

# 大区画水田における全自動水管理システム

藤井 健司\*, 瀬古沢 照治\*, 寺西 優子\*, 棟方 研\*\*

\* (株)日立製作所システム開発研究所  
神奈川県川崎市麻生区王禅寺 1099 番地

\*\* 生物系特定産業技術研究推進機構  
東京都港区虎ノ門3丁目18番19号 虎ノ門マリビル 10階

## 概要

稲は移植後、分けつ・出穂・登熟を経て落水・収穫に至るまでの約 100 日の灌漑期間において、生育に応じた適正な水管理を必要とする。しかるに変動する気象下で農家の経験に頼る毎日の水管理は大きな負担となっている。一方で水田の区画整備、給排水パイプライン敷設が進行していることとあいまって、水管理作業の完全自動化、気象災害の回避、水資源の有効利用を目指した水田水管理システムの開発が実用段階まで進んでいる。本開発システムでは、気象予報データに基づいて稲の生育ステージ予測を行い、生育に応じた水田目標水位制御を行う。制御性能を高めるため、1ha 水田端 1 個所の水田水位測定値から外乱の除去された水田平均水位を推定するほか、複数水田群への灌漑用水配分支援のため、気象予報データに基づく田水消費量(蒸発散量, 地下浸透量)予測, 及び複数水田群への用水最適配分支援を行う。本稿では上記ソフトウェア機能の実現手段を提案し, 実データによる評価を行う。

## キーワード

大区画水田, 生育予測, 水位制御, 消費量予測, 最適配分

### 1 はじめに

水田の水管理作業時間は年間 75.4 時間/ha と全稲作労働時間の 20.3%を占め<sup>1)</sup>, 気象・土壌条件や稲の生育段階に応じて異なる判断を求められるため, 農家にとって煩わしくかつ経験を要する作業となっている。一方で水田の区画整備・給排水パイプライン敷設が進行していることとあいまって, 水田水管理作業の完全自動化を目指した水管理システムの開発が実用段階まで進んでいる<sup>2)</sup>。

水田水管理は, 単に水田に水を供給し稲の生長を促進させるだけでなく, その多くの水管理ノウハウにより, 冷夏であっても冷害を回避したり, 渇水時であっても安定した収量を確保することが可能となる。このような観点から筆者らは, 水管理作業の自動化のみならず, 気象災害の回避, 水資源の有効利用等を目的とした水田水管理システムの提案を行い, 実験水田にてその開発を進めている。本稿では, 開発システムに関し, 特にそのソフトウェア機能を中心に述べ, 水田実測データを用いて検証を行う。

### 2 水管理システムのハードウェア構成

開発システムの概念図を図 1 に示す。1ha 規模の大区画水田×数十枚程度を管理対象とし, 各水田ごとに設置された複合センサ, フィールドユニット, 給排水バルブ, 及び地域内に設置された水管理ホスト(PC)によって構成される。複合センサは水田の水位・水温・導電率を測定するとともに水管理ホストから送られてきたデータをもとにバルブの制御を行う機能を持ち, 目標水位と水田水位との偏差に応じた 4 段階の開度制御を行う。フィールドユニットは複合センサ・給排水バルブに対し太陽電池とバッテリーで構成された電源を供給するとともに, 特定小電力無線により各種データをホストに伝送する機能をもつ。特定小電力無線は中継伝送が可能のため, 広範囲の大区画水田に対しても十分カバーできる能力をもつ。給排水バルブは複合セ

