

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：16201

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K19878

研究課題名（和文）水及び生物体内のトレーサービリティを活用した生物生産環境解析手法の開発

研究課題名（英文）Development of environmental analysis methods based on tracability in water and organisms

研究代表者

山田 佳裕（Yamada, Yoshihiro）

香川大学・農学部・教授

研究者番号：30297460

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：西条平野の水源を、Sbをトレーサーとして定量化した。西条平野の表流水源は、加茂川からの灌漑用水、浅層地下水、深層地下水である。Sb濃度はこれら4つの水源で異なっていた。最高濃度は浅層地下水で $10\mu\text{g L}^{-1}$ 以上、最低濃度は深層地下水で約 $0.2\mu\text{g L}^{-1}$ であった。Sb濃度を用いて、各水路の水源の寄与度を決定した。上流域では鴨川灌漑用水の寄与がほぼ100%であったが、中流域では浅層地下水の寄与が80%を超えた。下流域では鴨川灌漑用水の影響は小さくなり、深層地下水の寄与は50%程度であった。家庭用井戸や農業用井戸から水路に流出する深層地下水が、西条平野の重要な水源であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

集水域の地質的な偏りは、水に反映される。それを利用し、水循環の解析を行った。下流の平野域では、標高差が少なく、人為的な河道変更も加わることで、水動態の解析を行うことが難しい。この研究では、的確なトレーサーを選定することで、水循環解析の低労力・迅速化を行い、この地域の水文データベースの充実に貢献した。気候変動は地域の水循環を大きく変えている。西条市でも地下水の塩水化が起こっており、それを防止するための水利用が求められている。水文情報の定量化は、持続可能な水利用のために不可欠であり、本研究はそのための手法を提供した。

研究成果の概要（英文）：The water source of the Saijo Plain was quantified by using Sb, a geological substance, as a tracer. The surface water sources of the Saijo Plain are diverse, including Kamo River water, shallow groundwater, deep groundwater. The Sb concentration was different between these four sources. The highest concentration was over $10\mu\text{g L}^{-1}$ in shallow groundwater, the lowest concentration was ca. $0.2\mu\text{g L}^{-1}$ in deep groundwater. The contribution of the water origin in each waterway was determined by using the Sb concentration. The contribution of the Kamo River irrigation water was almost 100% in the upstream area, but the contribution of shallow groundwater exceeded 80% in the middle basin area. In the downstream area, the influence of the Kamo River irrigation water became smaller, and the contribution of deep groundwater was about 50%. We found that the deep groundwater discharged from domestic and agricultural wells into waterways is an important source of water in the Saijo Plain.

研究分野：水環境科学

キーワード：アンチモン トレーサー 西条平野 灌漑 地下水 水循環

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本の多くの中小河川は、水利用や治水のため、人為的に水の流れが操作されているが、利水によって取水された水が流域をどのように循環しているのかはほとんど把握されていない。一方で、リスクの少ない水利用を行うには、河川・水路における水源の寄与を定量し、水循環の特徴や脆弱性を把握することが必要である。これにより、水資源の持続可能性や管理のための基盤が構築される。特に地下水の塩水化は不可逆的で一度起こると元には戻らない。既に、西条平野の沿岸部の一部の地下水は塩水化し、地下水の利用が出来なくなっている。塩水化を防ぐためには、持続可能な水資源管理が必要であり、これには地下水のくみ上げと灌漑による水循環の適切な管理が必要になる。

2. 研究の目的

水の動態を解析には、多くの場合、水文データを用いた数値計算、または物質の化学的性質を利用したトレーサーが用いられる。西条平野の水源の1つである加茂川の集水域には、輝安鉱の廃坑があり、アンチモン (Sb) が局所的に存在しているため、各水源ごとに Sb 濃度が大きく違っている。Tokumasu et.al (2023)はこの Sb の偏在性を利用して、Sb をトレーサーとして用いることで、平野部の水起源の解析を行った。本研究では、塩水化を防止し、持続可能な地下水資源の利用を図ることを目的としている。地質トレーサーを用いた水循環の解析から、西条平野表流水の水源を定量し、渇水時における地下水位低下を緩和するための水利用について提言を行う。

