

ノート

沖縄島における陸水中トリチウム濃度

仲宗根 峻也*¹, 石津 裕二*¹, 池本 憲弘*^{2, †}, 城間 吉貴*³,
赤田 尚史*^{2, 4}, 田中 将裕*^{2, 4}, 古川 雅英*^{1, #}

(2018年2月27日受付)

(2018年4月16日採択)

Tritium Concentration of Inland Water in Okinawa Island, Southwestern Part of Japan

Shunya NAKASONE,*¹ Yuji ISHIZU,*¹ Norihiro IKEMOTO,*^{2, †} Yoshitaka SHIROMA,*³
Naofumi AKATA,*^{2, 4} Masahiro TANAKA*^{2, 4} and Masahide FURUKAWA*^{1, #}

In this study, to estimate the recent tritium concentration and its variation with latitude and time in Japan, environmental water samples were taken monthly from June 2014 to October 2016 in Okinawa Island, subtropical region of Japan. The inland water samples were taken from two springs and the drop water samples were taken in a limestone cave. The samples were distilled to remove impurities and then electrolysed using electrolytic enrichment system. Each of the enrichment samples was mixed with the liquid scintillation cocktail, and the tritium concentration was measured with a low background liquid scintillation counter. Arithmetic mean \pm standard deviation for the tritium concentration of Morinokawa (spring water), Kakinohanahikawa (spring water) and Gyokusendo (cave drop water) samples were estimated to be 0.13 ± 0.04 Bq L⁻¹, 0.12 ± 0.03 Bq L⁻¹ and 0.13 ± 0.03 Bq L⁻¹, respectively. The comparison between these results and reported data suggested that the latitude effect is one of factors in the relatively low tritium concentration observed in Okinawa Island.

KEY WORDS: tritium, inland water, Okinawa, limestone, latitude effect.

I 緒 論

トリチウム (³H) は半減期 12.3 年で質量数 3 のヘリウム (He) に β 壊変する水素の放射性同位体であり、環境中には天然起源と人工起源のトリチウムが存在している。天然起源のトリチウムは、主に大気高層において

宇宙線の陽子や中性子が大気中の酸素原子や窒素原子と衝突しておこる核反応により生成される。宇宙線によるトリチウム生成率は単位面積当たりに換算して、 $0.20\text{--}0.25$ atom cm⁻² s⁻¹ と推定されており¹⁾、地球の表面積を 5.1×10^{14} m² とすると、年間生成量は $5.8\text{--}7.2 \times 10^{16}$ Bq と見積もられている²⁾。また、宇宙線によるトリチウム生

*¹ 琉球大学大学院理工学研究科；沖縄県西原町千原字 1 番地 (〒903-0213)

Graduate School of Engineering and Science, University of the Ryukyus; 1 Senbaru, Nishihara-cho, Nakagami-gun, Okinawa 903-0213, Japan.

*² 総合研究大学院大学物理科学研究科；岐阜県土岐市下石町 322-6 (〒509-5292)

School of Physical Sciences, SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies); 322-6 Oroshi-cho, Toki-shi, Gifu 509-5292, Japan.

*³ 弘前大学大学院保健学研究科；青森県弘前市本町 66 番地 1

(〒036-8564)

Hirosaki University; 66-1 Hon-cho, Hirosaki-shi, Aomori 036-8564, Japan.

*⁴ 自然科学研究機構核融合科学研究所；岐阜県土岐市下石町 322-6 (〒509-5292)

National Institute for Fusion Science; 322-6 Oroshi-cho, Toki-shi, Gifu 509-5292, Japan.

† 現所属：株式会社化研；茨城県水戸市堀町 1044 (〒310-0903)
Present Address: KAKEN Co., Ltd.; 1044 Hori-cho, Mito-shi, Ibaraki 310-0903, Japan.

Corresponding author; E-mail: m_furu@sci.u-ryukyu.ac.jp

成量と放射壊変による減少量とのバランスにより決定される地球上における平衡存在量は $1.0\text{--}1.3 \times 10^{18}$ Bq と推定されている²⁾。その他、リチウム鉱物と中性子の反応 (${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$) によっても生成されるが、宇宙線生成量と比較してごくわずかである³⁾。