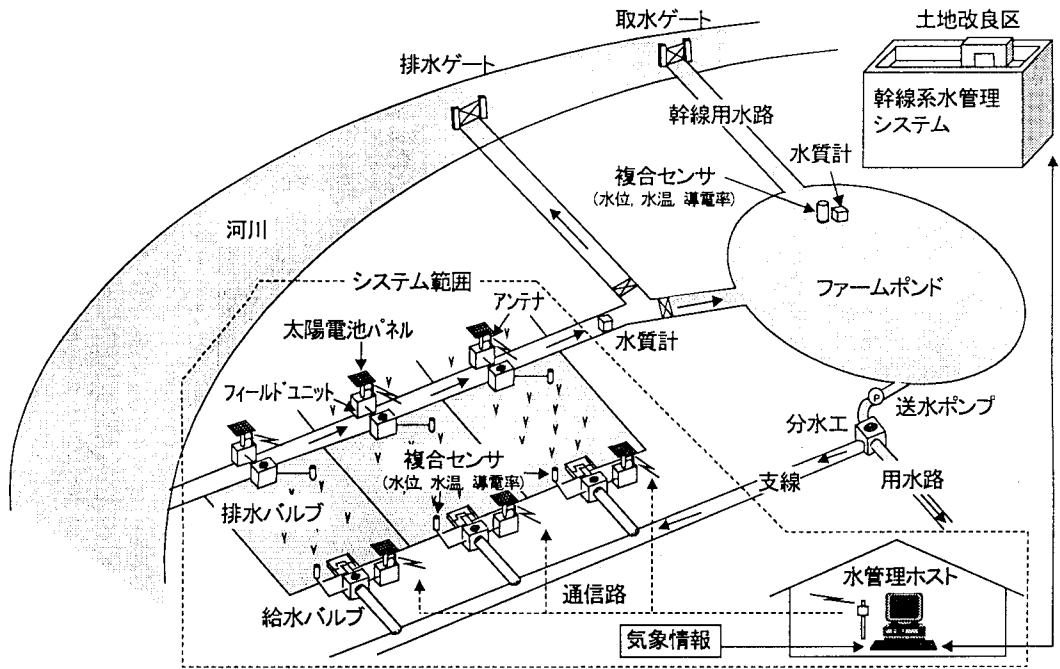


図1 システム概念図

ンサから制御され、動作時消費電力 12V/0.3A、待機時消費電力 3mA と小電力設計となっているため、曇り・雨が 10 日程度続いてもバッテリーのみで電源を維持でき、1~2 日の晴天でバッテリーを充電することができる。

水管理ホストは複合センサから送られてきた水田データ、及び気象庁・CRC 総研等の気象情報提供システムから NTT 回線を介して送られてきた地域気象予測データ(気温、湿度、日射、雨量、風向・風速)を受信・蓄積するとともに、上記データに基づいて各水田ごとの給排水バルブ開度を決定し、複合センサに対してバルブ制御信号を送信する機能をもつ。水管理ホストには後述する稲の生育予測ソフトや目標水位設定ソフト等が組み込まれており、現在の稲の生育に対して適正な目標水位制御を行うことができる。

### 3 実験水田の設備構成

システム開発の基礎データ取得を目的として、茨城県美浦村の実験水田に対して図 2 に示す設備を配置し、97 年の稲作シーズン中における水田データ・地域気象データの測定を行った。1ha 規模の水田の一角にはポンプ機場があり、揚水・排水を行っている。給用水用オートイリゲータは水田の一边に 2 箇所設置され、水位を調整できる自然排水口はオートイリゲータの対辺に 2 箇所、暗渠バルブは 4 箇所設置されている。

今回、ほぼ正方形の実験水田の対角線上に水位計 1、水位計 2 を設置し、2 箇所の水田水位を測定するとともに、水位計 2 の隣りに設けた有底箱の中に水位計 3 を設置し、水田からの蒸発散量測定を行った。またポンプ機場敷地内に気象観測ロボットを設置し、風向・風速、気温、湿度、地温、日射量、雨量の測定を行った。97 年 5 月 21 日から収穫までの期間において、15 分ごとの平均値としてこれらの観測データの測定を行った。

