特集『沖縄の陸水環境』

特集報告 [Featured Report]

沖縄における陸水の特徴 (I)

渡久山 章¹⁾

Characteristics of land waters in Okinawa Islands (I)

Akira TOKUYAMA¹⁾

はじめに

沖縄は島嶼県であり、0.01 km²以上の面積をもつ島は160ほどで、そのうち有人島は46ほどである。これらの島々における陸水の化学組成は、1. 海洋からの寄与、2. アジア大陸からの影響、3. 岩石・土壌の溶解、4. 人間活動の影響などによって規定されている。本稿では、陸水の化学組成の成り立ちについて、これら因子の影響を基に考察したい。なお、アジア大陸からの影響については、本誌における東田氏の論考にゆずりたい。沖縄の場合、人間活動の影響としては、軍事基地に派生する事故や有害化学物質による水汚染も考慮されなければならない。

海洋からの寄与

Table 1 に世界の河川水、日本の河川水、沖縄島北部（ダムの水）、南部（湧水）における陸水の化学組成を示した。この表から、沖縄島の陸水は世界や日本のそれらと比べると、Na⁺とCl⁻の濃度が高いことがわかる。このことを説明するため、Fig.1 には沖縄島北部地域の河川水におけるCl⁻濃度を示した。海岸から1 km 地点では30 mg L⁻¹で、そこから1 km 陸側に入るにつれて、Cl⁻濃度はほぼ5 mg L⁻¹ずつ低くなっていくことがわかる。このよ

うな結果から、沖縄の陸水に塩分が多い理由としては、島の面積が小さいこと（1,250 km²）、島の形が細長いこと（長さ120 km、幅は平均で10 km）、台風や季節風も含めて風が強いことなどが挙げられる。風の強さや島の形が陸水の塩分と関係していることは、沖縄島と面積が同じくらいであるが、風速が弱くて形がやや丸い西サモアのUpolu島（1,120 km²）での内陸部の陸水のCl⁻が5 mg L⁻¹以下であることからいえる（Tokuyama et al. Unpublished）。Upolu島での年平均風速は3.0 m s⁻¹（1987-

Table 1. Chemical composition of river waters in the world and Japan, including dam and spring waters on Okinawa Island (mg L⁻¹).

表1. 世界、日本の河川水及び沖縄島のダムの水と湧水の化学組成 (mg L⁻¹).

Area	World ¹⁾	Japan ¹⁾	Okinawa Island	
River, Dam or Spring	River	River	Dam	Spring
Na ⁺	6.3	6.7	16	37
K ⁺	2.3	1.2	0.6	1.3
Ca ²⁺	15	8.8	5.1	113
Mg ²⁺	4.1	1.9	2.4	4.2
Cl ⁻	7.9	5.8	24	42
HCO ₃ ⁻	58	31	25	340
SO ₄ ²⁻	11	10.6	6.3	25
Dissolved SiO ₂	13	19	22	5

1) Average values in the world and Japan. Reference : Y. Kitano (1969).

1) 世界、日本における河川水の平均値。出典：北野康 (1969)。

¹⁾ 元琉球大学・理学部
(連絡先：a-toku@nirai.ne.jp)

Fig. 1. Concentration of Cl^- on the river water of the northern area in Okinawa Island (mg L^{-1}).

図 1. 沖縄島北部地域の河川水における Cl^- 濃度 (mg L^{-1}).

1997, <http://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdo>) であるのに対して、沖縄島那覇でのそれは 4.5 m s^{-1} (日本気象協会沖縄支部, 1989) である。

沖縄島では北部と南部でも Na^+ と Cl^- の濃度に差が見られる。その理由としては、南部は平坦でしかも海岸植生が少ないため、飛沫海塩の飛来が多くなってしまうことが、まず考えられる。後述するように沖縄県北部地域は高島に分類され、南部の低島に比べて飛沫海塩の影響を受けにくいと思われる。それから今後の課題として、沖縄島南部における人口密度の影響も検討されなければならない。