一方、核兵器開発や原子力の平和利用を目的とした技術開発により、人為的に生成されたトリチウムが環境に放出されてきた⁴⁾。1945年から1980年代まで行われた大気圏内核実験により生成されたトリチウムの量は 1.8×10^{20} Bq 程度であると報告されており⁵⁾、その物理半減期に基づく2017年時点の残存トリチウム量は、 1.1×10^{14} Bq と見積もられ、核実験開始前の濃度レベルまで下がりつつある⁶⁻¹⁰⁾。現在の人工トリチウムの主な放出源は、原子力発電所や核燃料再処理施設等である。これらの施設で生成されたトリチウムは管理基準を満たしたのち、計画的に大気や海洋へと放出されている。1998年から2002年までの間に世界中の原子力関連施設から大気放出されたトリチウム量は、大気ガスとして 2.1×10^{15} Bq、水として 87.3×10^{15} Bq であると報告されている⁵⁾。この量は、宇宙線による天然起源トリチウム生成量の20%に相当する。これらに加えて、核融合炉の実用化に伴い、燃料サイクルとして使用されるトリチウムは数 kg 程度（放射能レベルでは約 10^{17} Bq に相当）であるとされており¹¹⁾、今後の環境への大規模なトリチウム放出源になる可能性がある。

環境中に存在するトリチウムは、その存在形態を変化させながら最終的には酸化されて水 (H_2O) となることから、われわれの生活に密接に関わっている。そのため、これまでも原子力施設周辺を中心に、環境トリチウムモニタリングやトリチウムの移行挙動研究が世界各地で行われており¹²⁻¹⁷⁾、高緯度ほど濃度が高く、緯度が低くなるにしたがって濃度も低くなる傾向（緯度効果）があることなどが知られている¹⁸⁻²⁰⁾。その要因としては、大気高層での天然トリチウムの生成量の違いや成層圏大気の大気対流圏への移流速度の違いなどが挙げられる^{7, 21)}。MOMOSHIMA *et al.* (1991) は、日本全国の降水中トリチウム濃度データを取りまとめ、緯度によるトリチウム濃度の変化（緯度効果）について報告している¹⁸⁾。SUGIHARA *et al.* (2008) は、北海道から沖縄県にかけて陸水を採取し、緯度効果について議論すると共に、日本国内では九州南部から沖縄県にかけて最も濃度が低くなることを報告している²⁰⁾。ただし、日本の低緯度地域のデータは限られており、特に沖縄県を含む琉球列島のデータはごくわずかである。本研究では、沖縄県における陸水中トリチウ

ム濃度の時空間分布とその変動傾向を明らかにすることを目的とし、沖縄県における陸水について長期間観測を行うとともに、過去のデータと比較することで日本の陸水中トリチウム濃度の緯度分布について検討を行った。

II 採水と分析

1. 研究対象地域と採水

本研究では、沖縄県の中で最も面積が大きい沖縄島を調査対象地域とした。沖縄島は種子島・屋久島から与那国島に至る琉球列島のほぼ中央に位置している（Fig. 1）。沖縄島の地形は屋嘉付近（Yaka, Fig. 2）を境として北部の山地と南部の丘陵地に区分できる²²⁾。北部の地質は中・古生代の与那嶺層（砂岩・チャート・石灰岩・緑色岩が混在した泥岩）、本部層（石灰岩を主体）、名護層（黒色頁岩～千枚岩を主体とする泥質岩）、嘉陽層（砂岩を主体）からなる。これに対して、南部は新第三紀～第四紀の島尻層群と琉球層群からなり、標高200 m以下の低平な地形が広がっている。主に新第三紀鮮新世の島尻層群は泥質岩が主体であり、侵食されやすい。その上位の第四紀更新世の琉球層群の主体である石灰岩（以下、琉球石灰岩）は侵食に強く、平坦面を伴う台地を形成している²³⁾。

陸水の連続採水地点は、森の川（湧水）、垣花樋川（湧水）と玉泉洞（洞内滴下水）の3地点である（Fig. 2）。

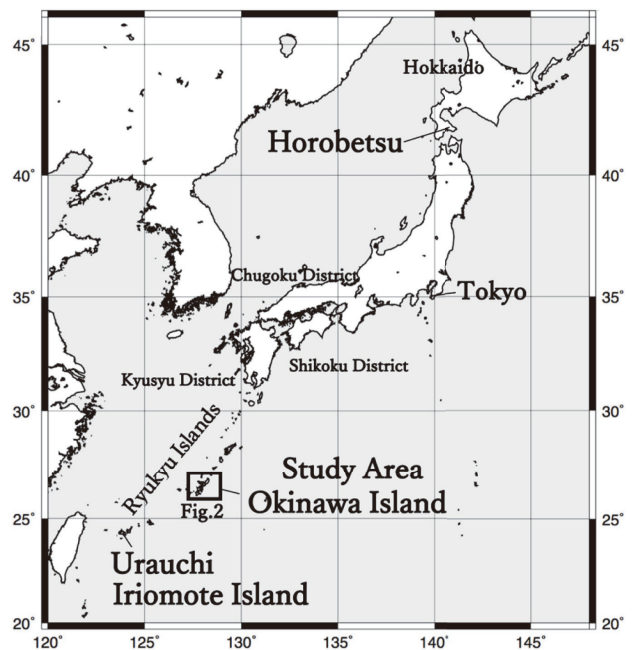


Fig. 1 Location of study area, Okinawa Island, southwestern part of Japan.

