

# タンクモデルを用いた棚田群における 水収支の予測に関する研究

鈴木誠二\*・西田 渉\*・池永雄太\*\*・高山知哉\*\*\*

## Study on Water Balance of Terraced Paddy Field by Field Observation and Numerical Model

by

Seiji SUZUKI\*, Wataru NISHIDA\*, Yuta IKENAGA\*\* and Tomoya TAKAYAMA\*\*\*

Recently, terraced paddy fields, called Tanada, have been reduced in Japan. However, it is considered that Tanada is an efficient water use system and has preferable effects on environmental conservation. In this study, in order to make clear the water balance in Onakao Tanada, the geographical characteristics were surveyed and numerical model was developed as tank model. From the observed results, it is cleared that Tanada is an efficient land use system in steep area and has complicated water flow network. Computed results show that water supplied from agricultural channel are stored in each Tanada according the flow network, and distributed in stepwise in space and time. furthermore, it is clear that infiltration and evaporation are becoming very important factor in water balance system at Tanada.

**Key words** : *terraced paddy field, Tanada, water balance*

### 1. 序論

棚田は山地や丘陵地などの斜面に階段状に開かれている水田であり、長崎県のような平地面積の少ない狭隘な地域においては、丘陵地斜面の稲作用地としての活用を可能にする。また、最小限の引水で農地に水を供給する優れたシステムであるとされる。ただ、農業の実施形態の変化に伴い、農業用の機械が大型化し、商業農業が主となった近年では、一面あたりの耕作地面積が狭いために生産量が自ずと少なく、また、生産性の低さから平坦水田との格差が顕在化した。さらに、農業従事者の高齢化などにより、放棄地が増加するようになった。その一方で、棚田の美しい景観、土壌の流亡防止や洪水調節機能などが評価され、これを国土

と自然環境の保全の立場から捉え、その価値を再評価する動きもみられるようになってきた<sup>1)</sup>。

長崎県内には各所に棚田があり、現在も稲作がなされている。ここで取り上げる長崎市神浦地区の大中尾棚田は、後述のように国内の棚田百選に選ばれた県内を代表する棚田の一つであり、国土と環境の保全機能の他に、観光資源としての役割も期待されている。

そこで本研究では、まず、大中尾地区の棚田の地形的な特性と耕作状態を把握することを目的として現地調査を行った。つぎに、本棚田群における水収支を水文学的観点から評価するために、棚田群を樹枝状に連結されたタンクモデルと見なした数値モデルを構築する共に、水収支に関する解析を行った。

---

平成23年 6月21日受理

\* 大学院工学研究科 (Graduate school of Engineering)

\*\* 大学院工学研究科博士前期課程社会環境デザイン工学専攻 (Graduate Student, Course of Civil and Environmental Engineering)

\*\*\*工学部教育研究支援部 (School of Engineering, Department of Education and Technical Development)

## 2. 研究対象地区の概要と現地調査

### 2.1 大中尾棚田の概要

大中尾棚田群は、神ノ浦川流域の中流域に位置しており、約 4.2 km 離れた神浦川の上流から灌漑用水を取りいれている。水害などの被害を受けた際も、水路保全組合によって補修工事が行われ、今日まで大切に守り続けられている。大中尾棚田は 1999(平成 11)年 7 月 26 日に日本の棚田百選に選ばれている。また、本棚田では、2002(平成 14)年度に長崎県下で初めて棚田オーナー制度を導入しており、そのオーナー数は年々増加し、2008(平成 20)年度には 37 組となっている<sup>2)</sup>。このように、地域住民も地域の宝である棚田の存在を強く意識し、農業従事者を増やし、棚田を崩壊から守るため、地域外からの受け入れを行っている。