琉球石灰岩からの溶出

溶解量

Table 1 で Na^+ と Cl^- の他、沖縄島北部と南部で違いが見られるのは Ca^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , それに溶存ケイ酸 (SiO_2) 濃度である。このような違いは北部と南部を構成している岩石の違いによる。北部がケイ酸塩岩石からできているのに対して、南部は石灰岩 (琉球石灰岩) からできているためである。

琉球石灰岩地域の地下水に Ca^{2+} 濃度が高いので、石灰岩の溶解量を求めることにした。沖縄地方の降水量は、年平均で $2,200 \text{ mm}$ であり、そのうち 50% は蒸発で、石灰岩地域では降水の 10% が降雨時流出水 (鉄砲水) で、残りの 40% が地下浸透するといわれている (古川, 2003)。この地下浸透量と Table 1 にあげた南部湧水の Ca^{2+} 濃度を基に、反応式 (1) に従って計算すると、溶けてしまう石灰岩の厚さは、 10^3 年間では 10 cm になる。ここで、石灰岩の密度は 2.5 g cm^{-3} (吉村・井倉, 1993) としている。

しかも、石灰岩を溶出させる CO_2 が、土壌中有機物の分解によって供給されていることを考慮する (河田, 1989; 吉村・井倉, 1993) と、石灰岩の溶解は、地表面よりも地下で盛んではないかと思われる。石灰岩地域で洞窟が多いのはこのためではないか。

石灰岩地域で SO_4^{2-} 濃度が高いことの理由であるが、これには石灰岩の下層にあって、基盤を成している島尻層泥灰岩に含まれている黄鉄鉱 (FeS_2) の酸化によることも報告されている (東田ら, 2001)。

石灰岩中の溶液と接している気相中の Pco_2

石灰岩の溶解は CO_2 によって促進される (反応式 (1))。ここで石灰岩中の溶液と接している気相中に存在している CO_2 の分圧 (Pco_2) を求め、大気中 Pco_2 ($10^{-3.5}$ 気圧) と比べることにした。

Table 2 には、全島のほとんどが石灰岩で覆われている宮古島 (160 km^2) 湧水と、そこから 4 km 離れた伊良部島 (30 km^2) における井戸水の化学組成を示した。宮

Table 2. Chemical composition of spring and well waters on Miyako and Irabu Islands (mg L^{-1})¹⁾.

表 2. 宮古島の湧水と伊良部島の井戸水の化学組成 (mg L^{-1})¹⁾.

Spring or well	Miyako Is.		Irabu Is.	
	Boraga spring	Shira-kawada spring	Well I	Well II
pH	7.44	7.62	7.89	6.98
Ca^{2+}	73	94	78	100
Mg^{2+}	1.5	4.7	13.6	13.5
Na^+	31	36	71	84
K^+	1.5	0.7	19	9.4
Cl^-	59	59	110	143
HCO_3^-	189	260	260	352
SO_4^{2-}	22	16	33	18
D- SiO_2	4	5.6	5	5.8

1) Reference: Kaneshima et al. (1979).

1) 出典: 兼島ら (1979).

古島における 2 湧水は、湧水量において、琉球石灰岩地域の湧水を代表するもの。なかでも白川田湧水は、1 日に 2 万トン以上も湧出する大きさである。なお、宮古島では湧水として伊良部島では井戸水としたのは、伊良部島の陸水は淡水レンズを成していて、湧水は存在しないからである。このような水の存在状態は化学組成にも影響し、Table 2 に示したように、伊良部島の Cl^- 濃度は宮古島の 2 倍になっている。

Pco_2 の値を求めるにはまず次式(炭酸の第 I 解離定数)によって H_2CO_3 の活量を求める。

$$[\text{H}_2\text{CO}_3] = [\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]/10^{-6.4} \quad (2)$$

ここで、 $[\text{H}_2\text{CO}_3]$, $[\text{H}^+]$, $[\text{HCO}_3^-]$ は各々の活量で、 $10^{-6.4}$ は炭酸の第 I 解離定数である。従って (2) 式は (3) 式に変えられる。

$$[\text{H}_2\text{CO}_3] = [\text{H}^+] m \text{HCO}_3^- \cdot \gamma \text{HCO}_3^-/10^{-6.4} \quad (3)$$

