, 2006年から農業用水に地下水が利用されている⁸⁾。

調査地域において先行研究⁹⁾がなされているが, 分析対象も調査地域に分布する湧水のみで, 対象とする水質項目も硝酸性窒素にのみに重点が置かれている。そのため, 地下水の水質分類手法として一般的なヘキサダイアグラムやトリニリアダイアグラム等を用いた水質分

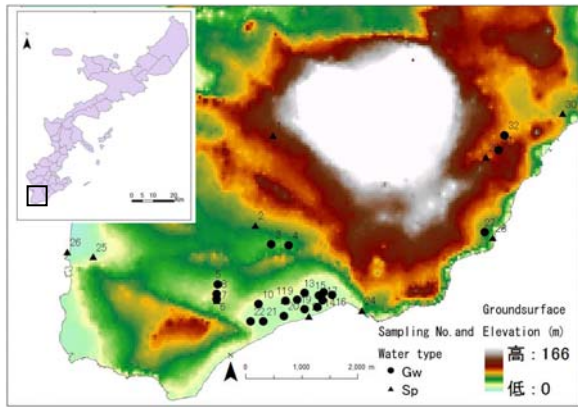


図-1 調査地域の状況と調査観測地点

類や、多変量解析などの統計的分類手法も適用されておらず、調査地域の地下水水質特性に及ぼす自然や人為的な影響を明らかにできているとはいえない。

以上のような状況を踏まえ、調査地域における今後の水質管理を含めた地下水の適正な利用に資する観点から、本研究では、調査地域に分布する湧水と観測井戸を利用した現地観測から得られた主要イオン等のデータに、主成分分析等の多変量解析を適用し、調査地域の地下水水質の統計的分類を実施すると共に、地下水水質への影響因子を考察した。

2. 調査研究概要

(1) 調査地域

調査地域は琉球石灰岩を表層地質とする段丘地形によって特徴づけられ、河川の発達は見られず、地域内には断層が縦横に発達し断層崖に沿って長く続くリッジ状の丘が多く点在している。調査地域には畑地（基幹作物：サトウキビ）が広がり、その間に集落が塊状に点在するとともに、農地利用が困難である断層崖付近に沿って森林が分布している（図-1）。また、調査地域は新第三紀鮮新世の島尻層群を基盤として、第四紀更新世の琉球層群が不整合に覆っているが、この島尻層群は砂岩・泥岩の互層からなる難透水性の地層である。一方、琉球層群は隆起サンゴ礁や有孔虫を由来とする堆積岩で空隙に富み極めて高い透水性を有しており、琉球石灰岩と呼ばれている。地下水は難透水性地盤の島尻層群を受け皿として、多孔質の琉球石灰岩中に貯存され、地下水盆を形成している¹⁰⁾。調査地域の琉球石灰岩の層厚は最大80m程度におよぶが、一般的に20m~30mが多い。

土地利用に関しては、調査地域一面にはサトウキビ畑が広がり、近年、電照菊等の花卉類の栽培も増えており、一部に畜産施設もみられる。窒素負荷源の原単位や負荷率の詳細は吉本（2007）⁹⁾をご参照いただきたいが、サトウキビ畑では2.288kg/m²とされている。

(2) 調査内容・方法

本研究では、図-1に示す32地点（湧水：10カ所、民家井戸：1カ所（ストレーナー位置G.L.-50m）、観測井

表-1 測定項目と分析方法

水質項目	測定方法
水温、pH、電気伝導度（EC） 酸化還元電位（ORP）、溶存酸素（DO）	堀場製作所ポータブル pHメータD-54D-55
陽イオン（Na ⁺ 、K ⁺ 、Mg ²⁺ 、Ca ²⁺ ） 陰イオン（Cl ⁻ 、NO ₃ ⁻ -N、SO ₄ ²⁻ ）	イオンクロマトグラフ法 （DIONEX ICS-1600）
重碳酸イオン（HCO ₃ ⁻ ）	アルカリ度滴定法