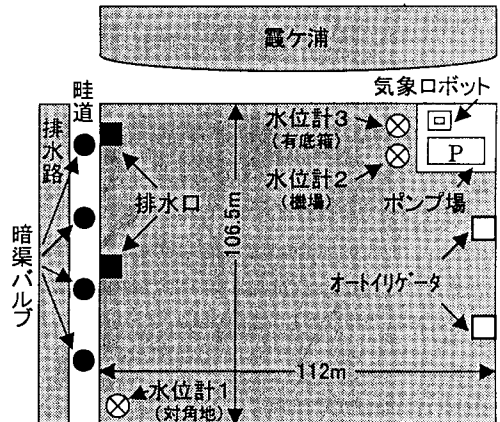


図2 実験水田の設備配置

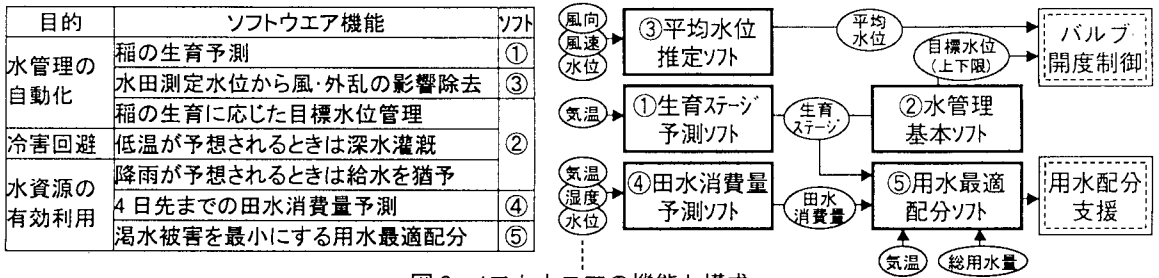


図3 ソフトウェアの機能と構成

### 4 水管理システムのソフトウェア

水管理システムの主な目的は水管理作業の自動化、気象災害の回避、及び水資源の有効利用であり、これらの目的を達成するため水管理ホスト内にて実行されるソフトウェア及びその構成を図3に示す。

水管理作業の自動化のため、水管理ホストでは、気温観測・予測データに基づいて稲の生育予測を行い(①生育ステージ予測ソフト)、生育に応じた水田目標水位を設定し(②水管理基本ソフト)、給排水バルブにて目標水位制御を行う。その際、風の吹き寄せ等により変動した水田水位測定値をそのまま制御に用いるのではなく、補正した水田平均水位を用いる(③平均水位推定ソフト)ことにより制御性能を高めている。

水田の水位制御と直接関係ないが、水管理ホストでは、各種気象予測データに基づいて4日先までの水田水位減少量の予測を行う(④田水消費量予測ソフト)。これは数日に1度しか灌漑の順番が回ってこないような輪灌漑地域における毎回の灌漑水量決定支援に役立つ。また渇水時において総灌漑用水量が限られている場合、地域全体としての渇水被害最小化を図るための用水配分支援も行う(⑤用水最適配分ソフト)。

以下、上記ソフトウェア①～⑤に関し、その構築方法について述べ、水田実測データによる検証を行う。

#### 4.1 生育ステージ予測ソフト

本ソフトウェアでは、気温観測値又は気温予測値を用いて、当日または4日先までの毎日の稲の生育ステージ予測を行う。予測モデルには、全国的に広く利用され、毎日の日平均気温のみから容易に推定可能なDVIモデルを採用する。

$$DVI = \frac{100}{A} \sum_{\text{田植日}}^{\text{推定日}} (1 - e^{-(B(T_i - C)}) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $T_i$ は第*i*日の気温(℃)であり、A、B、Cは、稲の種類・地域によって定まるパラメータである。左辺DVI値が稲の生育ステージを表しており、DVI値0が田植日、DVI値100が出穂日に対応している。