### 2.2 現地調査の概要と結果

大中尾棚田群の航空写真を Photo. 1 に示す<sup>3)</sup>。まず、各棚田の基本情報として標高と面積を把握するために、棚田群を周回する道路と棚田内において水準測量を実施した。また、全測点では携帯型 GPS を使用して緯度と経度を測定し、測点間の距離は、次の Hubeny の式を使って算出した<sup>4)</sup>。

$$M = \frac{6334834}{\sqrt{\{1 - 0.006674 \cdot \sin^2(\text{latAve})\}^3}} \quad (1)$$

$$P = \frac{6377397}{\sqrt{1 - 0.006674 \cdot \sin^2(\text{latAve})}} \quad (2)$$

$$l = \sqrt{(M \cdot \Delta\text{lat})^2 + \{P \cdot \cos(\text{latAve}) \cdot \Delta\text{lon}\}^2} \quad (3)$$

ここで、 $M$ : 子午線曲率半径(m),  $\text{latAve}$ : 平均緯度(度),  $P$ : 卯酉線曲率半径(m),  $l$ : 二つの測点間の距離(m),  $\Delta\text{lat}$ : 緯度差(度),  $\Delta\text{lon}$ : 経度差(度)である。なお、水準測量の誤差の調整に関しては、次のとおり、測点全長に対する測点間の距離の比率に応じて配分することとした。

$$d_i = \text{Err} \frac{l_i}{L} \quad (4)$$

ここで、 $d_i$ : 各測点での調整量(m),  $\text{Err}$ : 全誤差量(m),  $l_i$ : 2 点間の距離(m),  $L$ : 全長(m)である。

測量調査の結果から、大中尾棚田群は、東西約 4,00m, 南北 350m の範囲にあり、棚田の最上流点と最下流点との標高差は 56.13m にも達した。その平均勾配は 0.16 であり、非常に急勾配な斜面に棚田が造成されていることがわかる。また、現地には 222 面の棚田が現存しており、約 3%にあたる 6 面が休耕地であった。総面



Photo. 1 大中尾棚田における流水経路

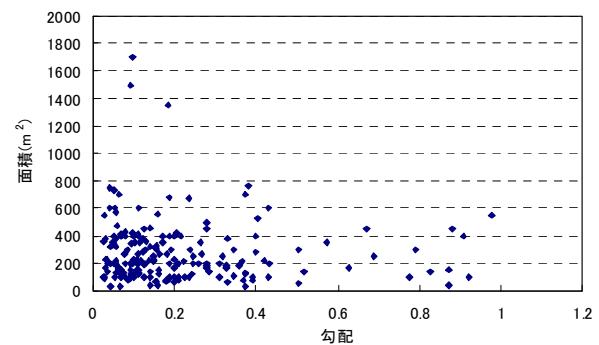


Fig. 1 棚田の面積と勾配の関係

積は、61,140m<sup>2</sup>であり、棚田 1 面当たりの平均面積は 275.4m<sup>2</sup>であるが、最大で 1,900m<sup>2</sup>、最小で 30m<sup>2</sup>とばらつきが大きい。

Fig. 1 に、棚田の面積と勾配の関係図を示す。棚田の多くは、勾配が 0.2 以下に集中して作られており、その面積は、約 100~400m<sup>2</sup>が最も多い。1,200m<sup>2</sup>を越える非常に広い棚田は、勾配が 0.2 以下の比較的勾配の緩やかな場所に造成されている。また、勾配が 0.8 を越える非常に急勾配な場所にも棚田が存在していることが明らかになった。

さらに、灌漑水路から棚田群に供給された用水の流下経路を明らかにするために、棚田間の排水および給水関係について調査を行った。その結果を、Photo. 1 に示す。本棚田群には、主に、中央から西側の棚田に給水する経路と、東側の棚田へ給水する経路の二種類が存在するようである。また、下流側の中央部では、東側を流下する流水の一部が、西側の棚田と連絡していることがわかる。こうした流水ネットワークが存在することで、中央部上流から給水された用水の排水面積は、東側よりも広い。ここで、後述のモデル解析の