3. 研究の方法

調査では、加茂川右岸側に、Stn. 1 から Stn. 43 の地点を設け、河川・水路の水、浅層地下水、深層地下水を採取した (Fig. 1)。採水は2021年8月1日~2日に行った。2021年は梅雨入り後、6月、7月の2か月間の合計雨量が346.5mmと少雨傾向で、採水前13日間、降水は観測されていない。Stn.4 (標高11m)は加茂川からの灌漑用水の取水地点、Stn.14、Stn.15、Stn.20は浅層地下水が湧出している地点で、Stn.26はポンプアップしている浅層地下水、このうち、Stn.14、15、20、26を代表地点とした。Stn.14、Stn.20は、上流からの流入量があるが、微量なため代表地点とした。Stn.12、28、29、40、41、43は深層地下水の採水地点である。河川・水路の地点では、採水時に断面積、流速 (AEM1-D S/No.074、ALEC ELECTRONICS Kobe) を測定し、流量を算出した。

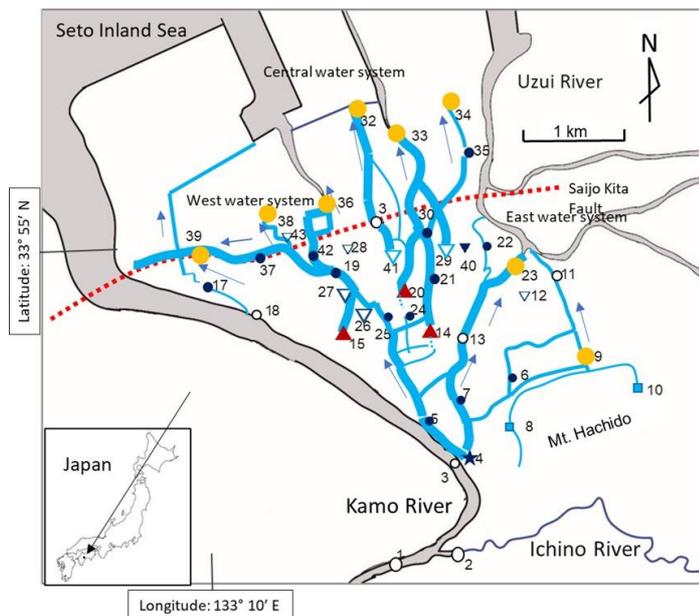


Fig. 1 Waterways in the Saijo Plain
★:Sampling point of Kamo River water ▲:Spring water
▼:Artesian well ●:Stream from Mt.Hachido
○:Waterway ●:End of waterway

採取した水は、現場で直ちに PTFE フィルター (0.2 μm) でろ過し、ポリ容器に保存した。測定は Sb と Si の濃度を ICP-MS 7500cx (Agilent Technologies、Santa Clara) を用いて行

った。地下水位のシミュレーションは、高瀬・徳増(2019)を用いた。

西条平野の河川は3つの水系に分類される。水系は東から、加茂川の灌漑用水に八堂山溪流水と深層地下水が混じる水系1、灌漑用水に浅層地下水(Stn.14、20)と深層地下水が加わる水系2、灌漑用水に浅層地下水(Stn.14、15、26)が加わり自噴地帯を下る水系3である。

加茂川の支流の市之川流域(流域面積17.0 km²)は世界的に有名な輝安鉱が分布する地域である。市之川はStn.4から約1 km 遡った地点で加茂川本流に合流している(Fig. 1)。加茂川の水は合流地点からStn.3付近までは基盤岩でほとんど覆没していないが、Stn.3から下流約2 kmで覆没し、浅層地下水を供給している(西条市2017)。

4. 研究成果

4.1 西条平野のSbとSiの濃度

市之川(Stn.2)では、Sbは126 µg L⁻¹(2021年8月)他の地点より高かった。市之川合流地点より上流(Stn.1)の輝安鉱の影響を受けていない水のSbは最も低く、0.28 µg L⁻¹程度であった。

平野部のSbは水源毎に異なっており、加茂川表流水(Stn.4)は6.55 µg L⁻¹、浅層地下水(Stn.14、15、20、26)は9.8~13.1 µg L⁻¹(11.4 ± 1.31 µg L⁻¹, n=4)、深層地下水はStn.40で0.19 µg L⁻¹、それ以外の地点(Stn.28、29、40、41、43)では若干高い値であった。市之川合流前の加茂川(Stn.1)、八堂山溪流水(Stn.8、10)は0.24 µg L⁻¹以下だった。