（基盤岩に到達するまで全面的にストレーナーを配置）：21カ所）ので採水を行った。観測井における採水深度は地下水面から-5m程度とした。水質測定項目は、水温、pH、電気伝導度（EC）、酸化還元電位（ORP）、溶存酸素（DO）、陽イオン（Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺）、陰イオン（Cl⁻、NO₃⁻-N、SO₄²⁻）、重碳酸イオン（HCO₃⁻）である。また、水質調査は、2011年9月から2012年5月（2012年1月は除く）までの間において月1回の頻度で実施しており、測定項目・分析方法は表-1に示すとおりである。なお、主成分分析とクラスター分析による水質特性の把握に際しては、エクセル統計アドインソフト2012を用いた。

3. 結果と考察

(1) 主成分分析による水質特性の把握

地下水の、水温、pH、EC、ORP、DO、主要な溶存8イオン成分を含めた13項目の水質情報に基づき、調査地域の水質特性を把握・評価する目的で主成分分析を行った。なお、主成分分析に当たっては、32地点における8回の調査より得られた水質サンプルを用いて相関行列による解析を行った。その際、主成分の採用は固有値1.0以上とした¹¹⁾。各主成分の寄与率を表-2に示す。原データに対して、第4主成分までで累計寄与率74.5%が得られており、調査地域の地下水水質は少数個の主成分でその特性を集約できることが確認された。

そこで、主成分負荷量と水質情報の特性づけに先立って、各水質項目に対する負荷量の統計学的な有意性を検証する観点から、負荷量の絶対値が概ね0.3~0.6までの水質情報として第1主成分とDO（負荷量：-0.461）、第2主成分とSO₄²⁻（負荷量：-0.356）、第4主成分とNO₃⁻-N（負荷量：0.565）を選定して、その有意水準について検討を加えた。第1主成分とDO、第2主成分とSO₄²⁻、及び第4主成分とNO₃⁻-Nに係る0.1%有意水準に対応するF値（11.09）の検定値として、それぞれ66.05、35.58、115.04が得られおり、いずれも0.1%以下の水準で有意であるといえる。主成分負荷量の絶対値が0.3以上であれば0.1%の有意水準を満たすことを踏まえ、有意性に係る統計学的な有意性について安全側を確保する観点から、主成分分析から得られた水質項目のうち主成分負荷量の絶対値が0.5以上の水質情報について評価の対象とする水質項目とした。

第1主成分は、Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻のイオン類とECに係る主成分負荷量が0.5以上の正の値を示してい

表-2 主成分分析の結果（主成分負荷量）

項目	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第4主成分
水温	0.177	-0.052	-0.741	-0.195
pH	-0.175	0.523	0.340	-0.292
EC	0.925	0.140	-0.004	0.127
ORP	-0.147	-0.217	0.764	0.026
DO	-0.461	0.159	0.173	0.590
Na ⁺	0.895	0.299	0.091	0.155
K ⁺	0.826	0.097	0.089	-0.176
Mg ²⁺	0.960	0.073	0.089	-0.017
Ca ²⁺	0.231	-0.860	-0.110	-0.070
Cl ⁻	0.882	0.297	0.082	0.187
NO ₃ ⁻ -N	0.062	-0.694	-0.031	0.565
SO ₄ ²⁻	0.804	-0.356	0.011	0.080
HCO ₃ ⁻	0.281	-0.602	0.329	-0.464
固有値	5.117	2.121	1.429	1.016
寄与率 (%)	39.4	16.3	11.0	7.8
累積寄与率 (%)	39.4	55.7	66.7	74.5

る。第1主成分の主成分得点とNa⁺・Cl⁻濃度の関係を検討したところ、両者の間には正の相関（相関係数：0.890、0.1%有意水準に対応するF値（11.09）に対して検定値は932.65であり、0.1%以下の水準で有意）が存在しており、主成分得点はNa⁺・Cl⁻濃度の上昇に対応して高い値が得られることが確認された（図-3、図-4）。また、K⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻は主成分得点が増加するに伴って高くなる傾向を示していることから、第1主成分は、海水や海塩に由来するNa⁺、Cl⁻とともに、施肥や生活排水に起因するK⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻が主な水質評価指標となっていると考えられる。このように、第1主成分は、海水や海塩による自然現象に伴う影響とともに、施肥や生活排水による人間の社会経済活動に伴う影響を反映しており、地下水水質への外的影響要因を表す主成分であるといえる。