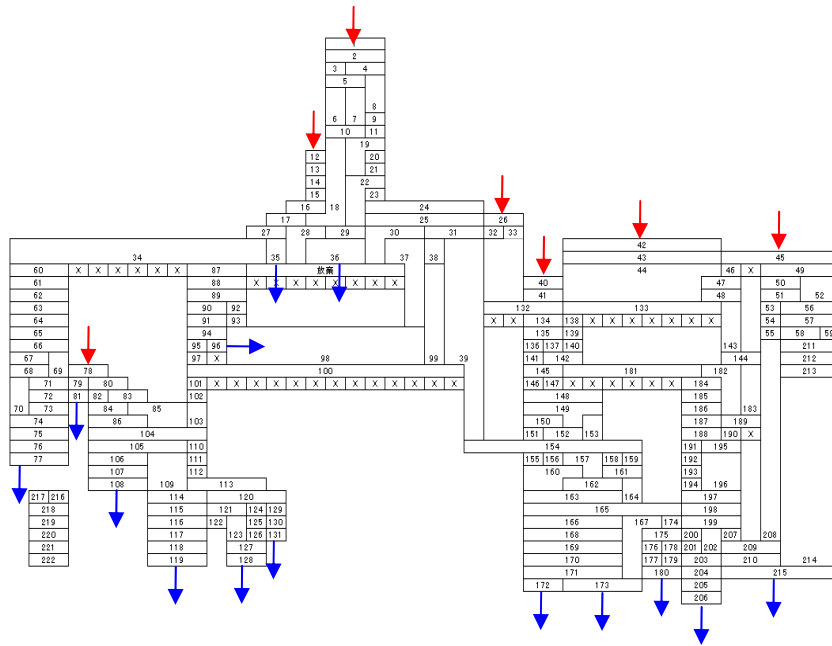


Fig. 2 大中尾棚田の流下経路モデル

(赤矢印：灌漑水路からの給水がある棚田，青矢印：灌漑水路への排水がある棚田)

ために、Photo. 1 の各棚田に番号を付し、棚田間の排水および給水の関係を表したものを Fig. 1 に示す。1面の棚田から複数面の棚田へ流下し、さらには複数面の棚田から1面の棚田に流下するなど、流下経路は、非常に複雑に分流と合流を繰り返していることがわかる。

### 3. タンクモデルを用いた棚田の水収支の算出

#### 3.1 水収支モデルの概要

前章で述べたとおり、本棚田群には、小面積の棚田が数多く存在し、また流水経路は極めて複雑である。ただ、各棚田の給・排水の相互関係が一度定まれば、ネットワークモデルとして取り扱うことが可能となる。ここでは、Fig. 3 に示すように、1面の棚田を1つの

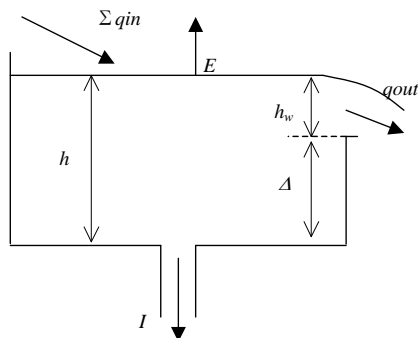


Fig. 3 タンクモデルの概念図

一段のタンクとみなしたモデル化を図った。すなわち、棚田を意味するタンク内の水収支において、その上流側の棚田からの給水と下位の棚田への排水(越流)、地中への浸透および蒸発を考慮した。なお、今回のモデル化においては中間流出による下流側タンクへの流出は取り上げていない。