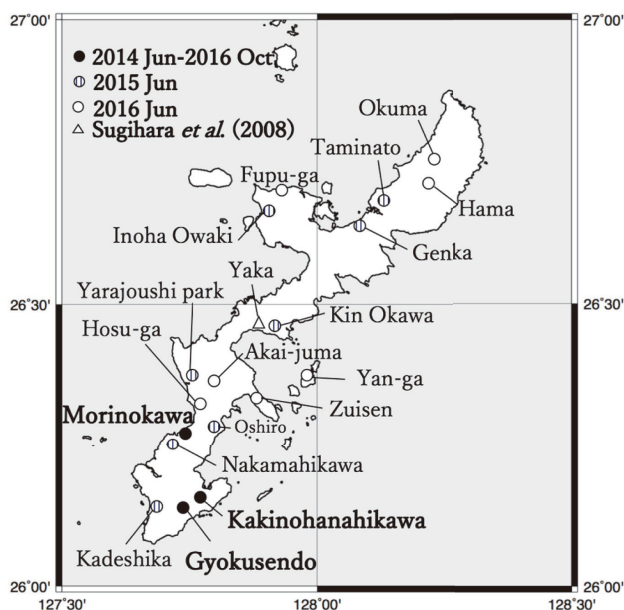


Fig. 2 Location of sampling site in Okinawa Island.

森の川と垣花樋川の集水域は主に琉球石灰岩から成り、新第三紀鮮新世を主体とする島尻層群が基盤となっている²³⁾。つまり、上位の多孔質で透水性が高い琉球石灰岩が、不透水層である島尻層群を不整合で覆っており^{24, 25)}、森の川と垣花樋川の湧水は透水層である琉球石灰岩と不透水層の島尻層群との境界部から湧出している。また、琉球石灰岩上には島尻マージと呼ばれる黄褐色～暗赤色のアルカリ性～中性を呈する土壤が分布している²⁶⁻²⁸⁾。森の川及び垣花樋川では、湧き口近傍においてポリエチレンボトルに約1Lを毎月直接採取した。調査期間は2014年6月から2016年10月である。なお、2016年6月以降は隔月採取とした。

玉泉洞は沖縄島南部に所在する県内最大の鍾乳洞で、厚さ約120mに及ぶ琉球石灰岩体中あるいは基盤岩である島尻層群と上位の琉球石灰岩の不整合面に形成されている²⁸⁾。周辺の地表には島尻マージに相当する褐色土が分布している²⁸⁻³²⁾。本研究では、洞内の天井に形成された鍾乳石になる前段階のストローからの滴下水を採取した。約1Lの試料水を採取するため、採取日前日にガラスボトルをストロー直下に設置し、翌日までに採取されたものを滴下水試料とした。調査期間は2014年6月から2016年10月であり、毎月採水を行った。

さらに、南北約100kmの沖縄島内における陸水中トリチウム濃度の分布を明らかにすることを目的として、沖縄島内全域を対象とした陸水サンプリングも実施した。試料採取地点は2015年6月に8地点（河川1地点、

湧水7地点）、2016年6月に7地点（湧水）である（Fig. 2）。これらの湧水地点では上述した森の川、垣花樋川と同様の採水を行った。また、河川水試料は水が滞留しているところを避けて、ポリエチレンボトルに約1Lを採取した。

2. 試料の調整と分析

採取した試料を実験室に持ち帰り、pHと電気伝導度をpHメータ（AS-712 pH, HORIBA）と電気伝導度計（B-771 COND, HORIBA）により測定した。試料水の約950mLを常圧蒸留して不純物を取り除いたのち、固体高分子膜電解濃縮装置（トリピュアXZO14, ベルメレック電極（株））を用いて電解濃縮を行い、濃縮後の試料水を再度蒸留したものを測定用試料水とした。測定用試料水50mLを145mLの低拡散バイアル内で同量の液体シンチレーター（ULTIMA GOLD LLT, PerkinElmer）と混合し、低バックグラウンド液体シンチレーションカウンター（LB5, Aloka）を用いてトリチウム測定（1,500分）を行った³³⁾。トリチウム濃度については放射能測定シリーズ³⁴⁾に従い、試料計数率からバックグラウンド計数率を差し引いて正味計数率を求めた後、測定供試量及び試料採取日を基準日として半減期補正を行い、クエンチング補正曲線から求めた計数効率を用いて試料中のトリチウム濃度を算出した。