水系ごとのSb濃度の変化は、水系1では、上流部のStn.4で6.55 µg L⁻¹、八堂山溪流水が合流後のStn.9では5.94 µg L⁻¹であった。また、浅層地下水が湧出して水路に合流する泉エリアのStn.13では、7.44 µg L⁻¹、自噴エリアにある流末のStn.22とStn.23は、深層地下水が混じり、それぞれ、1.70 µg L⁻¹と6.93 µg L⁻¹であった。水系2では、上流部のStn.5で6.59 µg L⁻¹であったが、泉エリアのStn.14で13.1 µg L⁻¹に上昇し、下流の自噴エリアのStn.30では6.33 µg L⁻¹に低下していた。水系3では、泉エリアのStn.15が起源で9.8 µg L⁻¹、Stn.26が12.3 µg L⁻¹、自噴エリアのStn.42では5.76 µg L⁻¹、Stn.39では5.05 µg L⁻¹に下がった。平野域全体では、Sb値は中流の泉エリアで濃度が上がり、その下流域の自噴エリアで濃度が下がっていた。浅層地下水のSb濃度が高いのは、加茂川下流の河床には、市之川由来の土砂が堆積しており、水の浸透時にSbを溶解しているものと考えられている(Tokumasu et al. 2023)。Sb濃度はStn.2を除き、Lynch et al. 1999による毒性慢性試験(NOAEL 6 mg/kg/day)を基にした日本の公共用水域指針値(0.02 mg/L)を下回っていた。

Siは加茂川表流水(Stn.4)で3.1 mg L⁻¹、浅層地下水(Stn.14、15、20、26)で3.26から3.74 mg L⁻¹(3.45 ± 0.19 µg L⁻¹, n=4)、深層地下水で3.11 mg L⁻¹以上だった。市之川合流前の加茂川表流水(Stn.1)は3.01 mg L⁻¹、八堂山溪流水(Stn.8、10)では12 mg L⁻¹程度であった。平野域全体では、両年ともSiは、上流から中流にかけて徐々に上昇した。

4.2 Sbからみた西条平野の水の起源

Sbをトレーサーとした西条平野の河川の各地点における水源(A~D、Fig. 1)の寄与率を見積もった。Aは加茂川表流水で、代表点はStn.4、Bは浅層地下水で、Stn.14、15、20とStn.26から、それぞれの水系ごとに代表点を定めた(Table 1)、Stn.14、Stn.20は、上流からの流入量があるが微量なため代表地点とされた。Stn.26はポンプアップしている浅層地下水である。Sb濃度が最も低く、加茂川上流部(Stn.1)とほぼ同濃度であったStn.40

を石鎚山中腹で涵養された被圧地下水 C の代表地点とした。D は八堂山からの渓流水である。

当該地点の水源の寄与率 (A ~ D) は、各直上地点 (エンドメンバーおよび周辺地下水) の水源寄与率に、下記の連立方程式により算出された直上地点の混合割合 (X、Y) または (X、Y、Z) を乗じて求めた。Stn.30 の混合率は水源が多いため加茂川河川水 (Stn. 4)、浅層地下水 (Stn.14 と 20 の平均)、深層地下水 (Stn. 41) をエンドメンバーとし、Sb とケイ素 (Si) を用いて 3 元連立方程式により算出された。

$$\begin{cases} x+y=1 \\ Sb_{u1}x+Sb_{u2}y=Sb \end{cases} \quad \begin{cases} x+y+z=1 \\ Sb_{u1}x+ Sb_{u2}y+ Sb_{u3}z=Sb_i \\ Si_{u1}x+ Si_{u2}y+ Si_{u3}z=Si_i \end{cases}$$