また、第2主成分は、pHに係る主成分負荷量が0.5以上の正の値を示す一方で、Ca²⁺、HCO₃⁻、及びNO₃⁻-Nが-0.5以下の負の値となっていることを踏まえ、主成分得点とCa²⁺・HCO₃⁻濃度の関係を検討したところ、両者の間には負の相関（相関係数：-0.761、0.1%有意水準に対応するF値（11.09）に対して検定値は336.24であり、0.1%以下の水準で有意）が存在しており、Ca²⁺・HCO₃⁻濃度は第2主成分の主成分得点の値が高くなるに従って低下している（図-5）。また、Ca²⁺とNO₃⁻-Nの間には正の相関（相関係数：0.535）が存在（0.1%有意水準に対応するF値（11.09）に対して検定値は98.16であり、0.1%以下の水準で有意）しており、野村らが指摘しているように窒素質化学肥料（主に硫酸）によって炭酸塩の溶解促進が図られることから¹²⁾、地下水のNO₃⁻-N濃度には琉球石灰岩溶解に伴う影響が現れているものと考えられる。pHの主成分得点は、石灰岩の溶解に伴うCa²⁺・HCO₃⁻に対応して高い値を示すと考えられることから、第2主成分は石灰岩溶解に由来又は影響されるpH、Ca²⁺、HCO₃⁻、及びNO₃⁻-Nが主な水質評価指標となっており、地下水の流動・滞留に伴う石灰岩の溶解現象を反映している主成分であると解釈される。