III 結果と考察

2014年6月から2016年10月に採取された森の川（湧水）、垣花樋川（湧水）及び玉泉洞（洞内滴下水）のトリチウム濃度の測定結果をTable 1に示す。また、その時系列変動をFig. 3に示す。トリチウム濃度の算術平均値±標準偏差（濃度範囲）は森の川（21試料）で $0.13 \pm 0.04 \text{ Bq L}^{-1}$ ($0.08-0.22 \text{ Bq L}^{-1}$)、垣花樋川（21試料）で $0.12 \pm 0.03 \text{ Bq L}^{-1}$ ($0.08-0.17 \text{ Bq L}^{-1}$)、玉泉洞（20試料）で $0.13 \pm 0.03 \text{ Bq L}^{-1}$ ($0.08-0.17 \text{ Bq L}^{-1}$)であり、おおむね同程度であった。

沖縄県下に広く分布する琉球石灰岩の典型的な透水係数は $10^{-5}-10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ 程度³⁵⁾であると報告されており、玉泉洞上部に分布する琉球石灰岩の透水係数については $3.5 \times 10^{-5}-3.9 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ と見積もられている³¹⁾。一方、採取地点上部を覆う島尻マージの透水係数が $10^{-7}-10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ であるとの報告³⁶⁾がある。つまり、地表面から不透水層までの地質環境が類似していたため、蒸発や浸透を含む湧出までの過程に大きな違いが生まれず、上記3地点のトリチウム濃度に差がみられなかったと推定

Table 1 Tritium concentration of inland water sample collected from Okinawa Island.

Year & month	Tritium Concentration (Bq L ⁻¹)		
	Morinokawa (Spring)	Kakinohanahikawa (Spring)	Gyokusendo (Drop water)
2014 Jun	–	0.12 ± 0.01	0.17 ± 0.01
Jul	0.18 ± 0.01	0.18 ± 0.01	0.14 ± 0.01
Aug	0.19 ± 0.01	0.14 ± 0.01	0.16 ± 0.01
Sep	0.17 ± 0.01	–	–
Oct	0.22 ± 0.01	0.17 ± 0.01	0.15 ± 0.01
Nov	0.17 ± 0.01	0.15 ± 0.01	0.16 ± 0.01
Dec	0.17 ± 0.01	0.13 ± 0.01	0.16 ± 0.01
2015 Jan	0.18 ± 0.01	0.14 ± 0.01	0.14 ± 0.01
Feb	0.13 ± 0.01	0.15 ± 0.01	0.09 ± 0.01
Mar	0.13 ± 0.01	0.16 ± 0.01	–
Apr	0.12 ± 0.01	0.10 ± 0.01	–
May	0.11 ± 0.01	0.10 ± 0.01	0.10 ± 0.01
Jun	0.10 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.12 ± 0.01
Jul	0.08 ± 0.01	0.09 ± 0.01	0.14 ± 0.01
Aug	0.11 ± 0.01	0.12 ± 0.01	0.11 ± 0.01
Oct	0.12 ± 0.01	0.08 ± 0.01	0.09 ± 0.01
Dec	0.10 ± 0.01	0.10 ± 0.01	0.10 ± 0.01
2016 Feb	0.12 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.13 ± 0.01
Apr	0.09 ± 0.01	0.13 ± 0.01	0.13 ± 0.01
Jun	0.09 ± 0.01	0.10 ± 0.01	0.08 ± 0.01
Jul	–	–	0.13 ± 0.01
Aug	0.13 ± 0.01	0.10 ± 0.01	0.12 ± 0.01
Oct	0.12 ± 0.02	0.12 ± 0.02	0.12 ± 0.01
Mean ± SD	0.13 ± 0.04 (N = 21)	0.12 ± 0.03 (N = 21)	0.13 ± 0.03 (N = 20)

される。なお、3地点とも濃度の若干の減少傾向が認められるが、その要因については今後の濃度の推移を見た上で、沖縄島の亜熱帯島嶼環境も考慮して検討する必要があると考えられる。

次に沖縄島内の広域調査結果（15地点）を **Table 2** 及び **Fig. 4** に示す。沖縄島内における陸水中トリチウム濃度は 0.09–0.14 Bq L⁻¹ の範囲であり、算術平均値 ± 標準偏差は 0.11 ± 0.02 Bq L⁻¹ であった。若干の濃度差はあるが、標準偏差を考慮するといずれの地点もほぼ同程度であると考えられる。森の川、垣花樋川、玉泉洞と比較しても有意な濃度差は認められないことから、沖縄島における陸水中トリチウム濃度は地域によらずほぼ同程度であると考えられる。