本モデルで用いた水収支の基礎式と越流量、浸透量および蒸発量の評価式は次のとおりである。

$$A \frac{dh}{dt} = \sum_{j=1}^N (qin)_j - qout - I - e + Q_0 \quad (5)$$

$$qout = \frac{2}{3} c_d \sqrt{2gb} h_w^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

$$c_d = 0.605 + \frac{I}{1000h_w} + 0.08 \frac{h_w}{\Delta} \quad (7)$$

$$I = Aah \quad (8)$$

$$e = AK_I(e_0 - e_a) \quad (9)$$

ここに、 $A$ ：棚田の面積( $m^2$ )、 $h$ ：湛水深( $m$ )、 $(qin)_j$ ：上流側の棚田  $j$  からの給水量( $m^3/s$ )、 $N$ ：流入側となる棚田の集合、 $qout$ ：排水量( $m^3/s$ )、 $I$ ：浸透量( $m^3/s$ )、 $e$ ：蒸発量( $m/s$ )、 $Q_0$ ：灌漑水路からの給水量( $m^3/s$ )、 $g$ ：重力加速度( $m/s^2$ )、 $c_d$ ：Rehbock の流出係数<sup>5)</sup>、 $b$ ：流出幅( $m$ )、 $h_w$ ：越流水深( $m$ )、 $\Delta$ ：水底面からの堰高さ( $m$ )、 $a$ ：浸透孔定数( $1/s$ )、 $K_I$ ：風速に依存する係数( $m/s/Pa$ )、 $e_0$ ：飽和水蒸気圧( $Pa$ )、 $e_a$ ：大気の水蒸気圧( $Pa$ )である。

境界条件として、灌漑水路から給水される棚田において、定常状態での給水を想定し、その給水量を

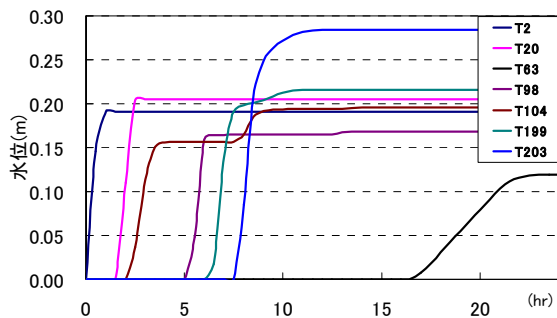


Fig. 4 水位の時間変化

$Q_0=0.05\text{m}^3/\text{s}$ とした。なお、水路から給水される棚田の数は7面である。堰高さは全てのタンクにおいて一定としており、計算では、現地での測定結果を参考に、 $\Delta=0.1\text{m}$ とした。風速と大気圧については、観測値を与えた。

### 3.2 タンクモデルを用いた水収支の結果と考察

Fig. 4に、モデルから算定した棚田の水位の時間変化を示す。棚田の水位は、取水源からの距離や面積および流下経路によって大きく異なることがわかる。棚田群の上流部に相当する棚田1や棚田20では、2時間以内に定常状態に達する。一方で、西部の棚田83は、定常状態に達するまでに24時間以上を要する。これは、西部に位置する棚田群への給水源は中央部の1カ所のみであり、そこからの流下過程において、供給水の多くが中央部側へ流入・供給されることで、西部側への到達水量が比較的少なくなるためである。また、全ての棚田に水が満たされる状態になるまでには56時間以上を要する結果となった。

基本的に各棚田が定常状態に達するために必要な時間は取水源からの距離に比例し標高差に反比例するが、T98とT104のように、定常状態に達する時間が逆転する棚田が存在する。これは、同棚田への水の流下経路が複数存在し、供給量が多いためである。この様に、棚田群は給水経路と棚田が1対1に対応しない給水ネットワークを構成しており、複雑な給水システムとなっていることがわかる。

まず、Fig. 5に棚田群の湛水深の時空間変化を示す。これらの結果は、計算開始から0.5時間後、5時間後、10時間後の結果に相当する。

取水開始から0.5時間では、灌漑水路からの給水場所に近い棚田から水が満たされ、水位が上昇し、時間経過とともにその範囲が下流へ広がっている。取水開始から5時間後となると、複数の給水経路が備わっている中央部分の棚田135~140の水位が上昇し、定常状

