

低水頭ドリップ灌漑システムにおける管路網流れ Pipe network flows in low-head drip irrigation systems

○海野 優介*, 宇波 耕一*, 藤原 正幸*
Yusuke Unno, Koichi Unami, Masayuki Fujihara

1. はじめに

近年、途上国などにおける自律分散型の灌漑農業では、圃場内に設置されたタンクから重力によりドリップチューブへ送水する、水頭数 m 以下の低水頭ドリップ灌漑システムが普及しつつある¹⁾²⁾。そのようなシステムにおける灌漑水の挙動を水理学的手法によりモデル化し、タンクの水位変化を含め流況を計算機上で再現することができれば、灌漑計画や水管理の実際において有益な情報を得ることができる。ここでは、ドリップチューブ内に生じる層流と乱流の遷移領域の流れに対応するため、Reynolds 数を用いて記述される一次補間式を導入したモデルを提案する。また、小規模な管路システムにおける実験からモデルパラメータを同定し、より実現象に則したシミュレーションを行う。これらをもとにドリップチューブの接続の違いによる効果について検討する。

2. 水理モデル

ドリップチューブ内の灌漑水の流れは管水路定常流として取り扱う。直径 D 、断面積 A の一般的な円管においては、層流、乱流それぞれにつき、長さ L の区間での摩擦損失水頭 h_f は

$$h_f = \frac{64\nu L}{2gAD^2} Q \quad (1)$$

$$h_f = \frac{8\sqrt[3]{4gn^2L}}{D\sqrt[3]{D}} \frac{1}{2gA^2} Q|Q| \quad (2)$$

となる。ただし、 ν は灌漑水の動粘性係数、 g は重力加速度、 Q はドリップチューブ内の灌漑水の流量、 n はマンニングの粗度係数である。ここで、定数 C_1 、 C_2 を

$$C_1 = \frac{64\nu L}{2gAD^2} + K_o \frac{1}{2gA^2} \quad (3)$$

$$C_2 = \left(K_e + \frac{8\sqrt[3]{4gn^2L}}{D\sqrt[3]{D}} + K_b + K_j + K_o \right) \frac{1}{2gA^2} \quad (4)$$

とおくと、区間両端における水頭を η_l と η_r で表せば、流れが完全に層流である場合には

$$\eta_l - C_1 Q - \eta_r = 0 \quad (5)$$

完全に乱流である場合には

$$\eta_l - C_2 Q|Q| - \eta_r = 0 \quad (6)$$

となる。ここに、 K_e 、 K_o 、 K_b 、 K_j はそれぞれ管の入口、出口、曲がり部、分岐点における形状損失係数である。層流と乱流の遷移領域の流れに対応するため、(5)と(6)を一次補間式

$$(1-\theta)C_1 Q + \theta C_2 Q|Q| + \eta_r - \eta_l = 0 \quad (7)$$

によって連結する。ここに、重み θ は臨界 Reynolds 数の下限 Re_{inf} と上限 Re_{sup} を用いて

$$\theta = \max \left(0, \min \left(1, \frac{Re - Re_{inf}}{Re_{sup} - Re_{inf}} \right) \right) \quad (8)$$

で定義する。ドリップチューブ区間の端点を節点と考えれば、質量保存則による連続式は

$$\sum_k \sigma_{ik} Q_{ik} = q_i = K_i \sqrt{g(\eta_i - e_i)} \quad (9)$$

となる。ここに、 Q_{ik} は第 i 節点に k 番目に接続するドリップチューブ区間の流量、 σ_{ik} は第 i 節点に k 番目に接続するドリップチューブ区間の局所座標の方向を示す絶対値 1 の実整数、 q_i は第 i 節点におけるエミッターからの流出流量であり第 i 節点の圧力水頭の平方根に比例すると仮定している(比例定数 K_i)。また、 η_i は第 i 節点の水頭、 e_i は第 i 節点の高さである。なお、タンク(断面積 a)に直接つながる節点は、タンク水位を指定する圧力境界として取り扱う。タンク水位 H についての連続式は、

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{Q_0}{a} \quad (10)$$

となる。ここに、 Q_0 はタンクに接続するドリップチューブ区間の流量である。

3. 計算手法

ドリップチューブ内の管水路定常流に関しては、各区間での支配式(7)と各節点での支配式(9)を連立させた非線形代数方程式系について Newton-Raphson 法により反復求解を行う。一方、タンク水位の時間変化に関しては、支配式(10)に 4 次精度の Runge-Kutta 法を適用する。

* 京都大学大学院農学研究科 Graduate school of Agriculture, Kyoto University

キーワード：ドリップ灌漑, 管路網, Reynolds 数

4. パラメータ同定実験

小規模な管路システムを構成し、比例定数 K_f を同定するための実験を行った。勾配 0 の開水路の末端を閉塞し、水を貯留するような形にする。そこからサイフォンによりドリップチューブに送水し、エミッターからの流出流量を数箇所で計測した。流出流量のデータをもとにベルヌーイの定理から各点での圧力水頭を推定し、(9)式より比例定数 K_f の値を算出した。

