特集『沖縄の陸水環境』

特集報告 [Featured Report]

沖縄の陸水の特徴 (Ⅱ)
石垣島の降水の水蒸気および酸性物質の起源

東田盛善¹⁾

Characteristics of Land Waters in Okinawa Islands (Ⅱ)
Sources of Water Vapor and Acidic Materials in Precipitation
on Ishigaki Island in Okinawa, Japan

Seizen AGATA¹⁾

はじめに

中国では著しい経済成長に伴い大気汚染が深刻な問題になっている。火力発電所や工場などでの石炭の燃焼、自動車の排ガスなどは、微小粒子状物質 (PM_{2.5}) の原因になっている。それらは日本列島に長距離輸送されて大きな社会問題となり、各都道府県において常時監視測定が行われている (大原, 2014)。それで沖縄県八重山地方における降水の起源と大陸から石垣島に長距離輸送される降水中の NO₃⁻ や非海塩性起源 (nss : non sea salt) の SO₄²⁻ (nssSO₄²⁻) について報告することにした。

石垣島は、南西諸島の西南端に位置している八重山群島の中で、行政、経済、教育、交通、物流の拠点である。南には、有人島では日本最南端の波照間島があり、西には日本列島最西端の与那国島がある。与那国島周辺海域は東シナ海を北上する黒潮の源流域であることが知られている。

石垣島は、年平均気温 24℃ の亜熱帯海洋性気候の中にある。気象の特性は、(1) 冬の季節風、(2) 夏の季節風、(3) 季節風の交替、および (4) 梅雨の時期が明瞭である

(気象庁, 1982)。夏季は太平洋高気圧に覆われ、蒸し暑い晴天の日が多く、冬季は大陸高気圧の張り出しで北または北東の風が卓越し、本州の日本海側とよく似た天気になる。大陸から南下してくる寒気団は、黒潮が北上する東シナ海南部海域において海面から水蒸気の補給を受けながら移動してくるので、特有の小雨模様の曇天となる (高良・佐々木, 1990)。

梅雨期 (八重山地方 : 5 月中旬 ~ 6 月下旬) の天候の特徴は曇雨天が続く高温多湿である。降雨は梅雨期と 8 ~ 10 月の台風の時期に集中しており、これらの時期に降水量が少ないと、干ばつに見舞われることがある。

八重山地方の降水の水蒸気の起源

環境水中における水素と酸素の安定同位体は、H および D, ¹⁶O, ¹⁷O および ¹⁸O である。水の安定同位体分子は 9 種類あり、その主なものは H₂¹⁶O (99.73%)、HD¹⁶O (0.032%) および H₂¹⁸O (0.20%) である。これらの水の同位体分子は化学的には水そのものであって溶存化学成分のように、周囲の物質との化学反応によって水と異な

¹⁾ 元八重山高等学校
(agata.s@ictweb.ne.jp)

る挙動をとることはないで、水における D および ^{18}O の存在度の変化は水そのものの挙動を直接反映する。この点に水の D および ^{18}O が標識として用いられることの利点がある（水谷，1986）。水の δD および $\delta^{18}\text{O}$ は大気中の水循環、地表水や地下水を含めた水循環の研究に利用されており、安定同位体水文学は環境水中に含まれる各種安定同位体の地球化学的研究において大きな研究成果を挙げている（Fritz and Fontes, 1980）。水の同位体分子は、それらが持っている質量の差によって同位体組成の変動が生じる。その質量の差が物理的過程や化学的過程で同位体比の変動、すなわち同位体分別を生じさせる同位体効果を起こすことが知られている（松久，1978）。

水の ^2H と ^1H の比、すなわち D/H および $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比は、標準平均海水（SMOW）からの千分偏差（ δ 値）で次のように表される。

$$\delta(\text{‰}) = [(R_{\text{sample}} - R_{\text{SMOW}})/R_{\text{SMOW}}] \times 10^3 \quad (1)$$