89年から95年までの茨城県産コシヒカリの出穂データ・気温データを用いてDVIモデルによる出穂日予測を行ったときの予測結果を表1に示す。冷害年の93年を除いてほぼ1日程度の誤差に収まっている。

#### 4.2 水管理基本ソフト

本ソフトウェアでは、図4に示す目標水位テーブルに基づいて、生育ステージ予測ソフトより推定されたDVI値から毎日の水田目標水位を設定する。目標水位には上下限値が割り当てられており、上下限内に水田水位(正しくは後述する水田平均水位)が収まるよう、複合センサにて15分周期で給排水バルブの目標水位制御を行う。目標水位テーブルは県農試等が作成する稲の品種別の稲作暦(日付と目標水位との対応関係)にDVI値を割り当てることで作成できる。また農家において自由にカスタマイズ可能である。

水管理ホストでは気象予測データを受信しており、減数分裂期等の冷害危険期に低気温が予想される場合、本ソフトウェアでは目標水位を高めに設定し、深水灌漑により冷害回避を行う。また近い将来降雨が予想される場合は、現在から降雨予想日までの目標水位下限値を低めに設定し、水田水位が目標水位をある程度下回っていても給水を猶予する等の水資源の有効利用を図っている。

表1 出穂日予測結果

年	出穂日 (田植後日数)	予測日 (田植後日数)	誤差 (日数)
89年	95日	94日	-1日
90年	84日	84日	0日
91年	82日	83日	+1日
92年	93日	95日	+2日
93年	99日	92日	-7日
94年	84日	84日	0日
95年	87日	87日	0日

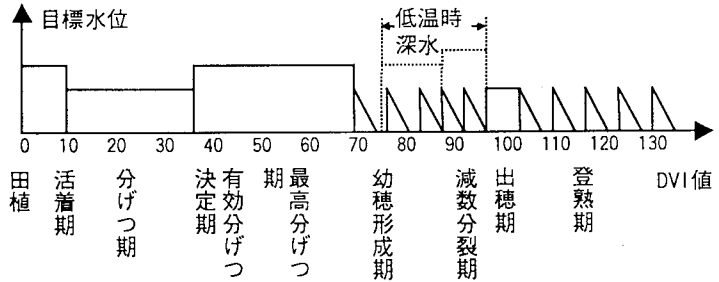


図4 目標水位テーブル

4.3 平均水位推定ソフト

水田水位は風等の外乱の影響を受け大きく変動することがあるため、水田目標水位制御における制御量として水田水位測定値をそのまま用いた場合、ハンチングが生じ無駄な給排水が増加する可能性がある。そこで本ソフトウェアでは、水位測定値から風の影響を取り除いた水田の平均的な水位を推定し、水田平均水位を上記制御量とすることにより制御性能の向上を図っている。

水田水位に短期的に影響を及ぼす物理量は水田の水位、給排水量、雨量、風向・風速であると考えられるため、本ソフトウェアでは上記物理量の測定データから平均水位の推定を行う。但し、水田水位はシステム価格及び農作業上の制約から、水田端の1地点における水位とする。以下、上記物理量より平均水位を推定するモデルの構築を行う。

水田水位変動に対して風の影響が最も大きいと考え、関連する実験水田データの解析を行ったところ、補正風速  $v$  (水位計設置方向に対する風速成分) と吹き寄せ水位上昇量  $\Delta h$  (水位1-水位2) の間に図5に示す関係が得られた。田植後20日経過時点(5月21日)の散布図(a)から有意な回帰式  $\Delta h = 0.30v^2 + 0.06$  を導出でき、吹き寄せ水位上昇量は補正風速の2乗に比例することが判る。一方出穂期時点(8月4日)の散布図(b)からは有意な関係が認められず、稲が十分生育してからはその比例関係は非常に小さくなること判る。