前述したように、日本の環境水中トリチウム濃度には緯度効果が認められている^{18–20)}。そこで、本研究で得られた陸水全体のトリチウム濃度 (0.13 ± 0.03 Bq L⁻¹) と、SUGIHARA *et al.* (2008) により報告されている 2003 年から 2005 年にかけて日本各地で採取された河川・湖水中トリチウム濃度²⁰⁾ を **Fig. 5** に示す。なお、SUGIHARA *et al.* (2008) の結果については、2017 年 1 月 1 日の値に換算したものを示す。最も高緯度に位置している北海道の幌別川 (**Fig. 1**) で高濃度 (1.17 ± 0.02 Bq L⁻¹) を示している。一方、本研究による沖縄島の森の川、垣花樋川及び玉泉洞のトリチウム濃度は 0.13 ± 0.03 Bq L⁻¹ であり、SUGIHARA *et al.* (2008) の全国データと比べて最も低

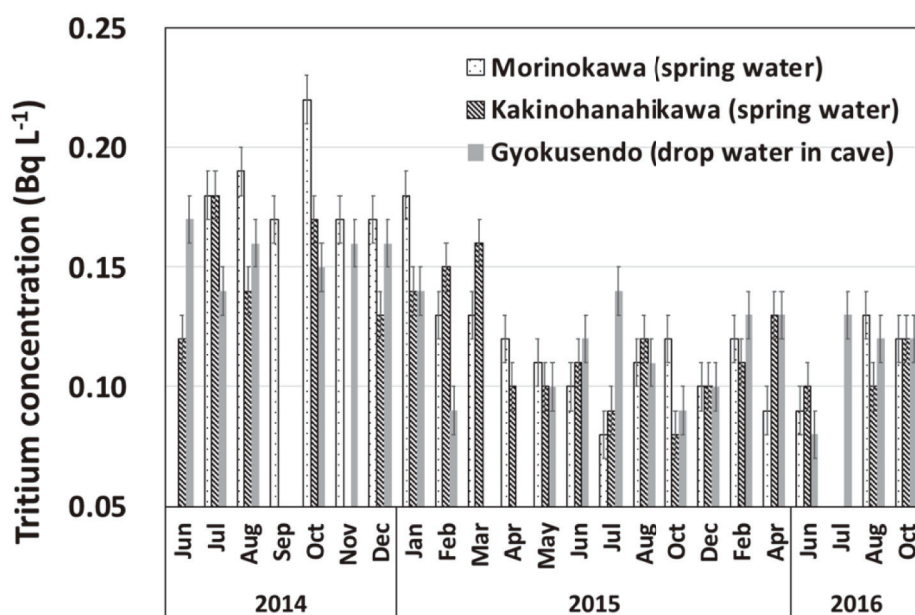
**Fig. 3** Variations of tritium concentrations of inland water samples collected in Morinokawa, Kakinohanahikawa and Gyokusendo (**Fig. 2**) from June 2014 to October 2016.

Table 2 Tritium concentration of spring water sample collected from wide area of Okinawa Island (Fig. 2) in Jun 2015 and Jun 2016.

Year & month	Location	Latitude (degree)	Tritium concentration \pm Standard Deviation (Bq L^{-1})
2015 Jun	Taminato	26.67	0.09 ± 0.01
	Inoha Owaki	26.66	0.09 ± 0.01
	Genka*	26.63	0.10 ± 0.01
	Kin Okawa	26.45	0.10 ± 0.01
	Yarajoushi park	26.37	0.09 ± 0.01
	Oshiro	26.29	0.11 ± 0.01
	Nakama	26.25	0.10 ± 0.01
	Kadeshika	26.13	0.11 ± 0.01
	Arithmetic mean \pm Standard deviation		0.10 ± 0.01
2016 Jun	Okuma	26.72	0.13 ± 0.01
	Hama	26.70	0.14 ± 0.01
	Fupu-ga	26.69	0.12 ± 0.01
	Yan-ga	26.37	0.12 ± 0.01
	Akai-juma	26.36	0.11 ± 0.01
	Zuisen	26.32	0.13 ± 0.01
	Hosu-ga	26.31	0.13 ± 0.01
	Arithmetic mean \pm Standard deviation		0.13 ± 0.01

* River water

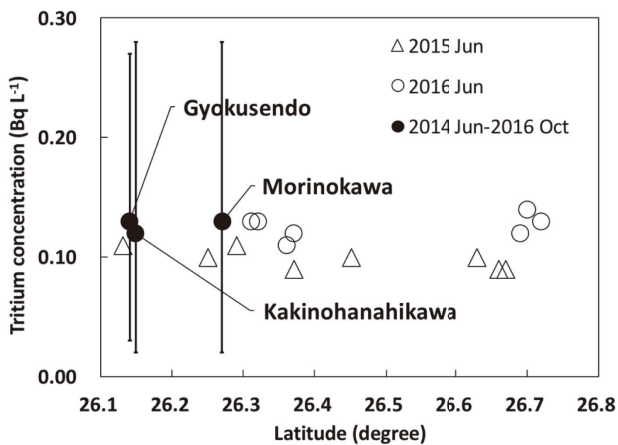


Fig. 4 Tritium concentrations of inland water samples collected from whole area of Okinawa Island (Fig. 2) in Jun 2015 and Jun 2016.