ただし、 R_{sample} および R_{SMOW} はそれぞれ試料水と標準平均海水の D/H または $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ である。なお、 $R = \text{D}/\text{H}$ のときの δ 値が δD 値（水素同位体比）、 $R = ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ のときの δ 値が $\delta^{18}\text{O}$ 値（酸素同位体比）である。

一般に世界各地の降水および地表水の δD 値と $\delta^{18}\text{O}$

値の間には天水線（Meteoric Water Line）とよばれる次のような直線関係が認められる（Craig, 1961）。

$$\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10 \quad (2)$$

式 (2) の定数項は、 d 値 (d -parameter) として次のように定義されている（Dansgaard, 1964）。

$$d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O} \quad (3)$$

d 値は海水が蒸発して水蒸気になるときの条件によって決まり、その機構は海面上の気団の相対湿度が低いほど、海面から海水が急速に蒸発し、同位体的に非平衡が生じて、 d 値が大きくなるというものである。そして、その後の降水過程では大きく変化しないことが知られている（Merlivat and Jouzel, 1979）。

石垣島の 1993 年 5 月から 1995 年 5 月までの 1 カ月毎降水の δD および $\delta^{18}\text{O}$ 値は、それぞれ、 $-55 \sim -1\text{‰}$ および $-8.5 \sim -2.6\text{‰}$ の範囲にあった。 δ 値は主に冬季に高いが 1995 年 5 月にもやや高い値を示し、年による違いをみせている（Fig. 1；東田・佐竹，1997）。また、石垣島における 1997 年 12 月 4 日から 1998 年 12 月 5 日までの 1 日毎降水のそれらの値は、それぞれ、 $-95 \sim 11\text{‰}$ および $-13.6 \sim -0.5\text{‰}$ の範囲にあり、主に冬季に高い傾向がみられた。

石垣島において 1 カ月毎に採取された降水の d 値は $8 \sim 25$ の範囲に、1 日毎の降水の d 値は $7 \sim 35$ の範囲にあり、夏季に低く冬季に高い傾向が見られた。1 カ月毎に採取された冬季降水の d 値 ($d \geq 20$) は、夏季 ($d \leq 10$) に比べて高い値を示した（Fig. 1）。

石垣島の降水の δD および $\delta^{18}\text{O}$ 値が、春から秋にかけては Craig の天水線 ($\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$) 上に分布することから、石垣島の春から秋にかけての降水は、おもに湿潤な海洋性気団（小笠原気団）が太平洋からゆっくり海水を蒸発させた d 値の低い水蒸気団によってもたらされていると考えられる。

石垣島の冬季降水の δD および $\delta^{18}\text{O}$ 値は、ほとんどが $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 20$ の直線に沿って分布している。石垣島の降水の d 値と月平均気温の間には、気温が低いときには d 値が高くなる傾向がみられる。Fig. 2（東田・佐竹，1997）には d 値と、海水温（JODC, 1874-2001）と気温の温度差との関係を図示した。 d 値は、その温度差が大きくなる冬季に高くなる。

Merlivat and Jouzel (1979) の求めた相対湿度と d 値の関係から、石垣島の降水の d 値が冬季に約 22 となるためには、海面直上の大気の相対湿度が約 60% になることが求められる。上海はユーラシア大陸から東シナ海への寒気の吹き出し口に当たり、1 月の平均気温が 3.7°C 、

Fig. 1. Relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ values in monthly rainfall on Ishigaki Island from May 1993 to May 1995.

□ : May to Oct. 1993. ■ : Nov. 1993 to Mar. 1994
△ : Apr. to Oct. 1994. ▲ : Nov. 1994 to Mar. 1995
◇ : Apr. and May 1995, and ● : Standard Mean Ocean Water

図 1. 石垣島の 1 カ月毎降水の δD と $\delta^{18}\text{O}$ の関係。

□ : 1993 年 5 - 10 月 ■ : 1993 年 11 月 - 1994 年 3 月
△ : 1994 年 4 - 10 月 ▲ : 1994 年 11 月 - 1995 年 3 月
◇ : 1995 年 4 月および 5 月 ● : 標準海水 (SMOW)

Fig. 2. Relationship between the d -parameter and the difference between surface sea water and atmospheric temperatures for Ishigaki Island.