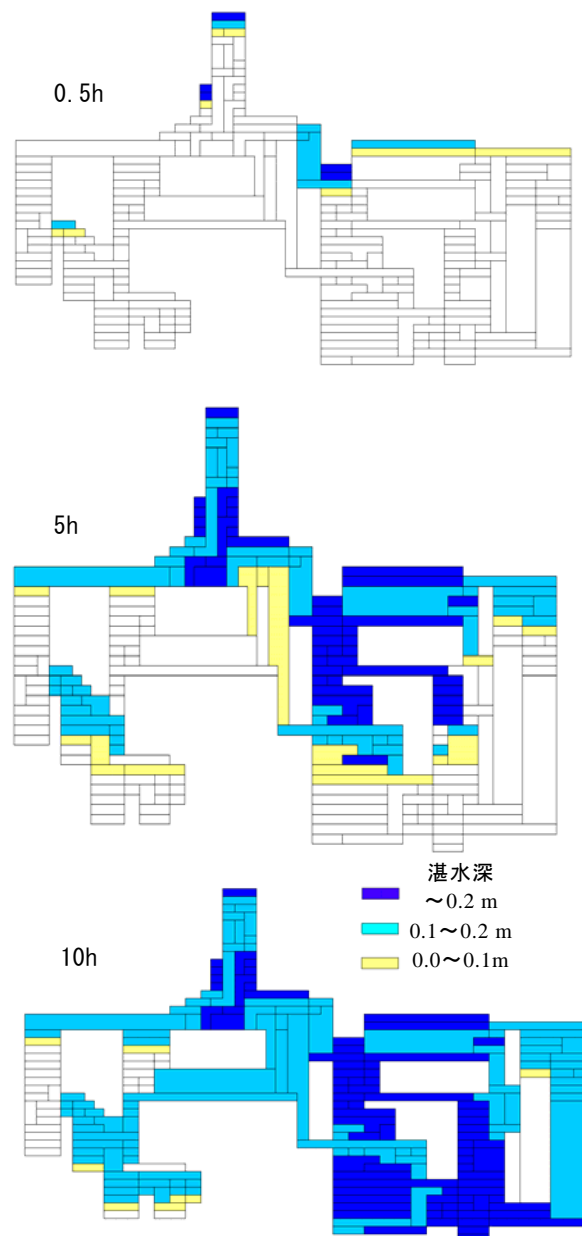


Fig. 5 水位の時空間変化

態に達する。一方で、西部の棚田群においては、水位の上昇率が非常に緩やかである。取水開始から10時間後には、西部を除いてほぼ全域に給水されたことで水位の上昇がみられる。とくに、中央部においては、先記のとおり給水量が潤沢であることから、越流が発生する堰高さ(0.1m)の倍以上にあたる0.2m以上の水位で定常状態に達している。本モデル計算においては、取水源を7面設定し、それぞれ $0.05\text{m}^3/\text{s}$ を流量として与えているが、さらに少ない供給量で効率良く棚田全体に給水可能であると考えられる。また、中央部に位置する棚田群は、棚田全体の総面積のほぼ80%を占め、給水量が最も多く、効率的な給水状態となっていると

いえる。

つぎに、Fig. 6に、棚田群から系外へ流出した流量と、浸透量および蒸発量の時間変化を示す。

取水源から供給された用水は、1時間程度で上流部の棚田を満たす。その一方で、最下流部に位置し、最も流下距離が短い棚田35と36に用水が到達し、堰をとおして棚田系外への流出が定常状態になるまでに5時間程度を要する。これ以降の数時間は、流出量がほぼ定常状態となる。これは、用水が未冠水の棚田に広がっているためである。なお、棚田35と36は、棚田群の上部域の9段目に位置する。16時間後には、中央の最下流部に位置する棚田173と棚田206に用水が達したことで流出量が増加する。このように、各流水経路の棚田を順次満たしながら流下が開始されるようになるために、段階的に流出流量が増加する結果となった。