ここで吹き寄せ時の水面が平面であると仮定すれば、水田平均水位は上記対角2地点の水位平均値に一致するため、上記回帰式を用いて、風向・風速及び1地点での水田水位より水田平均水位を推定可能となる。しかしながら上記回帰式は稲の生育に応じて回帰係数が変化し、また強風時の風速、測定水位の激しい変動を推定値に直接反映させることになるため好ましくない。そのためモデルパラメータのオンライン推定が可能で、モデルによる推定誤差分散を最小にできる Kalman-Filter 理論に基づくモデルの構築を行う。

水田平均水位及び比例パラメータ(回帰係数)を推定すべき状態変量とすれば、Kalman-Filter 理論におけるシステム方程式、観測方程式は以下のように導出できる。時点  $k$  における測定水位、平均水位、補正風速2乗値、比例パラメータをそれぞれ  $h_k, x_k, v_k, p_k$  とすれば、観測方程式は上記回帰式より、

$$h_k + p^* \cdot v_k - p^* \cdot v_k = \begin{bmatrix} 1 & v_k^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ p_k \end{bmatrix} + e_k \dots (2)$$

となる。ここに、 $e_k$  は観測誤差であり、 $p^*, v_k^*$  の値は  $k-1$  時点での既知値  $p_{k-1}, v_{k-1}$  で代用して差し支えない。また時点  $k-1$  から時点  $k$  までの雨量、給排水量(水位換算)をそれぞれ  $r_{k-1}, q_{k-1}$  とすれば、システム方程式は水田の水収支関係より、

$$\begin{bmatrix} x_k \\ p_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ p_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{k-1} + q_{k-1} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{k-1} \\ w'_{k-1} \end{bmatrix} \dots (3)$$

となる。ここに、 $w_{k-1}, w'_{k-1}$  はシステム誤差である。

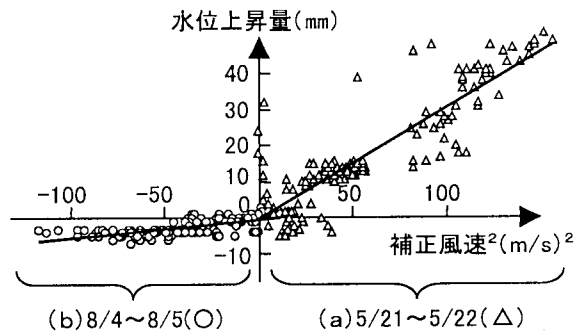


図5 水位上昇量と補正風速との散布図

上記モデル式に対して Kalman-Filter アルゴリズムを適用し、H9 年の実験水田測定データ(水位 2, 雨量, 風向・風速)を用いて平均水位を推定した結果を

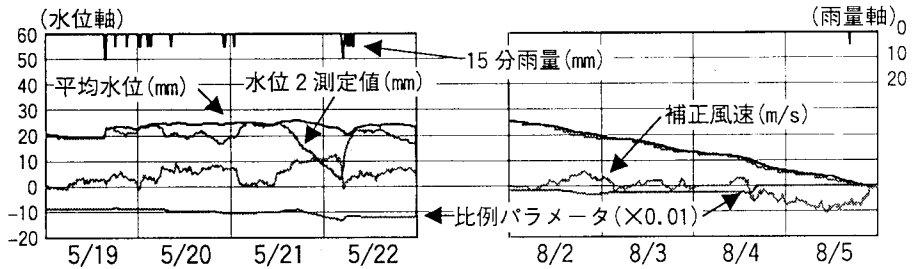


図 6 平均水位推定結果

図 6 に示す。5 月時点では、強風のため測定水位が変動した場合でも平均水位はほぼ一定値となり、よく推定できていることが判る。一方 8 月になると、比例パラメータはほとんど 0 となり、稲の生長により水田水位が風の影響を受けなくなった現象を再現できている。仮に水位 1 と水位 2 の平均値を水田平均水位とした場合、吹き寄せ水位上昇の比較的大きな期間(5 月 21 日～5 月末)におけるモデル推定値との誤差の標準偏差は 2.00mm となった。