The monthly surface sea water and atmospheric temperature data are obtained from the JODC (1874 to 2001) and the JMA (1993 to 1995), respectively.

図2. 石垣島の1カ月毎降水の d 値と（海水温－気温）の関係。
1カ月毎の海水のデータ：JODC (1874-2001)
月平均気温のデータ：JMA (1993-1995)

相対湿度が74%である（東京天文台，1994）。東シナ海南部へ吹き出した寒気は，海面より水蒸気の補給を受けて暖められながら徐々に相対湿度を下げていき，海水温が最も高い黒潮本流上（黒潮本流域の平均表面海水温は23.5℃；JODC, 1906-2003）で相対湿度が最も低くなり，蒸発時の平均的な相対湿度が約60%に低下するものと推定される。石垣島の冬の降水の d 値がCraigの天水線から上にずれるのは，このように，冬季には降水をもたらす大陸性気団が黒潮の流れる東シナ海南部の海面から

非平衡下で多量の水蒸気の補給を受けて，そのときに大きな動的同位体分別（Kinetic effect）が行われていると考えられる。

石垣島の降水の d 値についての考察から，ユーラシア大陸および黒潮が流れる東シナ海と太平洋の間に位置する沖縄県八重山地方の降水の水文学的特徴をFig. 3（東田・佐竹，1997）に示した。夏季の降水は相対湿度の高い太平洋上でゆっくりと蒸発した d 値の低い（ $d \approx 10$ ）水蒸気団によってもたらされ，冬季の降水は大陸から東シナ海に南下してくる乾燥した寒気団が暖められながら相対湿度を下げていき，急速に蒸発した d 値の高い（ $d \approx 20$ ）水蒸気団によってもたらされる。

Fig. 2 に示された石垣島の降水の d 値と，海面水温と気温の温度差の関係は次式で表される。

$$d = 1.8 \times (\text{海水温} - \text{気温}) + 12 \quad (r = 0.77, n = 25) \quad (4)$$

d 値と，海面水温と気温の温度差にきれいな直線関係が認められるのは，海面水温と気温の温度差が大きいほど大気は海水によって暖められ相対湿度が低下し，蒸発した水蒸気の d 値が増大するものと推察される（Merlivat and Jouzel, 1979）。

降雨時の海面水温と気温の温度差は冬季に大きい。南西諸島における毎月の海面水温と気温の温度差をFig. 4（Agata et al., 2011）に示した。その温度差は夏季に小さく（-0.7～3.3℃），冬季に大きい（3.7～11℃）。また，南西諸島の北端に位置する種子島，屋久島および中之島の冬季（1月）の温度差（8.7～11℃）は，それら以南の島々の温度差（4.2～6.5℃）に比べて大きい。しかしながら，夏季（8月）には，南西諸島におけるその温度差は3℃以内である。それは，南西諸島における夏季降水

Fig. 3. Schematic diagram of isotope hydrological characteristics in the Yaeyama Islands.

図3. 沖縄県八重山地方の降水の水文学的特徴の模式図。

Fig. 4. Difference between surface sea water and atmospheric temperatures in the Nansei Islands.

Tanegashima (▲), Yakushima (■) and Nakanoshima (●) are representatives of the northern islands, and Yoron Is. (△), Okinawa Is. (□), Miyako Is. (○) and Yonaguni Is. (◆) are those of the southern islands. The monthly sea water temperature data were obtained from the JODC (1874 to 2001). The monthly atmospheric temperatures are average from 1981 to 2010, except for Yoron Is. (2001 to 2006) and Nakanoshima (2003 to 2006). Data for atmospheric temperature were obtained from the JMA (1981 to 2010).