い値となった。また, SUGIHARA *et al.* (2008) の沖縄県のデータである沖縄島屋嘉 ($0.29 \pm 0.01 \text{ Bq L}^{-1}$) (Fig. 2) と西表島浦内川 ($0.33 \pm 0.02 \text{ Bq L}^{-1}$) (Fig. 1) とでは, 同程度の濃度レベルであった。これまでに, 山田ら(1986)も, 日本国内において陸水のトリチウム濃度を測定し, 北海道で濃度が高く, 中国・四国地方, 九州地方と緯度が低くなるにつれて, 濃度が低くなる傾向があることを報告

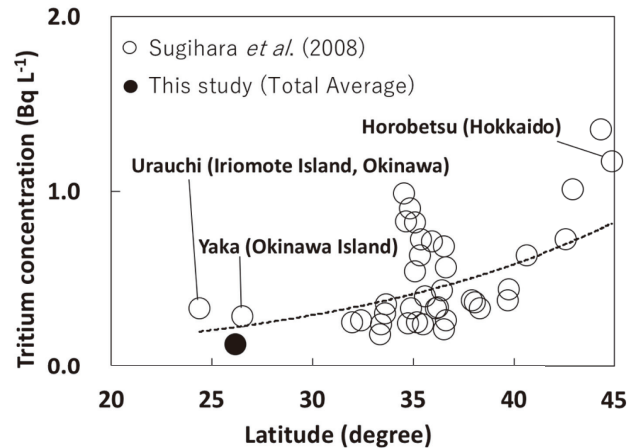


Fig. 5 Comparison of tritium concentration between this study and SUGIHARA *et al.* (2008).²⁰⁾ Locations of Urauchi, Yaka and Horobetsu are shown Figs. 1 and 2.

している¹⁹⁾。また, 高島ら (1989) は琉球列島において, 河川水のトリチウム濃度測定を実施し, 物理半減期による減衰を考慮しても, 全国平均よりも低い値であると報告している³⁷⁾。したがって, 本研究の結果は, これらの先行研究の結果と矛盾しない。ただし, 陸水中トリチウム濃度は, 降水 (大気水蒸気) の起源, 空気塊・気団の移動経路, 地下における滞留時間により変動することが知られている³⁷⁻³⁹⁾ ことから, 本研究の結果についても, その濃度レベルの地球科学・環境科学的背景や濃度変化の要因について, 海洋の影響も含めて今後検討する必要がある。

IV ま と め

沖縄島における陸水中トリチウム濃度を明らかにすることを目的として2014年6月から2016年10月にかけて陸水試料を採取し, トリチウム濃度を測定した。その結果, 従来不足していた日本の低緯度地域における陸水中トリチウム濃度のデータを蓄積することができた。また, 以下の知見が得られた。

- (1) トリチウム濃度は, 森の川 (湧水: 21 試料) で $0.13 \pm 0.04 \text{ Bq L}^{-1}$, 垣花樋川 (湧水: 21 試料) で $0.12 \pm 0.03 \text{ Bq L}^{-1}$, 玉泉洞 (洞内滴水: 20 試料) で $0.13 \pm 0.03 \text{ Bq L}^{-1}$ であり, おおむね同程度であった。これらの陸水は, いずれも降水を起源として琉球石灰岩に浸透した後に湧出しているなど, 地質環境が共通していることが, 明瞭な濃度差がみられなかった要因の一つであると示唆された。

- (2) 上記3地点を含む計18地点における陸水中トリチウム濃度は、標準偏差を考慮するとほぼ同程度であり、有意な濃度差が認められないことから、沖縄島における陸水中トリチウム濃度は地域によらずほぼ同程度であると考えられる。
- (3) 本研究による陸水中トリチウム濃度は過去の報告値よりも低濃度となった。これは主に緯度効果によるものと考えられるが、海洋の影響などその他の要因についても今後検証する必要がある。

謝 辞

本研究は、核融合科学研究所の一般共同研究(NIFS14KLEAO15)及び一般共同研究ネットワーク型(NIFS15KNWAO01)の助成を受けて実施された。なお、開示すべき利益相反状態はない。