ここで、 $m \text{HCO}_3^-$ と γHCO_3^- は各々 HCO_3^- のモル濃度と活量係数である。

なお (3) 式において $[\text{H}^+]$ には pH の値を用い、 $m \text{HCO}_3^-$ の値として実測のアルカリ度 (モル濃度) を用いることができる。従って γHCO_3^- を求めれば $[\text{H}_2\text{CO}_3]$ が求められる。すると次の (4) 式を用いて湧水、地下水が接している気相中の Pco_2 を求めることができる。

$$\text{Pco}_2 = [\text{H}_2\text{CO}_3]/10^{-1.47} \quad (4)$$

ここで、 $10^{-1.47}$ は溶液中の H_2CO_3 と気相中の CO_2 間の平衡定数である。

Table 3 に、計算によって求めた $[\text{H}_2\text{CO}_3]$, Pco_2 , ここで求めた Pco_2 が大気中の Pco_2 の何倍に相当するかを示した。宮古島の代表的な 2 湧水が接している気相中の Pco_2 は大気中の 22 倍であること、伊良部島の 2 井戸水のそれは 12 倍と 125 倍であることがわかる。なお、東田ら (2001) は沖縄島の湧水の Pco_2 として、 $10^{-2.3} \sim 10^{-1.1}$ を報告している。

Table 3. Concentration of H_2CO_3 in spring and well waters of Miyako and Irabu Islands, $\text{Pco}_2(\text{I})$ in the air equilibrated with these ground waters, and $\text{Pco}_2(\text{I})/\text{Pco}_2(\text{II})$ ¹⁾.

表 3. 宮古島の湧水と伊良部島の井戸水における H_2CO_3 の濃度、それら地下水と平衡にある気相中の $\text{Pco}_2(\text{I})$, および $\text{Pco}_2(\text{I})/\text{Pco}_2(\text{II})$ ¹⁾.

Spring or Well	Miyako Is.		Irabu Is.	
	Boraga spring	Shirakawada spring	Well I	Well II
$[\text{H}_2\text{CO}_3]$ (mol L ⁻¹)	$10^{-3.59}$	$10^{-3.63}$	$10^{-3.91}$	$10^{-2.87}$
$\text{Pco}_2(\text{I})$	$10^{-2.15}$	$10^{-2.16}$	$10^{-2.44}$	$10^{-1.4}$
$\text{Pco}_2(\text{I})/\text{Pco}_2(\text{II})$	22	22	12	125

1) $\text{Pco}_2(\text{II})$: Partial pressure of CO_2 in the atmosphere.

1) $\text{Pco}_2(\text{II})$: 大気中の CO_2 分圧.

宮古島全域の地下水に含まれている H_2CO_3 を生成する CO_2 量

宮古島全地下水の $[\text{H}_2\text{CO}_3]$ (mol L⁻¹) として Table 3 にあげた白川田湧水の値をとり、降水の 40% が地下浸透するとしたら、1 年間に宮古島の全地下水に含まれている $[\text{H}_2\text{CO}_3]$ は、 $5.4 \times 10^{6.78} \text{ mol y}^{-1}$ となる。

次にこれだけの $[\text{H}_2\text{CO}_3]$ を作るのに必要な CO_2 量を (5) 式を用いて計算する。

(5) 式において $\text{CO}_2(\text{g})$ は $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$ と等モルなので、宮古島の全地下水に含まれている H_2CO_3 を作っている CO_2 量は $2.38 \times 10^{2.78} \text{ t y}^{-1}$ となる。

石灰岩の溶解に関与している CO_2 量を作るのに必要な有機物量

ここで、上記 CO_2 量 ($2.38 \times 10^{2.78} \text{ t y}^{-1}$) を生成するのに必要な有機物量を求めたい。それには有機物として、 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ を仮定して反応式 (6) に従って求めることにした。

結果は、 $1.63 \times 10^{2.78} \text{ t 全島}^{-1} \text{ y}^{-1}$ となる。宮古島の面積を考慮すると、ヘクタール当たり必要な有機物量は、 60 kg y^{-1} となる。