図4. 南西諸島における1カ月毎の(海水温-気温)の変化。
▲：種子島，■：屋久島，●：中之島，△：与論島，□：沖縄島，○：宮古島および◆：与那国島
1カ月毎の海水温のデータ：JODC(1874-2001)，月平均気温のデータ：与論島(JMA, 2001-2006)および中之島(JMA, 2003-2006)以外はJMA(1981-2010)。

の d 値がほとんど同じ値(d 値≒10)になることを示唆している。式(4)に各島における冬季の海面水温と気温の温度差を代入して得られた d 値をTable 1 (Agata et al., 2011)に示してある。その値は南西諸島の北部に位置し、その温度差が大きくなる種子島、屋久島および中之島では25以上になり、奄美大島以南の島々では22以下である。これは、Fig. 3に示される沖縄県八重山地方の降水の水文学的特徴が南西諸島全域に適用できることを示唆している。

大陸起源酸性物質の長距離輸送

降水中の NO_3^- -N

1997年12月4日から1998年12月5日までの1日毎の降水の溶存化学成分濃度を測定した(東田ら, 2006)。

NO_3^- -N濃度は $0.0 \sim 2.8 \text{ mg L}^{-1}$ の範囲(Fig. 5; 東田ら, 2006)にあり、3～4月、7月および10～11月の降水で高く、大陸性気団によってもたらされた12～2月の降水で低い。 NO_3^- -N濃度は10試料で 1.0 mg L^{-1} より高

Table 1. Estimated d -parameter for winter precipitations in Nansei Islands.

表1. 南西諸島の冬季降水の推定 d 値。

Locality	Temperature difference (Nov.-Mar.) * °C	d -parameter **
Tanegashima	7.5	25.5
Yakushima	7.1	24.7
Nakanoshima	7.9	26.2
Amamioshima	5.4	21.7
Tokunoshima	5.2	21.4
Okinoerabu Is.	4.1	19.3
Yoron Is.	4.0	19.2
Okinawa Is.	4.0	19.3
Kume Is.	4.7	20.5
Miyako Is.	4.0	19.2
Ishigaki Is.	3.5	18.3
Hateruma Is.	3.5	18.4
Yonaguni Is.	4.7	20.5

* Temperature difference was calculated by subtracting atmospheric temperature from surface sea water temperature.

Monthly mean surface sea water temperature was obtained from JODC (1874 to 2001). The data from 1981 to 2010 was used for annual atmospheric temperature, except for Yoron Is. (2001 to 2006) and Nakanoshima (2003 to 2006). Atmospheric temperature was obtained from JMA.

**Estimated values were calculated by using Equation (4).

* 温度差は表面海水温と気温の差を計算によって求めた。月平均表面海水温はJODC(1874-2001)の観測値を用いた。年間平均気温は気象庁(1981-2010)の観測値を用いたが、与論島では2001-2006、中之島では2003-2006の観測値を用いた。

**推定 d 値は式(4)を用いて計算した。

く($1.2 \sim 2.8 \text{ mg L}^{-1}$)、それらは台風による2試料(1号、7月11日; 10号、10月17日)、気圧の谷による降水3試料(3月15日、7月29日、10月20日)、高気圧の縁による降水2試料(10月10日、11月10日)、前線による3試料(4月3日、10月25日、11月23日)である。