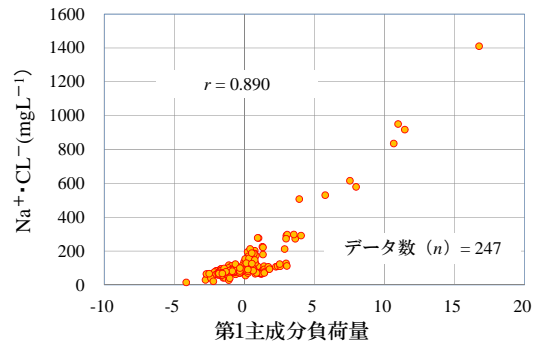


図-3 第1主成分得点とNa⁺・Cl⁻の関係

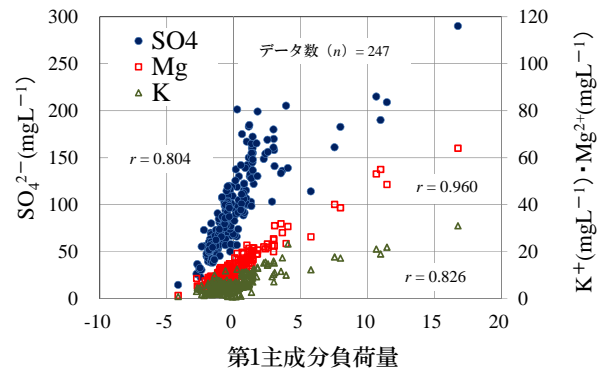


図-4 第1主成分得点とMg²⁺・K⁺・SO₄²⁻の関係

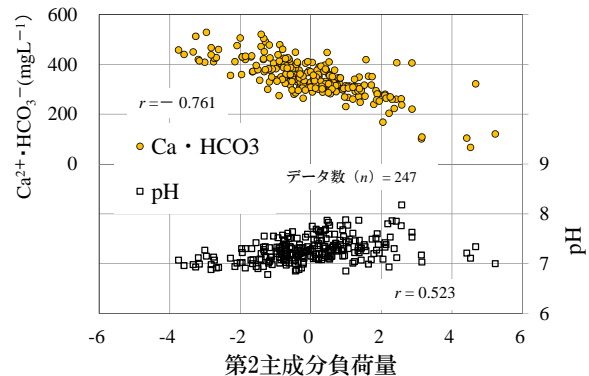


図-5 第2主成分得点とCa²⁺・HCO₃⁻・pHの関係

一方、第3主成分は、ORPが0.5以上の正の値を示すとともに、水温が-0.5以下の負の値となっていることから、水温や酸化還元状況を示すORPが主な水質評価指標となっていると判断される。第3主成分についても、水理地質的条件に応じた酸化還元や地下水流動状況による影響を反映したもので、地下水水質への内的影響要因をあらわす主成分であると考えられる。第4主成分に関しては、DOとNO₃⁻-Nが0.5以上の正の値となっており、地下水中の溶存酸素と窒素成分の硝化状況を表す水質評価指標となっていると解釈される。第3・4主成分についても、水理地質的条件に応じた酸化還元/硝化・脱窒状況や地下水流動状況による影響を反映した水質指標となっており、第2主成分と同じく地下水水質への内的影響要因に係る主成分であると考えられる。

さらに、第1主成分に関与している水質情報のEC、Na⁺、Cl⁻、K⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻は表-3に示すように対数正

表-3 調査地域地下水の水質状況

項目	範囲*	平均値*	無次元化範囲	標準偏差
水温	20.9~26.3	24.1	0.87~1.09	0.04
pH	5.8~8.2	7.3	0.80~1.13	0.03
EC	0.501~3.110	0.872	0.57~3.57	0.38
ORP	140.0~525.0	232.6	0.60~2.26	0.18
DO	0.1~8.0	3.8	0.03~2.09	0.43
Na ⁺	5.6~530.0	47.8	0.12~11.09	1.10
K ⁺	0.8~31.0	6.3	0.13~4.96	0.67
Mg ²⁺	1.4~64.0	13.2	0.10~4.96	0.60
Ca ²⁺	19.0~170.0	108.1	0.18~1.57	0.23
Cl ⁻	9.0~880.6	72.4	0.13~12.16	1.24
NO ₃ ⁻ -N	0.4~22.9	8.7	0.05~2.64	0.43
SO ₄ ²⁻	14.6~290.0	94.3	0.16~3.07	0.45
HCO ₃ ⁻	47.5~378.0	239.1	0.20~1.58	0.23

項目	歪度		尖度	
	正規分布	対数正規分布	正規分布	対数正規分布
水温	-0.633	-0.740	0.209	0.412
pH	-0.175	-0.538	4.077	5.965
EC	4.021	1.923	19.986	6.846
ORP	1.342	-0.002	9.196	1.598
DO	0.120	-2.032	-0.444	7.456
Na ⁺	5.678	1.775	39.094	6.580
K ⁺	2.080	-0.353	6.725	0.631
Mg ²⁺	3.148	0.308	14.148	2.656
Ca ²⁺	1.414	-0.680	3.068	4.458
Cl ⁻	5.696	1.686	38.685	5.985
NO ₃ -N	0.676	-1.539	0.984	4.794
SO ₄ ²⁻	1.006	-0.312	1.487	0.401
HCO ₃ ⁻	-0.178	-2.063	1.099	8.834

注：*の欄の水温、EC、ORPに係る単位はそれぞれ℃、mScm⁻¹、mVであるとともに、DOと陽・陰イオン・重炭酸イオンの単位はmgL⁻¹。

規分布に従った分布特性を示す一方で、第2・3・4主成分に関わる水質項目は水温、pH、ORP、DO、Ca²⁺、HCO₃⁻、NO₃⁻-Nであるが、ORPとCa²⁺を除いてこれらの水質情報は対数正規分布に比べ正規分布に近い分布特性となっている。第1主成分に関与する水質項目は、第2・3・4主成分に関わる水質項目に比較して広い範囲に分布しており、右裾（大きな値）方向に伸びるような非対称な水質分布を示すことによるものと考えられる。第1主成分が海塩等の自然現象や人間の社会経済活動に伴う地下水水質への外的影響を反映したものであるのに対して、第2・3・4主成分は地下水流動に伴う石灰岩溶解現象や酸化還元/硝化・脱窒状況等の水理地質構造による地下水水質への内的影響をあらわしていることも、両者に水質分布特性の相違を生じさせている要因の一つであると推察される。

