

水の安定同位体追跡を組み込んだ水田流出モデルの開発 Development of a Paddy Runoff Model Capable of Tracing Water Stable Isotope Variations

○前川洋貴^{*,**} 船石優里^{***} 中桐貴生^{*} 堀野治彦^{*} 櫻井伸治^{*}

○Hiroki MAEKAWA^{*,**}, Yuri FUNAISHI^{***}, Takao NAKAGIRI^{*}, Haruhiko HORINO^{*},
Shinji SAKURAI^{*}

1.はじめに 河川から多くの取水がなされる一方で、河川への還元水量も多い水田農業は、河川流況へ大きな影響を及ぼしていると考えられる。しかし、河川水から水田還元成分のみを分離して測定することは難しく、その実態はまだ解明されていない。こうした中で、地表水における酸素・水素安定同位体比（以下、同位体比）を指標にすれば、蒸発による同位体分別が卓越する田面水に由来する水とそれ以外を明確に識別できることから、これを応用することでその解明が期待される。しかし、田面水における同位体比は降水や灌水などによっても変動することから、まずはその変動機構を説明できるようになる必要がある。本研究では、兵庫県千種川流域を対象に水田の湛水管理を考慮した水収支モデルを作成し、田面水における同位体比の変動追跡計算を行い、推定精度を検証した。

2.研究方法 (1) **モデルの概要** 既存の水田流出モデルを参考に、水田の耕盤より上部を模した1段のタンク構造（Fig.1）とした。対象地域のJAが発行する資料を参考に維持湛水深パターンを作成し（Fig.2）、これに基づき湛水管理がなされるものとした。タンク内水収支および同位体収支を降水、灌水および蒸発散の影響を考慮して同時に追跡し、田面水の同位体比（ δ 値）の変動を推定した。蒸発による同位体分別は平衡分別と動的分別の両方を考慮した以下の Gonfiantini 式¹⁾に従うものとした。

$$\left. \begin{aligned} \delta_t &= \left[\left(10^{-3}\delta_{i0} - \frac{A}{B} \right) f_t^B + \frac{A}{B} \right] \times 10^3 \\ A &= \frac{h \cdot 10^{-3}\delta_a + 10^{-3}\Delta\epsilon + 1 - \alpha^*}{1 - h + 10^{-3}\Delta\epsilon} = \frac{h \cdot 10^{-3}\delta_a + 10^{-3}\epsilon}{1 - h + 10^{-3}\Delta\epsilon} \\ B &= \frac{h - 10^{-3}\Delta\epsilon - (1 - \alpha^*)}{1 - h + 10^{-3}\Delta\epsilon} = \frac{h - 10^{-3}\epsilon}{1 - h + 10^{-3}\Delta\epsilon} \end{aligned} \right\} (1)$$

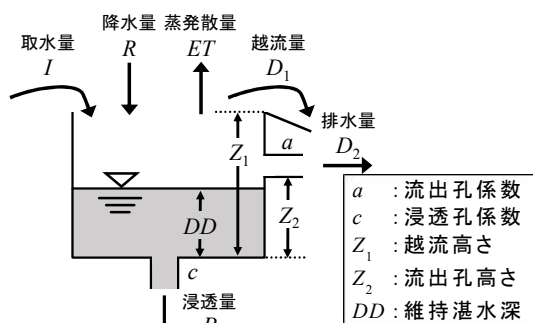


Fig.1 Schematic of paddy runoff model.

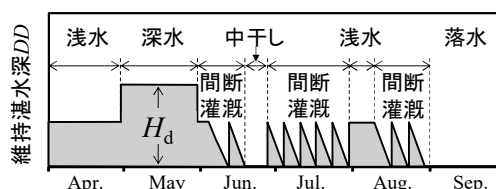


Fig.2 Water management pattern.

δ_t : 液相の δ 値	δ_a : 大気水蒸気の δ 値
δ_{i0} : 液相の初期 δ 値	ϵ : 有効同位体濃縮係数
f_t : 液相残存率	$\Delta\epsilon$: 動的同位体濃縮係数
h : 相対湿度	α^* : 平衡分別係数 α の逆数

(2) **使用データ** 現地の6農家による田面水の採取協力が得られた2019年および2023年を対象に検討した。モデルへの入力データはTable1・Table2のとおりである。蒸発散量は各種気象データよりPenman式を用いて推定した蒸発散位に、湛水の有無を考慮した蒸発散係数を乗じて用いた。式(1)の液相残存率の計算に必要な実蒸発量は蒸発散量に分配係数を乗じて推定した。降水の同位体比は季節変動を考慮して温暖期(3～9月)および寒冷期(10～2

* 大阪公立大学大学院農学研究科 Graduate School of Agriculture, Osaka Metropolitan University

** 株式会社三祐コンサルタンツ Sanyu Consultants Inc.

*** サンスイコンサルタント株式会社 Sansui Consultant

キーワード: 水の酸素・水素安定同位体比, 水田還元水, 水田モデル

月)に分け、各平均値を用いた。灌漑用水の同位体比は調査水田の位置する標高 100 m 付近で採取された河川水の同位体比を平均して用いた。

(3) モデルの適用 上記のデータを使用し、Excel のワークシ

ート上で田面水における同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) を日単位で追跡計算した。現地で採取した全ての田面水の実測同位体比との RMSE が最小になるよう各パラメータを同定