5. 計算結果と考察

低水頭小規模ドリップ灌漑システムとして、Ngigi et al.³⁾の提案するものを対象とする。図 1 に示すように、水平な圃場に並行に設置された各 7.5 m 長の 4 本のドリップチューブに、高さ 0.8 m の位置に設置された容量 20 L のタンクから重力給水する。タンクから各ドリップチューブに至る送水管も、ここでは便宜的にドリップチューブとして取り扱う。ドリップチューブのエミッターと分岐点を節点(図 1 の[0]~[106])、2 節点に挟まれた区間を要素(図 1 の 0~105)と呼ぶ。

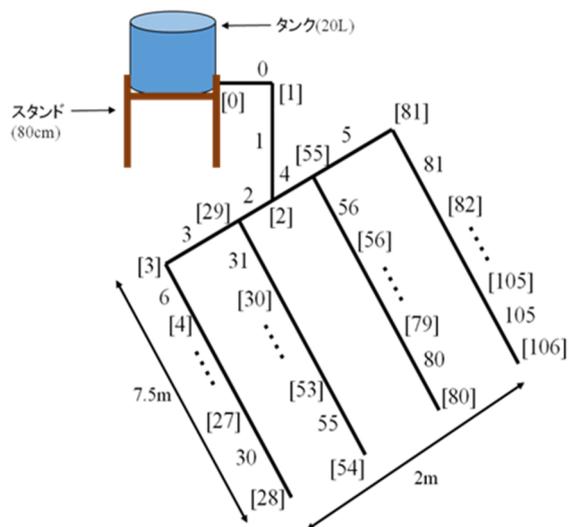


図 1 低水頭ドリップ灌漑システムの概要
Fig. 1 Low-head drip irrigation system

図 1 のシステムにおいて実際に流量の計算を行った結果を図 2 に示す。タンクから離れるにつれ、ドリップチューブ内の灌漑水の流量が一樣に減少していくことが確認された。また、タンク水位の経時変化を調べると、時間が経つにつれ水位減少が緩やかになること、つまり灌漑強度が低下することが分かった。次に、図 1 において要素番号 40 の区間でドリップチューブが寸断された場合、また、節点[28]-[54]-[80]-[106]を連結した多重連結型管路の場合についてそれぞれ計算を行い、通常接続の場合の計算結果と

比較した。通常の接続では寸断箇所から下流側には灌漑水が流れないのに対し、多重連結型の場合においては、管が寸断されても別の経路を介して灌漑水がドリップチューブ全域に行き渡ることが示された。さらに、タンクを対称に 2 基設置した場合のシミュレーションを行ったところ、2 つのタンクの間中点を中心に流況も対称となった。

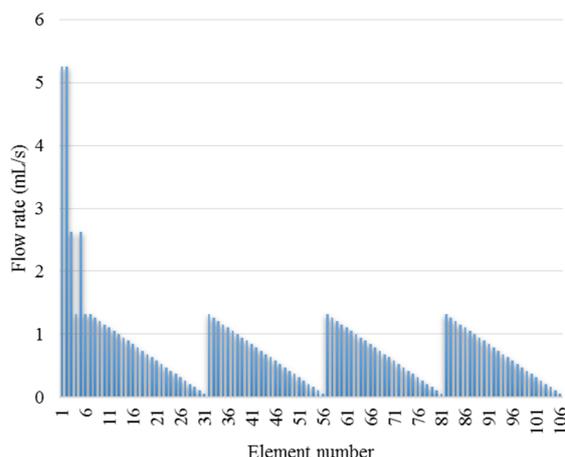


図 2 ドリップチューブ内の灌漑水の流量
Fig. 2 Flow rate in the drip-tubes

以上の結果から、管路を多重連結型に接続することでドリップチューブの故障に対するリスク回避が可能であることが示された。また、重力給水という性質上エミッターからの流出流量に場所によるばらつきがあるが、タンクを複数基設置することでタンク一基あたりに対する灌漑面積が小さくなり、灌漑水量のばらつきを抑えられるということが確かめられた。

6. おわりに

低水頭小規模ドリップ灌漑システムに関し、灌漑水の流況を定量的に把握するモデルを開発した。実験によりモデルパラメータを推定した後、計算を行い、多重連結型の管路接続やタンクの複数基設置が灌漑水供給の安定化に有効であることが示された。今後は、液肥などを想定した輸送問題の解析に対応できるようモデルを拡張していく予定である。

引用文献 1) Ngigi SN (2008) Technical evaluation and development of low-head drip irrigation systems in Kenya, *Irrigation and Drainage*, 57(4), 450-462. 2) Miller E (1990) A low head drip irrigation system for smallholdings, *Agricultural water management*, 17, 37-47. 3) Ngigi SN, Savenije HHG, Thome JN, Rockström J, De Vries FWTP (2005) Agro-hydrological evaluation of on-farm rainwater storage systems for supplemental irrigation in Laikipia district, Kenya, *Agricultural Water Management*, 73(1), 21-41.