参 考 文 献

- 1) B. J. TEEGARDEN; Cosmic-ray production of deuterium and tritium in the earth's atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **72**, 4863–4868 (1967).
- 2) T. UDA and M. TANAKA; History of atmospheric tritium concentrations and measurement of tritiated water vapor, hydrogen and methane gases, *J. Plasma Fusion Res.*, **85**, 423–425 (2009) (in Japanese).
- 3) M. SAKAGAMI; Environmental behavior of tritium, *J. Plasma Fusion Res.*, **54**, 498–511 (1985) (in Japanese).
- 4) N. MOMOSHIMA, M. INOUE, Y. NAKAMURA, T. KAJI and Y. TAKASHIMA; Recent environmental tritium levels in Japan-II Coastal seawater and lake water, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **104**, 141–150 (1986).
- 5) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; Sources and Effects of Ionizing Radiation UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes (1), ISBN978-92-1-142274-0, p. 242–262 (2010).
- 6) Y. TAKASHIMA; Environmental tritium-its behavior and utilization, *Radioisotopes*, **40**, 520–530 (1991) (in Japanese).
- 7) S. OKADA and N. MOMOSHIMA; Overview of tritium characteristics, sources, and problems, *Health Phys.*, **65**, 595–597 (1993).
- 8) S. YABUSAKI, M. TSUJIMURA and N. TASE; Recent trend of tritium concentration in precipitation in Kanto Plane, Japan, *Tsukuba University Land Area Environ. Res. Center*, **4**, 119–124 (2003) (in Japanese).
- 9) S. KIMURA; Analytical technique of tritium in various environmental samples, *Radioisotopes*, **49**, 463–465 (2000) (in Japanese).
- 10) M. KASAHARA, K. KATO, K. YAMAZAKI and N. KON; “Niigatakennai no Kankyoutyu Toritiumu Tyousa” [Environmental tritium research in Niigata], *Niigata Radiat. Monitoring Center Ann. Rep.*, **2**, 31–35 (2004) (in Japanese).
- 11) T. TANABE; Purpose, research targets and achievements, *J. Plasma Fusion Res.*, **88**, 475–429 (2012) (in Japanese).
- 12) N. TAKAHATA, Y. TOMONAGA, Y. KUMAMOTO, M. YAMADA and Y. SANO; Direct tritium emissions to the from the Fukushima Dai-ichi nuclear accident, *Geochem. J.*, **52**, 1–7 (2018).
- 13) P. J. BAPTISTE, D. BAUMIER, E. FOURRE, A. DAPOIGNY and B. CLAVEL; The distribution of tritium in the terrestrial and aquatic environments of the Creys-Malville nuclear power plant (2002–2005), *J. Environ. Radioact.*, **94**, 107–118 (2007).
- 14) S. MARESOVA, E. HANSLIK, E. JURANOVA and B. SEBLAROVA; Determination of low-level tritium concentrations in surface water and precipitation in the Czech Republic, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **314**, 681–687 (2017).
- 15) Q. ZHANG, T. LIU, L. YANG, D. MENG and D. SONG; Monitoring and management of tritium from nuclear power plant effluent, *Earth Environ. Sci.*, **108**, 1–3 (2017).
- 16) F. EYROLLE, L. DUCROS, S. DIZES, K. BEAUGELIN-SEILLER, S. CHARMASON, P. BOYER and C. COSSONNET; An updated review on tritium in the environment, *J. Environ. Radioact.*, **181**, 128–137 (2018).
- 17) P. HARMS, A. VISSER, J. MORAN and B. ESSER; Distribution of tritium in precipitation and surface water in California, *J. Hydrology*, **534**, 63–72 (2016).
- 18) N. MOMOSHIMA, T. OKAI, T. KAJI and Y. TAKASHIMA; Distribution and transformation of various chemical forms of tritium in the environment, *Int. J. Chem. Aspects Nucl. Sci. Technol.*, **54**, 129–132 (1991).
- 19) Y. YAMADA, M. ITOH, I. KATO and M. SAKAGAMI; Geochemical studies on ground waters by their tritium contents, *Geochem. Soc. Jpn.*, **20**, 93–97 (1986) (in Japanese).
- 20) S. SUGIHARA, A. HIROSE, N. MOMOSHIMA and Y. MAEDA; Background tritium concentrations of river and lake