X、Y、Z は各直上地点 (エンドメンバーおよび

Sb_{u1}、Sb_{u2}、Sb_{u3} は直上および周辺の加茂川表流水 and/or 浅層地下水 and/or 深層地下水の Sb 濃度

Si_{u1}、Si_{u2}、Si_{u3} は直上および周辺の加茂川表流水 and/or 浅層地下水 and/or 深層地下水の Si 濃度

上流域の加茂川表流水以外の流入が無い Stn.4、5、6、7 では、水源 A (加茂川水) の割合が 100%であった (Table 1)。水系 1 は Stn.13 の泉 (浅層地下水) が混合し、さらに下流で自噴域の深層地下水が混合し最下流域の Stn.11 では加茂川水 A が 58%、浅層地下水 B が 0%、深層地下水 C が 42%であった。水系 2 は加茂川水 A に Stn.13 付近で浅層地下水 B が合流したあと、二つの水系に分かれ、その下流域で深層地下水 C が混合し、B と C の寄与率は、それぞれ、Stn.23 で 20%、7%、Stn.22 で 5%、79%であった (Table 1)。なお水系 1 は末端で渦井川に流下する。水系 2 の最下流では、Stn.34 で C の寄与率が 29%、Stn.33 では、A、B、C の寄与率が順に 16%、19%、65%、Stn.32 では、B、C の寄与率がそれぞれ、21%、79%であった。水系 3 は加茂川水 A が流下した下流の泉エリアで浅層地下水 B が合流し、さらに灌漑期は周辺で灌漑用として浅層地下水 B が多量に汲み上げられており、泉エリアの西部は B の影響が大きく Stn.19 では、B の寄与率が 94%であった (Table 1)。その下流では C が流入し、Stn.36 では A、B、C の寄与率が順に 2%、29%、69%、Stn.38 では、C の寄与率が 20%、Stn.39 では B、C の寄与率がそれぞれ 51%、48%であった。深層地下水に浅層地下水が混じっているのは、浅層地下水と深層地下水を分ける粘土層が連続して分布しておらず、場所によっては被圧地下水に浅層地下水が若干混じっているためだと考えられている (Tokumasu et al. 2023)。

4.3 各地点における流量

加茂川からの導水された灌漑用水は Stn. 4 (水系 1) の流路と Stn. 5 (水系 2, 3) の流路に分割され、Stn. 4 の流量が 0.41 m³ s⁻¹、Stn.5 の流量が 0.34 m³ s⁻¹であった。水系 1 は八堂山の渓流が合流する水路の流末 (Stn. 9) が 0.05 m³ s⁻¹、Stn.13 で浅層地下水し、その下流で深層地下水が混合する Stn. 22 が 0.01 m³ s⁻¹、Stn. 23 が 0.30 m³ s⁻¹であった。水系 2 は Stn.14 と Stn.20 付近で浅層地下水が合流し、流末での流量は Stn. 32 が 0.09 m³ s⁻¹、Stn. 33 が 0.19 m³ s⁻¹、Stn. 34 が 0.16 m³ s⁻¹であった。水系 3 は Stn.25 から加茂川水が流入しているが、流量は 0.035 m³ s⁻¹で、Stn.15 の観音泉や周辺の浅層地下水の湧水や灌漑用井戸の流入と自噴域の深層地下水の割合が大きい。流末での流量は Stn. 36 が 0.08 m³ s⁻¹

1、Stn. 38 が $0.14 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 、Stn. 39 が $0.36 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ であった。

4.4 塩水化軽減のための水利用

西条平野の扇状地の末端(標高 4m 付近)にはいくつもの泉があり、この泉を上流端とする小河川および水路が平野を流下している。西条平野の加茂川右岸は水害を防ぐため、1600年代に堤防の改修工事が行われ、加茂川から自然に流入する水はなく、自然の状態、水路を流れる水源は泉や水路の河床起源の湧水のみである。

水源別にみると、湧水時の 2021 年 8 月 1 日、2 日の流末の合計で、加茂川水が $0.46 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 、浅層地下水が $0.43 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 、深層地下水が $0.45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 、合計 $1.34 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ となり、これらが海へ流出していることがわかった(Table 2)。湧水のため、浅層地下水の湧出は無いため、海へ流出した水はすべて、人為的に供給された水である。

1994 年は灌漑期に雨が少なく、特に 7 月 1 日から 23 日にかけては降水が無く、地下水位の実測値は -2.87m (7 月 23 日) となり、この期間の地下水位低下量は、 -1.29 m であった。沿岸部では塩水化が起こりいちごの苗が枯れるなど農業被害が発生した。この期間の灌漑用水量の実データは無いため、灌漑用の汲み上げ量を高瀬・徳増(2019)のモデルでシミュレーションすると期間平均値は $4.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ であった。

さらに 1994 年 7 月の地下水位低下に及ぼした地下水汲み上げの影響を定量するため、上記モデルを用いた地下水位のシミュレーションを下記の要領で行った。期間は降水が無かった 7 月 1 日から 23 日の 23 日間とし、加茂川流量(この期間の平均値 $3.27 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ と 1994 年平水量 $4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)と気象は当時を反映させ、地下水汲み上げ量を $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 、 $4.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 、 $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ に可変した。

