

## 雨水ハーベストシステムにおける灌漑水量と累積トマト収量の入出力関係 Input-output relationship between the amount of irrigated water and the accumulated yield of tomato in a rainwater harvesting system

○石原弘輝<sup>a</sup>, 宇波耕一<sup>a</sup>, 藤原正幸<sup>a</sup>, 田尾本昭<sup>b</sup>  
Hiroki Ishihara, Koichi Unami, Masayuki Fujihara, Akira Taomoto

### 1. はじめに

世界の陸地の約38%は乾燥・半乾燥気候の気候区分に属しており、その気候特性である不規則な降雨と長期にわたる乾季が農業生産に与える影響は非常に大きい。とりわけ、半乾燥地においては、雨季に生じる不規則かつ集中的な降水イベントによって土壌水分状態が大きく左右される。そのため、天水農業によって得られる作物収量は年毎に不安定である。すなわち、半乾燥地農業においては降水を貯留し、補給灌漑に利用して生産性を向上させることが重要となる。雨水ハーベストシステムは、半乾燥地における小規模農業の農業生産の増収に効果的であると実験的に示されており<sup>1)</sup>、貯留水による灌漑農業が農業生産量の向上に顕著な効果を有する。しかし、過度の灌漑によって貯留水が失われ、持続的なシステムの運用に弊害を及ぼす懸念も予想される。したがって、水資源の枯渇といったリスクを回避するため、適切な灌漑計画を科学的に構築する必要がある。

ここでは、実験的な小規模雨水ハーベストシステムにおいて観測されたデータより、灌漑水量を入力、累積トマトの収量を出力としたときの入出力関係を、逆問題としての定式化にもとづいて推定する。

### 2. 実験的雨水ハーベストシステム

実験的小規模雨水ハーベストシステムは京都府相楽郡に位置する、パナソニック(株)先端技術研究所内で運用が行われた。このシステムは、それぞれの面積が7.36m<sup>2</sup>の計8つのプロット(P-1~P-8)を持つ。P-2, P-4, P-6, P-8は降水や灌漑水の回収を可能とするため遮水層として撥水砂を用い、それ以外のプロットは普通砂を用いている。その縦断面を図1に示す。P-3からP-8はビニールハウスで覆われ、雨量は完全にコントロールされている。P-1とP-2は集水地としての機能を持ち、収集された雨水はただちに貯留タンクへ揚水される。タンクの貯

留水は、受益地であるP-3とP-4にドリップ灌漑される。P-5からP-8ではそれぞれ半乾燥地の特定の地域の雨量を再現するように灌漑が行われる。なお、P-2からP-8では、トマトを栽培した。

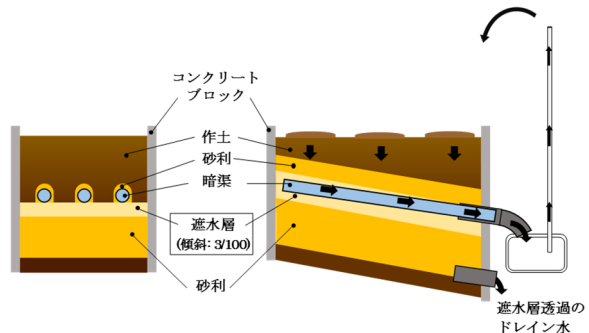


図1 プロットP-2, P-4, P-6, P-8の縦断面  
Fig. 1 Vertical cross sections of Plots P-2, P-4, P-6, and P-8

### 3. 計算手法

2つの時系列データ  $x$  と  $y$  の入出力関係は、第1種 Fredholm 積分方程式

$$y(t) = \int_0^t K(t-\tau)x(\tau) d\tau \quad (1)$$

によって与えられるものと仮定する。ここに、 $x$  は灌漑水量、 $y$  は累積トマト収量、 $K$  は核関数である。畳み込み積分である(1)を、一定時間間隔の有限長データについて

$$\begin{pmatrix} y_0 \\ \vdots \\ y_i \\ \vdots \\ y_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ x_1 & x_0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ x_{n-2} & x_{i-j} & \ddots & x_0 & 0 \\ x_{n-1} & x_{n-2} & \cdots & x_1 & x_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_0 \\ \vdots \\ K_i \\ \vdots \\ K_{n-1} \end{pmatrix} \quad (2)$$

と離散化する。ここに、添え字は時間ステップを表す。式(2)を  $\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{K}$  と略記する。 $\mathbf{X}$  と  $\mathbf{y}$  から  $\mathbf{K}$  を求めることは、「非適切」な逆問題であるので、非適切な逆問題の近似解を得る手段と

<sup>a</sup> 京都大学大学院農学研究科 Graduate School of Agriculture, Kyoto University

<sup>b</sup> パナソニック株式会社先端技術研究所 Advanced Technology Research Laboratory, Panasonic Corporation

キーワード: 雨水ハーベストシステム, 逆問題, Tikhonov 正則化法

して最もよく使われる正則化法である Tikhonov 正則化法を用いる。汎関数

$$J_{\alpha}(\mathbf{K}) = \|\mathbf{X}\mathbf{K} - \mathbf{y}\|_2^2 + \alpha \|\mathbf{K}\|_2^2 \quad (3)$$