以上のことから、琉球石灰分布地域においては、i) 海水や海塩による自然現象、施肥や生活排水による人間の社会経済活動、ii) 地下水の流動・滞留に伴う石灰岩の溶解現象、iii) 水理地質的条件に応じた酸化還元状態、iv) 硝酸性窒素の集積・脱窒状況を指標にする4つの主成分で水質の特性づけと評価を行えることが明らかになった。

(2) クラスタ分析による地下水水質の類型化

地下水水質の類型化を図るため、32調査地点について

表-4 クラスタ別の平均濃度

クラスタ	1	2	3	4
水温	24.0	24.1	24.4	24.6
pH	7.3	7.2	7.3	7.2
EC	0.712	0.899	2.620	2.006
ORP	221.8	241.6	211.6	199.0
DO	4.5	3.5	1.6	2.0
Na ⁺	31.0	45.2	381.3	205.8
K ⁺	4.7	6.6	23.3	14.3
Mg ²⁺	9.0	14.3	55.2	32.1
Ca ²⁺	93.8	118.4	106.5	82.3
Cl ⁻	45.2	66.6	646.8	351.8
NO ₃ -N	7.7	9.4	9.3	4.9
SO ₄ ²⁻	64.8	108.3	226.0	165.8
HCO ₃ ⁻	198.3	266.9	274.8	206.9

表-5 クラスタ別の第1~4主成分の主成分得点

クラスタ	1	2	3	4
主成分1	-4.14~0.39	-1.95~4.05	10.66~16.76	3.93~7.98
主成分2	-1.17~4.53	-3.75~1.86	0.235~4.67	1.56~5.23
主成分3	-2.17~2.19	-2.25~4.44	0.53~2.04	-2.07~1.52
主成分4	-1.79~1.90	-3.66~2.42	-0.46~2.75	-0.66~1.66

調査観測毎（データ数247）にウオード法によるクラスタ分析を試みた。まず、同データを用いてクラスタ数として4から7に設定してその規模を検討したところ、クラスタ数の増加に対応してクラスタ分類は細分化されることになるが、クラスタ数を5以上とするとデータ規模数4のクラスタが生じることになる。1クラスタの規模があまり小さくなることを避け、調査地点の水質特性を単純化して類型化する観点から、本研究においてはクラスタ数を4に設定し地下水水質の類型化を行った。クラスタ別の平均濃度を表-4にまとめるとともに、第1~4主成分の主成分得点を表-5に示した。

クラスタ1においては第1主成分に係る得点が - 4.14 ~ 0.34（平均得点： - 1.31）を示しているとともに、第2主成分の主成分得点が - 1.17 ~ 4.53（平均得点： 0.87）の範囲となっている。第3主成分と第4主成分の主成分得点はそれぞれ - 2.17 ~ 2.19（平均得点： - 0.24）、 - 1.79 ~ 1.90（平均得点： 0.21）の領域に存在している。また、Na⁺・Cl⁻とCa²⁺・HCO₃⁻やK⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻等の全ての溶解イオン濃度の平均値が他のクラスタに比較して低いことなどを踏まえると、クラスタ1は海水・海塩や施肥・生活排水等の社会経済活動による影響が少なく、石灰岩の溶解現象と硝酸性窒素による汚染も進んでいないものと考えられる。一方、クラスタ3は第1主成分の得点が10以上の値（10.66~16.76）を示しているとともに、Na⁺・Cl⁻とK⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻の平均濃度が他のクラスタに比べて著しく高くなっている。クラスタ3の第2主成分得点は0.23~4.67（平均得点： 2.55）と正の領域に存在しており、Ca²⁺とHCO₃⁻濃度はクラスタ1に比べて高い濃度水準を示している。第3、4主成分得点はそれぞれ 0.53~2.04（平均得点： 1.16）、 - 0.46~2.75（平均得