1994 年 7 月 1 日～23 日の無降水期間の実際の日々の加茂川流量(期間平均 $3.27 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)と日々の灌漑用地下水汲み上げ量をシミュレーションした値(期間平均 $4.30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)を用いた場合、23 日後の地下水位は -1.09 m であった。

加茂川流量が $3.27 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の場合、汲み上げ量が $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ではほとんど地下水位は低下しなかったが、汲み上げ量が $4.30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ では 1.09 m 低下した。1994 年の平水流量である加茂川流量が $4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の場合も、汲み上げ量が $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ではほとんど地下水位は低下しなかったが、汲み上げ量が $4.30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ では、 0.85 m の低下であった。

湧水期でも汲み上げ量が $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 程度であれば、ほとんど地下水位低下は起こらない。2021 年 8 月 1 日～2 日の湧水時の調査では、加茂川右岸側水路末端の流末の流量は加茂川水 $0.46 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 、浅層地下水 $0.43 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 、深層地下水 $0.45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 、合計 $1.34 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ であった。この流量調査は加茂川右岸と渦井川西部のみの調査であるが、西条平野全体の田面積に対する調査地域の田面積の割合は 73%であることから、平野全体に換算するとそれぞれの流出量は加茂川水が $0.53 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 、浅層地下水が $0.59 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 、深層地下水が $0.62 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ が海へ流下していることが言える。加茂川から導水された灌漑用水を流路変更で 100%使用し、深層地下水の汲み上げ量の節減を図ると、浅層地下水を水路の藻類等の生態系の維持流量に加えて、地下水塩水化が防止できることが考えられる。この結果から数十年に 1 度の湧水期でも、加茂川からの導水の配分を効率化し、地下水の汲み上げ量を適切に管理すれば、塩水化のリスクが大幅に低下することがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Minoru TOKUMASU, Ki-Cheol SHIN, Yoshihiro YAMADA | 4. 巻 24 |
| 2. 論文標題 Determination of the origin of surface water in the Saijo Plain, Japan, using antimony as a geochemical tracer | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Limnology | 6. 最初と最後の頁 71-81 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10201-022-00711-4 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 徳増 実, 申 基澈, 山田 佳裕 |
| 2. 発表標題 微量元素をトレーサーとした西条平野の窒素・リン負荷の解析 |
| 3. 学会等名 JpGU Joint Meeting 2020（国際学会） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 徳増 実, 申 基澈, 山田 佳裕 |
| 2. 発表標題 微量元素をトレーサーとした西条平野の窒素・リン負荷の解析 |
| 3. 学会等名 第9回同位体環境学シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Minoru Tokumasu, Ki-Cheol SHIN, Yoshihiro YAMADA |
| 2. 発表標題 Analyzing the origin of surface water in the Saijo Plain, Japan, based on the antimony concentration in the water |
| 3. 学会等名 JpGU 2019（国際学会） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 徳増実・山田佳裕 |
| 2. 発表標題 西条平野における中小河川の物質循環と水の起源 |
| 3. 学会等名 日本陸水学会大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名 徳増実・山田佳裕 |
| 2. 発表標題 アンチモンからみた西条平野表流水の起源 |
| 3. 学会等名 第8回同位体環境学シンポジウム |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 徳増 実, 山田 佳裕, 申 基澈, 高瀬 恵次 |
| 2. 発表標題 地質トレーサーによる水循環解析からみた西条平野における塩水化リスクの緩和 |
| 3. 学会等名 第13回同位体環境学シンポジウム |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 TOKUMASU Minoru, YAMADA Yoshihiro, SHIN Ki-Cheol, TAKASE Keiji |
| 2. 発表標題 Reducing the risk of salinization in the Saijo Plain through hydrological analysis using geological tracers |
| 3. 学会等名 JpGU Joint Meeting 2024 (国際学会) |
| 4. 発表年 2024年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---|--|----|
| 研究分担者 | 大森 浩二 (Omori Koji) (10152258) | 愛媛大学・社会共創学部・教授 (16301) | |
| 研究分担者 | 井上 幹生 (Inoue Mikio) (10294787) | 愛媛大学・理工学研究科(理学系)・教授 (16301) | |
| 研究分担者 | 申 基子ヨル (Shin ki-cheol) (50569283) | 総合地球環境学研究所・研究基盤国際センター・准教授 (64303) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|