台湾で発生した台風1号(7月)による降水の NO_3^- -N濃度は 2.8 mg L^{-1} であり、その時の石垣島の風向は東南東(最大風速 11.2 m s^{-1})であった。台風10号(10月)はルソン島(フィリピン)に上陸し、台湾と与那国島の間を通過(南西の風; 最大風速 23.8 m s^{-1})して東シナ海を琉球列島に沿って北上した。その時の NO_3^- -N濃度は 1.9 mg L^{-1} であった。これに対して、台風以外の気象状況により NO_3^- -N濃度の高い降水がもたらされた時、その風向は一例(南南西の風)を除き、北東～北北東の風であり、最大風速は $5.5 \sim 10.1 \text{ m s}^{-1}$ の範囲にあった。このように前線や気圧の谷の通過時の北から北東の風と、台風時の東南東や南西の風の時に濃度が高いことから、 NO_3^- やその前駆物質となる NO_x は大陸や石垣島の南南西に位置する台湾等から輸送されてきたものと考えられる。

Fig. 5. Variations of NO_3^- -N and nssSO_4^{2-} concentrations in daily rainfall on Ishigaki Island.

図 5 石垣島の 1 日毎降水の NO_3^- -N および nssSO_4^{2-} 濃度の変化。

NO_3^- -N 濃度は秋に高い傾向がみられた (Fig. 5)。この時期は、サトウキビの作付けの時期に当たり、 NO_3^- -N のうちのいくらかは散布された化学肥料に由来するものと推察される。

硝酸の主要な生成機構として NO_2 と OH ラジカルとの反応があるが、その OH ラジカルは光化学反応によって生ずる (太田, 1990)。石垣島は亜熱帯気候のもとで強烈な日光にさらされており、硝酸生成に關与する OH ラジカルの生成も多いと考えられる。

非海塩性硫酸イオン

一般的に SO_4^{2-} は海水起源よりも人為起源の方が多く、日本全体の平均では SO_4^{2-} の約 85% が人為起源といわれている (原, 1997)。しかし、石垣島では台風等の強風の影響を受けて、海洋起源のものが約 60% と多くなっている。

観測期間中の非海塩性起源の SO_4^{2-} の濃度 [nssSO_4^{2-}] は $0.0 \sim 9.8 \text{ mg L}^{-1}$ の範囲にあったが、Fig. 5 からわかるように 4 mg L^{-1} 以下が大部分であり、それより高い降水のほとんどは、秋から冬にかけてのものである。秋から冬の期間の nssSO_4^{2-} 濃度が 4 mg L^{-1} 以上の降水では、風向は北東～北北東であり d 値も $20 \sim 35$ とおしなべて高く、大陸からの寒気の吹き出しによってもたらされた降水であることがわかる。このため、これらの降水には大陸起源の物質が多く含まれていると思われる。それ以外では台風 7 号 (9 月 22 日, 7.0 mg L^{-1})、10 号 (10 月 17 日, 9.8 mg L^{-1})、高気圧の縁の不安定な大気 (12 月 28 日, 4.1 mg L^{-1})、それに気圧の谷 (7 月 29 日, 8.0 mg L^{-1}) による

降水でも濃度が高い。月降水量は $91 \sim 448 \text{ mg/m}^2/\text{month}$ であったが、台風が通過した 10 月 ($448 \text{ mg/m}^2/\text{month}$) と冬季の 1 月 ($394 \text{ mg/m}^2/\text{month}$) および 12 月 ($316 \text{ mg/m}^2/\text{month}$) の順に多かった。

nssSO_4^{2-} (非海塩性硫酸) も NO_3^- -N 同様、冬季に卓越する北西の季節風や台風時の東南東や南南西の強風時に、濃度が高く降水量も多いことから、大陸や台湾等から輸送されて来たと推察される。

石垣島降水 (降水量 2429 mm) の nssSO_4^{2-} の年間加重平均濃度は 1.04 mg L^{-1} で降水量は 2.53 g/m^2 であった (東田ら, 2006)。それに対して、屋久島降水 (降水量 3685 mm) の年間加重平均濃度は 1.58 mg L^{-1} で降水量は 5.81 g/m^2 であった (原, 1992)。これらの違いは、Table 1 に示された推定 d 値で説明することができる。