ところで、琉球石灰岩地域の森林におけるリター量は $12\text{--}14 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ とされている (安部, 1980)。ここでは中間の値 (13 t y^{-1}) をとると、 $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ は森林におけるリター量の 0.46% に相当する。

ところで式 (3) によって $[\text{H}_2\text{CO}_3]$ を求めた際、用いた $m \text{HCO}_3^-$ の 1/2 は、式 (1) で示されているように、石灰岩から供給されている。従って土壌中有機物の分解によって生じる CO_2 の下限値は、 $1/2 \times 2.38 \times 10^{2.78} \text{ t y}^{-1}$ となり、これだけの CO_2 を供給するのに必要な有機物量の下限も森林で作られるリター量の 0.23% ほどになる。ただ、ここで問題なのは、有機物として $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ だけを考えていることである。これは今後の課題である。

人の活動の影響

低島における河川水の汚れ

沖縄には前述のように沢山の島があるが、それらは大まかに高島と低島に分けられる (目崎, 1985)。全島が高島だと平野部が少なくなり、全島が低島だと平坦な島になる。全島が高島、低島という島々もあるが、1 つの島の中で 1 部は高島で、他は低島という島もある。沖縄

で最大の沖縄島も北部は高島で、南部は低島である。沖縄島の高島、低島は地質とも関係し、高島はケイ酸塩岩石から成っているのに対し、低島は石灰岩から成っている。高島、低島のうち人が田畑を作り、工場を建設し、住居を建てて活動しやすいのは、低島の方である。沖縄島における 2015 年 4 月 1 日現在での人口密度（人 km⁻²）を調べると、北部地域（恩納村、金武町以北）は、158 であるのに対して、南部のそれは 2,439 である（<http://uub.jp/cpf/okinawa.html>）。従って人の活動の影響を大きく受けるのは、石灰岩から成る南部の方である。

このことは、河川の類型指定にも表われていて、北部の主要 13 河川は全て A 類型、そこから南へ下ってきて中部（高島と低島の境目）の 2 河川は B 類型、さらに南へ下って低島になると、3 河川が C 類型、3 河川が D 類型で 2 河川が E 類型に指定されている（沖縄県、2015）。かつて全国の中でもワースト 10 に入るなど、汚染がひどかった沖縄島中・南部の河川も今では 97% が指定された類型の基準をクリアするまでに至っている（沖縄県、2015）。このことには生活排水対策や下水道の普及など、社会基盤整備の効果が大きく影響していると考えられている（仲宗根、2013）。

河川の水質は改善されつつあるものの、都市河川はコンクリートで 3 面張りにされ、降雨の地下浸透量の減少などがあって、生物の生存場としては、かつての面影はない。かつて（60 年ほど前）子供達は登校時、川でカニやエビなどを採って木の葉に包んでつるし、下校時に持って帰って夕食のおかずに使っていた。現在は類型も低い状態なので、類型を上げていくことも課題である。

米軍基地から派生する水汚染問題

2013 年 8 月 5 日、宜野座村のキャンプ・ハンセンに米軍のヘリコプターが墜落炎上した。墜落現場から約 20 m 離れた所には村民の水源である大川ダムがある。村は事故直後から取水を停止した（沖縄タイムス、2013 年 8 月 6 日）。

その後、米側、県側、宜野座村は水や土壌（表面土壌除去前や後）の分析を行い、翌年 2014 年 8 月 13 日取水を再開できた（宜野座村役場、2015 年）。1 年余も取水できなかったことになる。

Table 4 に 1965 年から 2000 年までの間、米軍基地に由来する水汚染問題の主なものを挙げた。1957 年の“燃える井戸”は、嘉手納町で井戸水の油臭が発覚し、火をつけたら燃えたというものである。この油汚染は町内の井戸に広がり、ある銭湯は廃業を余儀なくされてしまった。1971 年 5 月 21 日には南部上水道組合の水道で、PCP 問題が起こった。調べた結果、ベトナム戦争で使われた PCP の残りが石灰岩採石場跡地に廃棄されていて、降雨で水源まで流れてきたのであった。上水道組合は 5 月 22 日朝給水を止め、6 月 26 日一部の簡易水道が、7 月 6 日には南部上水道の給水が再開されるまで、住民は 1 ヶ月以上も不自由な生活をせざるを得なかった（大山ら、1972）。