を最小化する  $\mathbf{K} = \mathbf{K}^{\alpha}$  を求める問題を Tikhonov 正則化法と呼ぶ。ここに、 $\alpha > 0$  は正則化パラメータと呼ばれる定数である。これより、 $\mathbf{K}^{\alpha}$  は  $\mathbf{K}^{\alpha} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X} + \alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}$  (4) と表され<sup>2)</sup>、この  $\mathbf{K}^{\alpha}$  を用いると、累積トマト収量時系列は

$$z_i = \sum_{k=0}^{k<i+1} K_{i-k}^{\alpha} x_k \quad (5)$$

で与えられる  $z_i$  として補正される。ここに、 $K_i^{\alpha}$  は  $\mathbf{K}^{\alpha}$  の第  $i$  成分である。

#### 4. 計算結果

式(5)において  $M = \mathbf{X}^T \mathbf{X} + \alpha \mathbf{I}$ 、 $\mathbf{v} = \mathbf{X}^T \mathbf{y}$  とし、Gauss-Seidel 法で  $M\mathbf{K}^{\alpha} = \mathbf{v}$  を解けば、 $\mathbf{K}^{\alpha}$  が得られる。さらにこの  $\mathbf{K}^{\alpha}$  を用いて  $z_i$  を求めた。P-2 から P-8 までのそれぞれで、トマトの収穫が終わるまでの 85 日間に得られたデータをもとに計算を行った。各プロットでの灌漑水量と累積トマト収量の入出力関係を表す核関数を図 2 に示す。また、正則化パラメータ  $\alpha$  の影響を調べるため、 $\alpha$  の値を変化させて計算を行った。ここでは一例として P-3 で得られた結果を図 3、図 4 に示す。

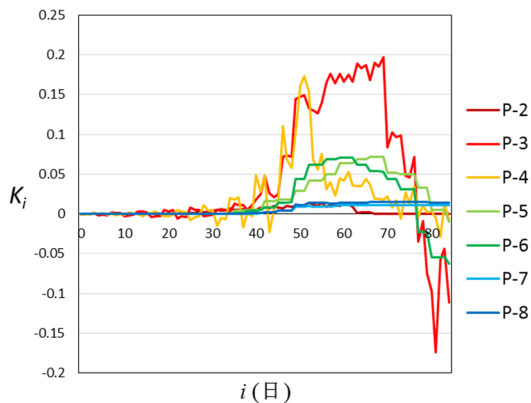


図 2 各プロットでの核関数 ( $\alpha=1$ )  
Fig. 2 Kernel function for each Plot ( $\alpha=1$ )

すべてのプロットに関し、図 2 において  $i=40$  付近から  $K_i$  の値が上昇していることから、灌漑の効果は約 40 日後に現れることが分かる。また P-4 では、高い  $K_i$  の値が短期間に集中しており、灌漑の収量に対する寄与が最も明瞭に表われた。

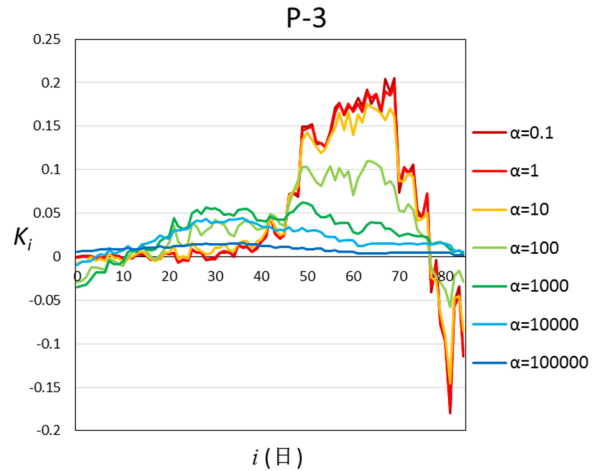


図 3 様々な  $\alpha$  の値に対する核関数  
Fig. 3 Kernel function for different  $\alpha$ -values

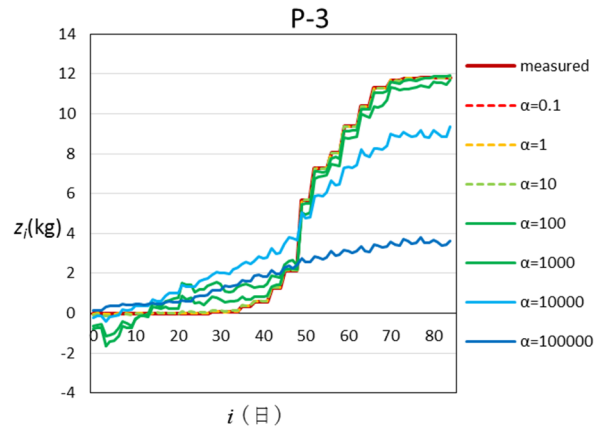


図 4 様々な  $\alpha$  に対する補正後の累積トマト収量  
Fig. 4 Accumulated yield of tomato after correction with different  $\alpha$ -values

$\alpha$  が 100 以上になると、図 3 に示すように核関数が減衰し、それに伴って、図 4 に見られるように補正値が測定値とかけ離れた値を示すようになる。この結果から、正則化パラメータ  $\alpha$  は 0.1 から 10 の間の値が適切と考えられる。

#### 5. おわりに

小規模雨水ハーベストシステムで観測されたデータをもとに、入力を降雨量または灌漑水量、出力をトマトの累積収量として、その入出力関係を推定した。この結果を、効率的な灌漑計画の策定に利用することを検討中である。

引用文献 1) Pachpute JS, Tumbo SD, Sally H, Mul ML (2009) Sustainability of Rainwater Harvesting Systems in Rural Catchment of Sub-Saharan Africa, *Water Resource Management*, **23**, 2815-2839. 2) Kirsch A (2011) *An Introduction to the Mathematical Theory of Inverse Problems*. Springer, pp.36-43.