降水の $\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ 比

$\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ 比 (当量比) の 1 雨毎の変化を Fig. 6 (東田ら, 2006) に示してある。この 1 年間の $\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ 比は $0.06 \sim 6.6$ の範囲にある。春夏秋の季節 (4～10 月) は $\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ 比が平均 1.35 であり、夏～秋季 (7～10 月) は平均 1.76 である。これに対して冬季 (11～3 月) は平均 0.47 と低い。石垣島の 1 年間の $\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ 比 (当量比) は 0.64 であり、東京 (0.35)、富山 (0.23) および屋久島 (0.33) と比べて高い (原, 1992; 原, 1997)。このことから、石垣島では冬季に大陸から硫酸の輸送が考えられるにもかかわらず、酸性物質中に占める硝酸の割合が、全国的にみても高いことがわかる。石垣島の $\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ 比が高いことには、前述の光化学反応によ

Fig. 6. Variation of $\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ (equivalent ratio) in daily rainfall on Ishigaki Island.

図 6. 石垣島における 1 日毎降水の $\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ (当量比) の変化.

Fig. 7. Histogram of $\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ (equivalent ratio) in daily rainfall on Ishigaki Island.

図 7. 石垣島の 1 日毎降水の $\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ (当量比) のヒストグラム.

る NO_3^- の生成が促進され易い石垣島の気候条件が関与している可能性がある。石垣島の夏～秋の降水（7～10月）の $\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ 比が 1.76（平均）ときわめて高くなっていることは、その可能性を示唆している。

石炭は硫黄化合物を多く含むため、その燃焼によって生じるガスの硝酸/硫酸の比は石油に比べて低いことが知られている（鶴田，1989）。日本海側の降水の $\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ 比は冬季に低く（0.3 前後）夏季に高い（0.5 前後）ことが知られており、冬季に寒気の吹き出しによって大陸から硫酸等が長距離輸送されることが、その原因とされている（鶴田，1989；原，1997）。また、山神ら（2013）によれば、2011 年 2 月 7 日の $\text{PM}_{2.5}$ 中の $\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ 比は全国的に最も低い値（平均 0.22, $n = 9$ ）になり、 $\text{PM}_{2.5}$ 中の硫酸イオンと硝酸イオンの比率は越境汚染と都市汚染の相対的な影響度の指標になると報告している。

石垣島の降水の観測結果でも日本海側と同様な $\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ 比の季節変化があることが判明した。石垣島における $\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ 比の季節変化が、日本海側と同様の原因であるかどうかを調べるため、 $\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ 比の低い時の気象状況などを検討した。1998 年 1 月 30 日の石垣島降水の $\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ 比は 0.16 ときわめて低かった。この 1998 年 1 月 30 日は、寒気の吹き出しが強く、気象衛星ひまわりの画像に日本海から東シナ海にかけて筋状の雲が認められた。この降水の d 値は 29 ときわめて高く、寒気の吹き出しによってもたらされた雨であることを裏づけている。このことから、石垣島でも日本海側と同様に、寒気の吹き出しの強いときには、石炭の燃焼によって生じた大陸起源の硫酸が飛来していることがわかる。

石垣島の降水の $\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ 比のヒストグラムを春夏秋冬（4～10月）と冬季（11～3月）に分けて Fig. 7（東田ら，2006）に示した。 $\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ 比が 1.0 以下に分布する降水試料は、夏季に 57%，冬季に 92% である。夏季および冬季の算術平均値は、1.35 ($n = 69$) および 0.47 ($n = 39$) であり、冬季の降水で $\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ 比が低くなることが明瞭に示されている。しかし、夏季も $\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ 比は 0.2～6.6 と幅広く分布しており、台風、熱帯低気圧、前線、気圧の谷や高気圧の縁のもとで南南西～南西～北の風向の時に低い。このことは、夏季にも、 nssSO_4^{2-} は島内や台湾ばかりでなく、大陸からももたらされていることを示している。