表-6 調査観測のクラスター解析による類型化

観測地点	2011				2012				分類結果
	9月	10月	11月	12月	2月	3月	4月	5月	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2		1	1	1	1	1	1	1	1
3	2	2	1	2	2	2	1	1	1/2
4	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6		2	2	2	1	1	1	1	1/2
7	1	2	2	2	2	1	2	2	1/2
8	2	2	1	2	2	2	2	2	1/2
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10		2	2	2	2	2	1	2	1/2
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	2			2	1	2	1	1	1/2
13	2	2	1	2	2	2	1	1	1/2
14	2	2	2	2	2	2	1	1	1/2
15	2		1	2	2	2	2	2	1/2
16	2	2	2	2	2	2	2	2	2
17	2	2	1	1	1	2	2	1	1/2
18	2	2	1	2	2	2	1	2	1/2
19	2	2	1	1	2	2	1		1/2
20	2	2		2	2	4	1	2	1/2/4
21	3	3	3	4	2	2	4	4	2/3/4
22	2	2	2	2	2	2	2	2	2
23	2	2	2	2	2	1	1	1	1/2
24	2	2	2	2	2	2	1	1	1/2
25	1	2		2	2	1	1	1	1/2
26	3	2		2	2	2	1	2	1/2/3
27	1	2	2	2	1	1	1	2	1/2
28	2	2	2	2	1	1	1	1	1/2
29	1	2	2	2	1	1	1	1	1/2
30	1	2	2	2	1	1	1	1	1/2
31	1	2	2	2	1	1	1	1	1/2
32	2	2	2	2	1	2	1	2	1/2

注：各観測地点の月毎のクラスター解析による分類値。分類結果では地点

毎の代表的な類型値を表示

点：1.30) が得られており、DO濃度は低い値を示しているとともに、NO₃-N濃度はクラスター1に比較しての高い濃度水準となっている。このように、クラスター3は嫌氣的条件下にある一方、海水・海塩や施肥・生活排水等の社会経済活動に強く影響されているクラスターであると判断される。

また、クラスター4は第1主成分と第2主成分に係る得点がそれぞれ3.93~7.98 (平均得点：6.30) , 1.56~5.23 (平均得点：2.04) の範囲となっており、Ca²⁺とNO₃-N以外の溶存イオン濃度 (Na⁺・Cl⁻, HCO₃⁻, K⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻) の平均値はクラスター1とクラスター3の中間的な値が得られている。第3主成分と第4主成分の主成分得点は概ね - 4~2の領域 (第3主成分： - 4.33~1.88, 第4主成分： - 3.52~2.07) に分布しているとともに、DOとNO₃-N濃度が他のクラスターに比較して最も低い値が得られていことから、クラスター4は海水・海塩と施肥・生活排水等の社会経済活動による影響に関してはクラスター1と3の中間的な特徴を示す一方で、嫌氣的条件下にあり脱窒の可能性のあるクラスターと推察される。

さらに、クラスター2は第1主成分と第2主成分の主成分得点がそれぞれ - 1.95~4.05 (平均得点：0.35) , - 3.75~1.86 (平均得点： - 0.73) の範囲となっており、Na⁺・Cl⁻, K⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻濃度はクラスター1と4の間の