1965 年から 2000 年までの間に、在沖米軍基地に由来する環境被害・事象は 28 回に及んでいる。軍基地は金網で囲われていて、中で何がどのように使われ、処理されているか、わかりにくい。住民にとっては大きな問題である。

まとめ

沖縄の島々の面積は、最大の沖縄島でも 1,250 km² しかなく、しかもその島も細長いので飛沫海塩の影響を受けやすい。冬の季節風が強く、アジア大陸からの影響も受けやすい。島々は高島と低島に分けられる。高島はケイ酸塩岩石から成り、低島は琉球石灰岩から成っている。地質の違いは、陸水の化学組成を規定している。低島では人間活動が活発で、河川水や地下水の汚染が見られる。それに米軍基地から派生する水汚染もある。開発や軍基地による汚染問題を解決していかなければならない。

Table 4. Water pollution with the accidents of US military base (1967-2000)¹⁾.

表 4. 米軍基地の事故に由来する水汚染（1967-2000）¹⁾.

Year	Water pollution with the accidents
1967	Burned wells in Kadena. It was caused by the fuel emitted from the Kadena Air Base. A public bath must be stopped.
1971	A head spring polluted with PCP in Gushi-kami Village. Water supply was cut off about a month and a half.
1973	An insecticide dispersed in the camp Zuke-ran outflowed to the coastal waters. It caused a massive death of fish.
1976	A fuel tank for jet plane falled down in Kadena Air Base. It polluted the Hija river.
1989	A fuel for jet plane outflowed. It polluted the Futenma River and a coastal fishing place was damaged.
1998	Dumping of PCB and harmful chemicals in the reservoir of the Kadena Air Base has been known.

¹⁾ Reference: Okinawa Times (2000) : Jan. 1.

¹⁾ 出典：沖縄タイムス（2000）：1 月 1 日号。

文 献

- 東田盛善・佐竹 洋・渡久山章（2001）：沖縄島の湧水と河川水の化学的特徴と同位体組成．地球化学，35：27-41.
- 安部琢哉（1980）：熱帯ジャングルと生物群．琉球の自然誌，木崎甲子郎（編著）：167-181，築地書館，東京．
<http://uub.jp/cpf/okinawa.html>.
<http://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdo>.
- 古川博恭（2003）：地下ダム．宮古の自然と文化，宮古の自然と文化を考える会発行：24-40，新星出版株式会社，沖縄．
- 兼島清・平良初男・渡久山章・大森保（1979）：琉球諸島の各島嶼における水質の研究，琉球大学理学部紀要，第28号：79-118.
- 河田弘（1989）：森林土壌の一般的な理学的性質，森林土壌学概論：99-133．博友社，東京．
- 北野康（1969）：水の科学（NHK ブックス 92），日本放送出版協会．
- 目崎茂和（1985）：琉球弧をさぐる．沖縄あき書房，沖縄．
- 日本気象協会沖縄支部（1989）：沖縄の気象，気候の特徴，山崎道夫・仲吉良功・大城盛三（編著）：5-9，日本気象協会沖縄支部発行．
- 仲宗根一哉（2013）：沖縄の水環境の現状と保全の取り組み．水環境学会誌，36(8)：252-256.
- 大山朝順・森山朝孝・池間修宏・知花義光・大城清昌・金城義勝・田頭政直・大山峯吉・金城喜栄・山城興博・大城紀子（1972）：PCPによる南部上水道汚染について．沖縄県公害衛生研究所報，第6号：73-83.
- 沖縄タイムス（2000）：1月1日号．
- 沖縄タイムス（2013）：8月6日号．
- 沖縄県（2015）：環境白書，平成25年度報告．沖縄県環境部環境政策課（編発行）：8-29.
- 吉村和久・井倉洋二（1993）：CO₂循環における炭酸塩岩溶解の役割．地球化学，27：21-28.