おわりに

安定同位体を用いた研究手法でユーラシア大陸および東シナ海と太平洋の間に位置する沖縄県八重山地方の降水の水蒸気の起源について報告することができた。また、冬季に寒気の吹き出しによって大陸から硫酸等が長距離輸送されることを $\text{NO}_3^-/\text{nssSO}_4^{2-}$ 比を指標として示した。それを降水の d 値によって裏付け、化学的手法と安定同位体を用いた研究手法の併用によってさらに有効であることを報告することができた。降水の同位体組成に関して日本の島嶼における研究例は少ない。島嶼の沖縄県内において、降水の水素および酸素同位体比や化学成分の挙動を調査しデータを蓄積することは、東シナ海縁海部の同位体水文学や環境地球化学へ寄与するものと考えられる。

文 献

- 東田盛善，佐竹洋（1997）：沖縄県八重山地方の降水および地下水の同位体組成と水文学的特徴. 用水と廃水，39，59-65.
- 東田盛善，隈田昌良，佐竹洋（2006）：石垣島の降水の水素・酸素同位体組成および化学組成の特徴. 地球化学，40，111-123.
- 原宏（1992）：降水. 日本化学会編，陸水の化学. 学会出版，69-78.
- 原宏（1997）：日本の降水の化学. 日化，No.11，733-748.
- 気象庁（1982）：わが国の亜熱帯地方における気象とその予報—主に南西諸島を中心として—. 気象庁技術報告，102，1-181.
- 気象庁（JMA,1981-2010, 1993-1995, 2001-2006）：気象統計情報 (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>)
- 松久幸啓（1978）：酸素と水素の同位体地質学（その 2）. 地質ニュース，285，5-13.
- 水谷義彦（1986）：水文学に望まれる諸問題—安定同位体水文学—. ハイドロロジー，16，74-82.
- 日本海洋データセンター（JODC,1974-2001）：経緯度 1 度メッシュの水温・塩分統計データベース. (<http://jdoss1.jodc.go.jp/cgi-bin/1997/bts.jp>)
- 日本海洋データセンター（JODC,1906-2003）：経緯度 1 度メッシュの水温. 統計データベース. (<http://jdoss1.jodc.go.jp/cgi-bin/1997/bts.jp>)

- 大原利眞 (2014) : PM_{2.5}－現状と課題. 第 29 回全国環境研究所交流シンポジウム「PM_{2.5}の大気汚染動態と健康影響」予稿集, 国立環境研究所, 4-5.
- 太田幸雄 (1990) : 大気エアゾル. 日本化学会編, 大気の科学, 学会出版センター, p121-145.
- 高良初喜, 佐々木正和 (1990) : 沖縄の気象と天気. p85, 95, むぎ社, 沖縄.
- 東京天文台 (1994) : 理科年表. p314, 336, 丸善, 東京.
- 鶴田治雄 (1989) : 東アジアの酸性雨. 科学, 59(5), 305-315.
- 山神真紀子, 佐川竜也, 中戸靖子, 長田健太郎, 米持真一, 山本勝彦, 山田大介, 芝和代, 山田克則, 菅田誠治, 大原利眞 (2013) : 2011 年 2 月上旬に観測された広域的な PM_{2.5} 高濃度エピソードの要因推定. 大気環境学会誌, 48(4), 196-205.
- Agata, S., Satake, H. and Zhang, J. (2011): Isotopic characteristics of hydrogen and oxygen for groundwater of Nansei Islands, Japan. *Radioisotopes*, 60, 203-213.
- Craig, H. (1961): Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702-1703.
- Dansgaard, W. (1964): Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16, 436-468.
- Fritz, P. and Fontes, J. Ch. (1980): Handbook of environmental isotope geochemistry. 1, The terrestrial environment. A, Elsevier, Amsterdam, 1-545.
- Merlivat, W. and Jouzel, J. (1979): Global climatic interpretation of the Deuterium-Oxygen 18 relationship for precipitation. *J. Geophys. Res.* 84, 5029-5033.