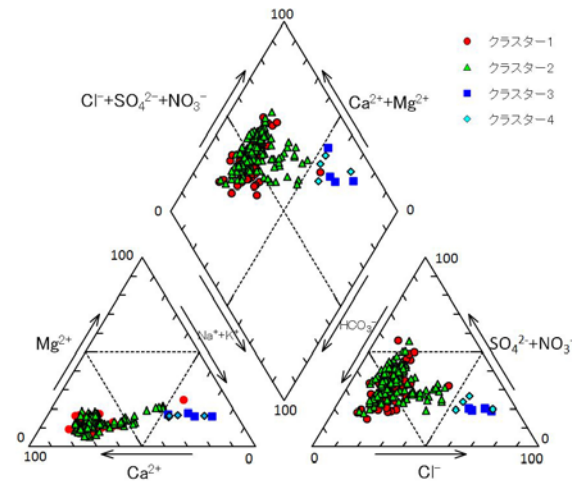


図-6 調査地域水質のトリリニヤダイアグラム

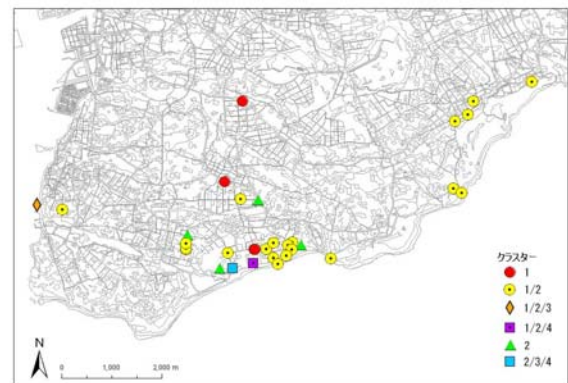


図-7 調査地域水質の平面分布

値であるとともに、Ca²⁺とHCO₃⁻はクラスター3と同じように高い濃度水準を示している。第3主成分と第4主成分に係る得点はそれぞれ - 2.25~4.43 (平均得点：0.14) , - 3.66~2.42 (平均得点： - 0.19) であり、NO₃-N濃度はクラスター3と同じように高い値が得られる。これらのクラスター解析の結果を踏まえると、クラスター2は海水・海塩と施肥・生活排水等の社会経済活動による影響をクラスター1よりも強く受けているとともに、硝酸性窒素の集積も進んだクラスターであると考えられる。その一方で、クラスター2は石灰岩の溶解による影響がクラスター3と同じように強く現れているクラスターであるといえる。

調査地点のうち概ね半数は調査期間を通じてほぼ同じクラスターに分類される一方で、残りの大半の地点では調査時期に応じてそのクラスター分類が異なっていることが確認された (表-6) 。このことから、調査地域の地下水水質については、調査地点によって時期的な影響を受けずに地理的な要因による地点と、その一方で地理的な影響とともに時期的・季節的な影響に左右されている地点があることが明らかになった。このため、トリリニヤダイアグラムより、クラスター分類に従って調査地域の地下水を評価したところ、クラスター1と2のほとんどが炭酸塩硬度型と中間型の領域に幅広く分布するとともに、クラスター3と4はアルカリ非炭酸塩型に属してい

ることが確認された(図-6)。調査地域の水質は、図-7に示すような平面分布となっており、上流域から下流域に向かって海水・海塩や施肥・生活排水等の社会経済活動と石灰岩溶解による影響に伴って、クラスター分類が1から3・4へと移行する傾向が認められるものの、地理的に複雑な空間分布特性を有している。既往の調査成果によると、調査地域には多くの断層や鍾乳洞等に関連する琉球石灰岩の溶解亀裂部が存在し、琉球石灰岩分布地域帯水層の不均一地盤に起因する水理地質構造が影響を与えており、このことが地下水の空間分布特性に反映されているものと考えられる。今後、調査地域地下水の現場水質観測データの蓄積・把握や琉球石灰岩分布地域帯水層特有の不均一地盤水理地質構造を対象とした数値解析等を通じて、地下水の水質組成形成メカニズムについてさらに定量的に考察したいと考えている。

4. まとめ

本研究は、琉球石灰岩分布域である沖縄本島南部地域の地下水水質を多変量解析を用いて統計的に分類したものであり、得られた検討結果は以下のとおりである。

①調査地域の地下水は、炭酸水素カルシウム(Ca-HCO₃)型の特徴を示し、海岸近くでは塩化ナトリウム(Na-Cl)型を呈する調査地点もあり、地下水水質への海水・海塩による影響が示唆された。

②主成分分析の結果、調査地域の地下水水質は第4主成分まででその特性の74.5%を集約できるとともに、i) 海水や海塩による自然現象、施肥や生活排水による人間の社会経済活動、ii) 地下水の流動・滞留に伴う石灰岩の溶解現象、iii) 水理地質的条件に応じた酸化還元状態、iv) 硝酸性窒素の集積・脱窒状況を指標にする4つの主成分で水質の特性づけと評価を行えることが明らかになった。