#### 4.4 田水消費量予測ソフト

本ソフトウェアでは 4 日先までの毎日の田水消費量予測を行う。4 日後に水田水位がどれだけ減少するかが判るようになるため、輪番灌漑地域において、次回灌漑日までに田水が枯渇しないような灌漑水量決定支援が可能となる。また予測田水消費量の上限値チェックによる漏水検知も可能となる。

田水消費量は水面・葉面からの蒸発散量と土壌からの地下浸透量とに大別でき、それぞれ異なるプロセスで説明されるため、それぞれ個別のモデルで予測を行うものとする。蒸発散量予測には、日単位の気象値(気温, 湿度, 日射, 雨量, 風速)から日蒸発散量を推定できる有名な Penman 式を採用し<sup>3)</sup>, 4 日先までの気象予測値を用いて 4 日先までの日蒸発散量の予測を行う。地下浸透量予測は、まず水田水収支関係に基づいて水田観測値(水位, 給排水量, 雨量)及び上記日蒸発散量推定値から本日までの日地下浸透量を推定し、そのトレンドを外挿する方式とする。実験水田での有底箱水位 3 より晴天時・非給排水時における各物理量の真値を算出し、上記予測モデルの評価を行った結果、蒸発散量推定誤差の標準偏差 1.12mm/day, 地下浸透量推定誤差の標準偏差 0.79 mm/day となり、日田水消費量推定に関しては十分な精度であると考えられる。

#### 4.5 用水最適配分ソフト

稲作に対する気象災害のうち、冷害・風害・水害・干害に関しては水管理によって被害軽減が可能となる。例えば水害・干害は水量の過不足が原因であるため排水と灌漑が最良の対策であり、冷害・風害に関しては深水灌漑が有効とされる。しかしながら渇水等により各水田が必要とするだけの水が得られない場合、土地改良区等の水利権行使者は各水田への水配分に難しい判断を迫られることになる。そこで本ソフトウェアでは、地域用水量が限られている場合、雨水の利用も考慮して、地域全体としての気象災害被害が最小になるような 4 日先までの各水田への水配分量を算出し、実際の水配分の指針とすべく意思決定支援を行う。

十分な水が得られないときの被害回避方法としては、節水栽培と呼ばれる水管理方法が有効である。例えば水稲が冷害被害を受けやすい時期は減数分裂期であるため、この時期の水田に対して優先的に水を使うことは被害最小化に効果的である。また一度被害を受けた水田は回復が困難であることから、被害の少ない水田に水を優先配分することも被害最小化に効果的である。上記水管理ノウハウは定量的に表現可能であり、その一例として、減数分裂期にある水田において水配分量(水田水位)から被害率を算出する方法を述べておく。減数分裂期の稲の生長点(冷害の影響を受け稔実障害を起こす部分)は図 7 に示す分布をしていることから、水田水位から生長点の田水被覆率が算出される。これを本日から 4 日先までの 5 日分繰り返して生長点の各位置における低温継続条件を求め、図 8 より被害率を算出できる。

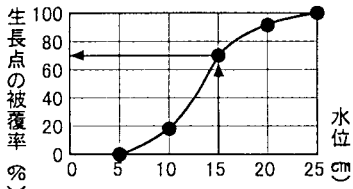


図7 深水灌漑の有効水位

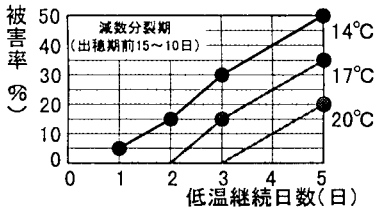
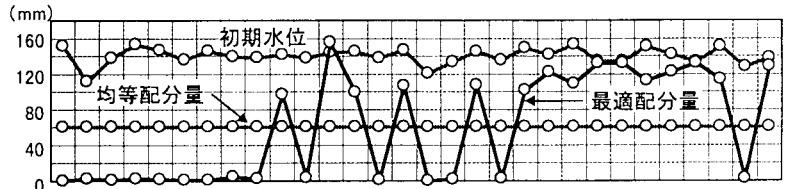