浸透量および蒸発量に関しては、中央部および東部の棚田に用水が達する16時間後までは線形的に増加し、その後、緩やかな増加に留まる。棚田全域が定常状態に達した場合、計算結果では、流出量は $0.43 \text{ m}^3/\text{s}$ 、浸透量は $0.011 \text{ m}^3/\text{s}$ および蒸発量は $0.008 \text{ m}^3/\text{s}$ となった。浸透量および蒸発量は、流出量の約2%程度であり比較的少ない結果となった。棚田全域に水が充填されると給水を停止もしくは減少させる。棚田全域の総面積は $61,370 \text{ m}^2$ であり、10cmの水位で満たすと仮定すれば、総量が $6,137 \text{ m}^3$ の水量となる。それに対し、浸透量および蒸発量の合計の約 $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ の減少量は比較的多く、約4日で棚田の総水量と同程度となることがわかった。棚田群の水収支において、浸透および蒸発の影響は非常に大きいことが明らかとなった。

## 5. 結論

本研究では、長崎県長崎市の神浦地区にある大中尾棚田を対象に、現地調査を実施し、棚田の特性および耕作状態の把握を行った。さらに、棚田群における水収支を水文学的に評価するために、タンクモデルによる解析を行った。

その結果、大中尾棚田群は、大きく2つの流下経路を有しており、その経路は極めて複雑であることが現地観測から明らかにされた。また、棚田の多くは、勾配が0.2以下に集中して作られていることがわかった。また、勾配が0.8を越える非常に急勾配な場所にも棚田が存在していることが明らかになった。

さらに、給水時の棚田水位の時空間変化および流下形態を明らかにした。供給水の多くが中央部側へ流

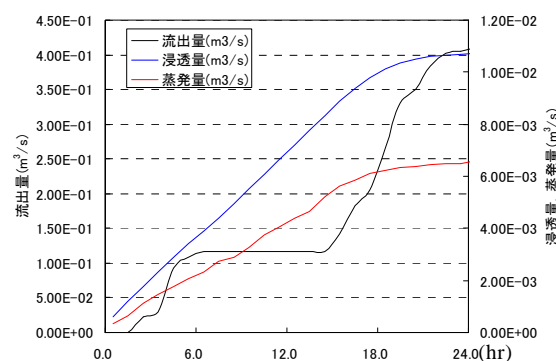


Fig. 6 流出量，浸透量および蒸発量

入・供給されることで、西部側への到達水量が比較的少なくなる傾向が明らかになった。また、全ての棚田に水が満たされる状態になるまでには56時間以上を要する結果となった。また、浸透量および蒸発量の合計は棚田の総貯水量に対して比較的多く、約4日で棚田の総水量と等しくなることがわかった。つまり、棚田群の水収支において、浸透および蒸発の影響は非常に大きいことが明らかとなった。

本研究では、棚田の水収支をモデル化するにあたり、複雑に存在する小水路からの給水および排水を考慮していない。より正確に棚田群の水循環機構を把握するためには、小水路網の把握および水収支を考慮することが必要であると考えられる。

**謝辞：**本研究を遂行するにあたって、現地測量やデータの取りまとめなどで御協力頂いた、当時学部4年生の赤嶺 太郎氏、岩尾 良太郎氏、刀根 宏和氏、藤瀬 多郎氏、山口 慶直氏、若山 光太氏に感謝致します。

## 参考文献

- 1) 中島峰広：日本の棚田,古今書院,pp.1-5,1999.
- 2) 農林水産省九州農政局：ホームページ資料 (URL <http://www.maff.go.jp/kyusyu/kikaku/mura/naga/21oonakao.html>)
- 3) yahoo 地図 (URL <http://maps.loco.yahoo.co.jp/>)
- 4) M. Nagao, H. Kawamura, M. Yamamoto and A. Ohuchi: Acquisition of personal tourism activity information based on GPS log mining method, Proc. of the Fifth Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference 2004,pp.37.3.1-37.3.16,2004.
- 5) 椿東一郎：水理学 I，森北出版，pp.188-190, 2000.