③第1主成分は海塩等の自然現象や人間の社会経済活動に伴う地下水水質への外的影響、第2・3・4主成分は地下水流動に伴う石灰岩溶解現象や酸化還元/硝化・脱窒状況等の水理地質構造による地下水水質への内的影響を捉えており、このことが両者に関与する水質情報の分布特性に相違を生じさせていると推察される。

④クラスター分析の結果、調査地域の地下水水質は、i) 海水・海塩や施肥・生活排水等の社会経済活動による影響が少なく、石灰岩の溶解現象と硝酸性窒素による汚染が進んでいないクラスター、ii) 海水・海塩と施肥・生活排水等の社会経済活動による影響が少し進み、石灰岩の溶解による影響が強いクラスター、iii) 海水・海塩と施肥・生活排水等の社会経済活動による水質汚染がある程度進行しているクラスター、iv) 脱窒が行われている一方、海水・海塩や施肥・生活排水等の社会経済活動に強く影響されているクラスターに分類することができた。

⑤調査地域の地下水水質は、地理的条件のみで時間的な影響を受けていない地点と、その一方で地理的な影響とともに時期的・季節的な影響に左右されている地点があることが確認された。また、上流域から下流域に向かって海水・海塩や施肥・生活排水等の社会経済活動と石灰岩溶解による影響に伴って溶存イオン濃度が増加する傾向が認められるものの、地理的に複雑な空間分布特性を有している。調査地域には多くの断層や鍾乳洞等に関連する琉球石灰岩の溶解亀裂部が存在し、琉球石灰岩分布地域帯水層の不均一地盤に起因する水理地質構造が地下水水質の時期的・地理的な変動特性に影響を与えているものと推察される。

謝辞

本研究の遂行にあたり、内閣府沖縄総合事務局土地改良総合事務所、沖縄県南部農林土木事務所、沖縄本島南部土地改良区の関係各位に多大の御援助と御協力を頂いたことを記し、深甚の感謝を表します。

参考文献

- 1) Ford DC, Williams PW: Karst geomorphology and hydrology, Springer; 1 edition, 1989.
- 2) Bakalowicz, M: Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology Journal*, 13(1), pp.148-160, 2005.
- 3) Glynn, PD, Plummer, LN: Geochemistry and the understanding of groundwater system. *Hydrogeology Journal*, 13, pp.263-287, 2005.
- 4) Guler, C, Thyne, GD, McCray, JE, Turner, K: Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*, 10, pp.455-474, 2002.
- 5) Bakalowicz, M: Water geochemistry: water quality and dynamics. In: Stanford J, Gilbert J, Danielopol D (eds): *Groundwater ecology*, Academic Press, pp.97-127, 1994.
- 6) Helena, B, Pardo, R, Vega, M, Barrado, E, Fernandez, JM, Fernandez, L: Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga River, Spain) by principal component analysis, *Water Research*, 34(3), pp.807-816, 2000.
- 7) 沖縄総合事務局本島南部農業水利事業所: 沖縄本島南部農業水利事業一技術誌一, pp.7-12, 2006.
- 8) 名和規夫, 青木進, 中尾仁: 沖縄本島南部地区における地下ダムの役割と効果, *農業土木学会誌*, 74 (12), pp.33-36, 2006.
- 9) 吉本周平, 土原健雄, 石田聡, 今泉真之: 米須地下ダム流域における地下水硝酸性窒素濃度の動態について, *農村工学研究所技報*, 206, pp.195-208, 2007.
- 10) 木崎甲子郎: 琉球弧の地質誌, 沖縄タイムズ社, pp.287, 1985
- 11) 田中豊, 垂水共之, 脇本和昌: パソコン統計解析ハンドブックII 多変量解析編, 共立出版, pp.160-175, 1984.
- 12) 野村渉平, 入江満美, 牛久保明邦, 中西康博: 宮古島の湧水口における大気中 CO₂ 濃度と地下水水質との関係, *日本土壤肥科学雑誌*, 82, pp.275-282, 2011.

(2012. 9. 30 受付)