- waters in Japan, *Fusion Sci. Technol.*, **54**, 289–292 (2008).
- 21) H. KAKIUCHI, N. MOMOSHIMA, T. OKAI and Y. MAEDA; Tritium concentration in ocean, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **239**, 523–526 (1999).
 - 22) S. HANAI; Okinawajima no tikei ni tsuite [About the topography of the Okinawa Island], *J. Geogr. Higher Educ.*, **7**, 35–43 (1959) (in Japanese).
 - 23) K. KIZAKI; Okinawajima tyuuhokubu, Okinawajima nanbu [The middle part, the northern part, the southern part of the Okinawa Island], H. FURUKAWA, D. HAYASHI and K. KIZAKI (eds.) “Ryukyuko no Tishitushi” [Geological feature of the Ryukyu arc], p. 99–110 (1985), The Okinawa Times Co., Ltd., Okinawa (in Japanese).
 - 24) N. KANEKO and H. UJIE; Ryukyusougun [Ryukyu Group], N. KANEKO (eds.) “Itoman oyobi Kudakajimatiiki no tishitsu” [Geology of the Itoman and Kudaka Jima district], p. 16 (2006), Geological Survey of Japan, AIST, Ibaraki (in Japanese).
 - 25) K. MIYAGI; “Ginowanshi Shizen Kankyo Tyousa Houkokusho Giyoban” [Natural environments survey papers summary version in Ginowan city], p. 19–28 (2005), Ginowan city, Okinawa (in Japanese).
 - 26) T. HAMAZAKI; Parent materials and soils of Nansei-shoto in Japan, *Pedologist*, **23**, 43–57 (1979) (in Japanese).
 - 27) Y. MAEJIMA; Pedogenesis and classification of Kunigami Mahji, Shimajiri Mahji, and Jahgaru soils distributed in the subtropical islands, Japan, *Pedologist*, **60**, 65–70 (2016) (in Japanese).
 - 28) T. OGATA; “Ryukyurettou ni okeru geopark katudou” [Geopark activity in Ryukyu Island], *Okinawa J. Geogr. Stud.*, 49–50 (2010) (in Japanese).
 - 29) S. YAMAZAKI, Y. FUJITA and Y. NISHIAKI; Excavations of the Bugeido Cave site in 2007 and 2008 seasons, *Bull. Mus., Okinawa Pref. Mus. Art Mus.*, 5–18 (2009) (in Japanese).
 - 30) S. YAMAZAKI; “Excavations Report of the Sakitari-do Cave Site, Okinawa”, p. 1–20 (2014), Okinawa Prefectural Museum and Art Museum, Okinawa (in Japanese).
 - 31) Y. SHIROMA, M. SHIROMA, S. KINA, M. HOSODA, Y. YASUOKA, N. AKATA and M. FURUKAWA; Source of atmospheric radon in the Gyokusendo, a limestone cave in Okinawa, Japan, *Jpn. J. Health Phys.*, **51**, 218–226 (2016) (in Japanese).
 - 32) K. ONAGA and S. GIBO; “Nihon no tokusyudojo—Okinawa no tokusyudojo (Maji, Jagaru)” [The Japanese special soil-The Okinawa special soil (Mahji, Jahgaru)], *Jpn. Soc. Irrigation, Frainage Rural Eng.*, **52**, 520–521 (1984) (in Japanese).
 - 33) N. AKATA, H. KAKIUCHI, N. SHIMA, T. IYOGI, N. MOMOSHIMA and S. HISAMATSU; Tritium concentrations in the atmospheric environment at Rokkasho, Japan before the final testing of the spent nuclear fuel reprocessing plant, *J. Environ. Radioact.*, **102**, 837–842 (2011).
 - 34) Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology-Japan; “Torichiumu bunsekiho” [Tritium analysis], p. 43–65 (2002), Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology-Japan, Tokyo (in Japanese).
 - 35) K. FURUGEN, T. MIYAGI and N. IKEMA; “Investigation of Trichloroethylene and Others in Ground Water on Okinawa”, 113–118 (1992), Okinawa Prefectural Inst. of Public Health., Okinawa (in Japanese).
 - 36) S. GIBO and N. MIYAGI; Permeability in Shimajiri Maaji areas, *Sci. Bull. Fac. Agric. Univ. Ryukyus*, **24**, 449–455 (1977) (in Japanese).
 - 37) Y. TAKASHIMA, S. SHITANDA, S. KIYOKA, D. HUKUDA and H. IMAMURA; Ritou niokeru kankyotoritumu no tokuisei [Specificity of environmental tritium in the remote island], 62050029, p. 57–58 (1989) (in Japanese).
 - 38) J. SHIMADA; The time series variations of tritium concentration in precipitation and its relationships to the rainfall-inducing air mass, *Radioisotopes*, **27**, 709–714 (1978) (in Japanese).
 - 39) H. YOKOYAMA, S. SUGIHARA and N. MOMOSHIMA; Meteorological factors producing variation of tritium concentrations in Fukuaoka, Japan, *Int. J. Chem. Aspects Nucl. Sci. Technol.*, **1**, 421–424 (2011).



仲宗根 峻也 (なかそね しゅんや)

1993年沖縄県うるま市出身。国立大学法人琉球大学大学院理工学研究科物質地球科学専攻博士前期課程2年。現在は沖縄県におけるトリチウムの環境動態研究に取り組んでいる。

E-mail: k178342@eve.u-ryukyu.ac.jp