し、両 δ 値の再現精度を検証した。なお、浸透孔係数 c は適正日浸透量を想定して設定された浸透量 P と、深水管管理時の維持湛水深 H_d から $c = P/H_d$ で求めた値を適用した。

3.結果および考察 2023 年に調査した水田の 1 つを例に挙げ、実測値と計算値を比較した (Fig.3)。時期ごとに多少の精度の違いはあるものの、蒸発作用を受けて徐々に同位体比が上昇し、降水や灌水により下降する変動を概ね再現することができた。また、Fig.3 の比較結果を δ ダイアグラム上で示したものが Fig.4 である。図中には温暖期における降水の平均値とローカル天水線 (対象地域における降水の $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^2\text{H}$ の回帰直線) を示した。実測値のプロットは天水線より

下部の広い範囲にわたって直線的に分布しており、蒸発濃縮の作用によりその直線関係の勾配は、天水線のものより小さくなることが示された。さらに、計算値は実測値と同様の範囲にプロットされ、同様の勾配を持つことが確認された。平均相対誤差は、2019 年が $\delta^{18}\text{O}$: 17%, $\delta^2\text{H}$: 14% で、2023 年が $\delta^{18}\text{O}$: 16%, $\delta^2\text{H}$: 11% であり、モデルの精度は計算期間内で $\delta^{18}\text{O} \cdot \delta^2\text{H}$ ともに大きな差異はなく概ね良好な再現性を示した。

4.おわりに 蒸発濃縮で変動した同位体比を推定可能なモデル式を水収支モデルに適用し田面水の同位

体比変動を追跡するモデルを開発した。その結果、複雑で大きく変動する田面水の同位体比を良好な精度で追跡することができた。本モデルを流域水収支モデルに適用することで水田からの還元水が河川流況に与える影響を流域レベルで定量評価できるようになることが期待される。なお、本研究は人間文化研究機構基幹研究プロジェクト「人新世に至る、モノを通した自然と人間の相互作用に関する研究」の成果である。引用: 1) Gonfiantini R. (1986): CHAPTER3, ENVIRONMENTAL ISOTOPES IN LAKE STUDIES., Handbook of Environmental Isotope Geochemistry 2, 2) 中桐ら (2022): 2022 年度 NN 学会大会講演会要旨集, 351-352

Table1 Outline of meteoric data.

項目	取得方法
降水量	アメダス (佐用)
気温・相対湿度	アメダス (一宮)
その他気象データ	アメダス (姫路)

Table2 Outline of water stable isotope data.

項目	算出方法	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$
降水	降水の実測値平均 (2022/6~2023/7)	温暖期 (3~9月)	-8.31
		寒冷期 (10~2月)	-7.65
灌漑用水	河川水の実測値平均 (2022/6~2023/5)	-7.73	-48.36
大気水蒸気	蒸発実験による推定値 ²⁾	-19.00	-123.00

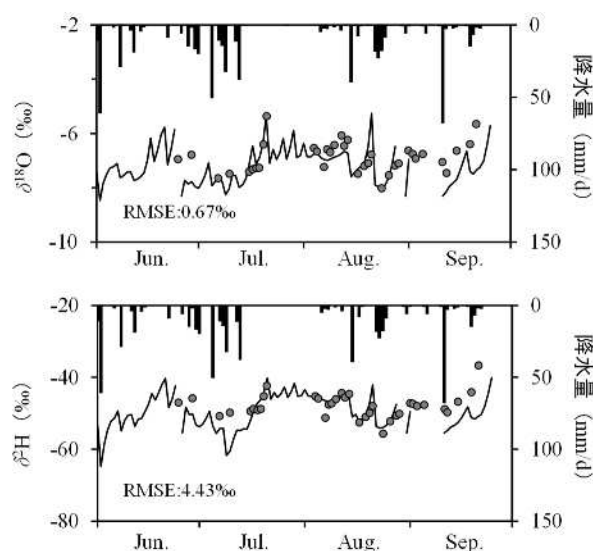


Fig.3 Comparison of measured and calculated values.
(upper low: $\delta^{18}\text{O}$, lower low: $\delta^2\text{H}$)

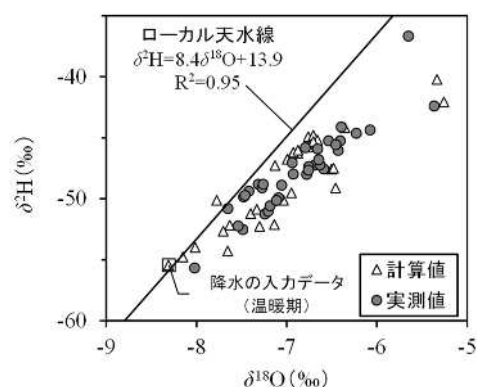


Fig.4 Measured and calculated values with local meteoric water line in δ -diagram.