図8 低温条件と被害率

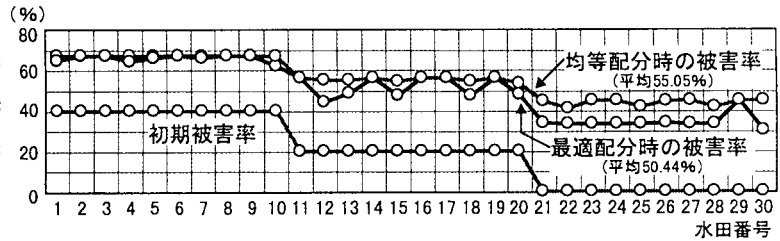


図9 最適配分結果とその被害率

上述の被害率計算ルールを用いることにより、被害最小化を図る水配分量決定のための最適化問題は、

$$\text{制約条件: } \sum_{\text{全水田}} (\text{配分量}) \leq \text{総用水量}$$

$$\text{目的関数: 地域被害量} = \sum_{\text{全水田}} (\text{未被害面積} \times \text{被害率}) \longrightarrow \min \quad \dots \dots \dots (4)$$

として定式化できる。目的関数内の被害率は、水田配分量を5日分に均等に分け、日雨量・日田水消費量を考慮して日平均水田水位を算出し、上記被害率計算ルールより算出するものとする。

1ha 水田×30枚からなる水田地域において、4日先までの総用水量 18,000m<sup>3</sup>(1水田当り平均60mm)、各水田の生育期は減数分裂期とし、初期被害率・初期水位・4日先までの日田水消費量を適当に設定し、日平均気温 15℃、日平均水温 18℃の冷害発生条件下において、最適配分を行った結果を図9に示す。最適化問題の求解手法には滑降 Simplex 法を用いた。最適配分時、初期被害率 40%と高めに設定している水田にはほとんど配分されず、初期被害率 0%の水田に優先配分されていることが判る。また初期被害率 20%と中程度の初期被害の水田には初期水位の高い水田ほど配分が多くなっており、水が有効に配分されていることが判る。このとき均等配分時の平均被害率 55.05%に対し、最適配分時の平均被害率 50.44%となり、約 5%の被害率低下(収量向上)が図られている。

## 5 むすび

本研究で開発した5つのソフトウェアのうち、平均水位推定ソフトと用水最適配分ソフトは従来の水管理システムにない機能であると考えられる。平均水位推定ソフトでは、水田測定水位に影響を与える物理現象として風の吹き寄せに着目し、Kalman-Filter 理論に基づく推定モデルの構築を行った。これにより水田の平均的な水位を推定でき、従来のセンチ単位の目標水位制御からミリ単位の制御が可能となる。用水最適配分ソフトでは、水管理によって被害軽減可能な災害発生時において、十分な水が得られない場合でも地域全体としての被害最小化を図る最適配分問題の構築を行った。冷害発生時の被害率計算方法について述べ、冷害時の用水最適配分シミュレーションを行いその効果を示した。

本テーマは、生研機構の「大区画水田における水管理の高度化に関する研究開発」委託研究事業に基づく。

## 参考文献

- 1) 農林水産省：農業経営統計調査平成8年度米生産費(農家調査)，農林水産統計速報9-144(経営-20)(1997)
- 2) 井上：診断型自動水管理装置，農業技術体系作物編2，農山漁村文化協会(1994)
- 3) 丸山，他：新編灌漑排水上巻，養賢堂(1986)
- 4) 水管理研究会：水田の水管理と圃場整備，地球出版(1972)