

大区画水田における全自動水管理システム

藤井 健司^{1*}, 瀬古沢 照治², 棟方 研³
KENJI FUJII TERUJI SEKOZAWA KEN MUNAKATA

¹正会員 (株)日立製作所システム開発研究所/〒215-0013 神奈川県川崎市麻生区王禅寺1099番地
Member of EICA, Hitachi, Ltd. Systems Development Laboratory
/1099, Ozenji, Asao-ku, Kawasaki, 215-0013, Japan

²(株)日立製作所システム開発研究所/〒215-0013 神奈川県川崎市麻生区王禅寺1099番地
Hitachi, Ltd. Systems Development Laboratory/1099, Ozenji, Asao-ku, Kawasaki, 215-0013, Japan

³生物系特定産業技術研究推進機構/〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-18-19虎ノ門マリビル10階
Bio-oriented Technology Research Advancement Institution TOKYO OFFICE
/Toranomon-Marine Bldg. 10F, 3-18-19, Toranomon, Minato-ku, Tokyo, 105-0001, Japan

Abstract

An automatic water management system for large-scale paddy field has been developed in order to automate irrigation and drainage of water in the field for better harvest while reducing water consumption. The automation system consists of five major functions; 1) prediction of rice growth, 2) automatic control of water level in the paddy in accordance with the growth stage of rice, 3) estimation of mean water level in the paddy, 4) short term prediction of water consumption in the paddy, and 5) optimal control of water distribution to the paddies for minimizing damages caused by climatic disasters. Functions 3) and 5) are described in detail in this paper as these are unique to our automatic system. A mathematical model for the relationship between wind velocity and rise in water level has been identified by the Kalman Filter and verified with actual data. A procedure for estimating the fraction of rice crop that would be damaged in cold climate is proposed and used in computer simulation to determine the optimal water distribution in 30 paddy fields to minimize the damage.

Key words : Paddy field, growth stage prediction, water level control, mean water level estimation, water consumption prediction, optimal water distribution

1. はじめに

稲作は水田耕起, 田植え, 水管理, 施肥・除草, 稲刈脱穀等の農作業によって構成される。中でも全稲作労働時間の20.3%¹⁾を占める水管理作業は, 毎日朝夕2回の田めぐりを必要とし²⁾, 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状

況に伴って, 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研究が実用段階まで進んでいる³⁾。

稲作は1993年の大冷害や1994年の全国的渇水に伴う不作に代表されるように, 気象災害や水不足の影響を受けやすい産業であるとされる。そこで筆者らは, 田めぐりの省力化や給排水の自動化といった水管理作業の自動化・省力化に加え, 更に水田水使用量の低減や安定した収量確保等の実現を目的とした水田水管理システムの研究開発を進めている。

水稲栽培では田植から分けつ・出穂・登熟等を経て収穫に至るまでの間、その生育に応じた適切な水田目標水位管理が要求される。そこで開発システムでは、稲の生育予測を行い、生育に応じた水田目標水位を設定し、給排水バルブによる水位制御を行う。そのため、毎日の田めくりを行うことなく稲の生育状態を判断でき、かつ給排水の手間を省くことが可能となる。上記制御量には、水田水位計測値から外乱を取り除いた水田平均水位推定値を用いており、制御の精度向上を図っている。また開発システムでは、田水消費量（地下浸透量+蒸発散量）予測に基づく漏水検知を行っており、検知情報に従って漏水対策を施すことにより水使用量の低減を図ることが可能となる。更に開発システムでは、気象災害の規模や種類、稲の生育段階に応じて稲の被害率を演算し、可能な限り被害を回避するよう各水田への水配分計画立案を行っている。そのため冷害・干害等の気象災害が発生しても安定した収量を確保することが可能となる。

開発システムでは、上記のシステム機能を、①稲の生育予測、②水田目標水位設定と給排水バルブの制御、③外乱を取り除いた平均水位（制御量）推定、④田水消費量予測、⑤気象被害最小化のための複数水田群への用水最適配分、の5つのアルゴリズムで実現している。以下、第2章にて開発システムの概略を示し、第3章以降にて上記アルゴリズムの概略を示す。

2. 水管理システムの全体構想

2.1 システム構成

Fig. 1 に開発システムの概念図を示す。1 ha 規模の大区画水田×数十枚程度を管理対象とし、各水田ごとに設置した複合センサ1式、給排水バルブ各1式、フィールドユニット2式、及び地域内に設置した水管理ホスト

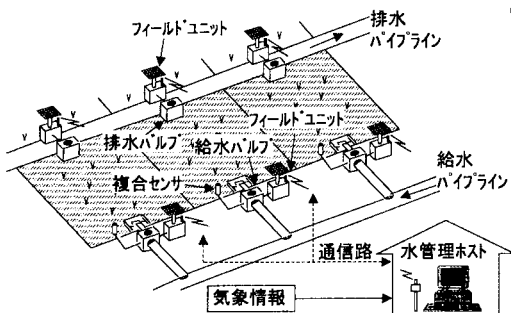


Fig. 1 Schematic diagram of water management system for paddy field.

1式により構成する。複合センサは水田内部に設置し、その半導体センサ部により水田の水位・水温・導電率を計測する。給排水バルブは給排水パイプラインと水田とを結ぶ管路上に設置し、バタフライ弁とその駆動装置、パイプ水圧計より構成する。駆動装置は下記制御ユニットより制御され、その動作時消費電力12V/0.3A、待機時消費電力3mAの小電力設計のものを採用した。また弁開度とパイプ水圧計測値よりその給排水量を演算可能とした。フィールドユニットは複合センサと給排水バルブの近傍に設置し、複合センサと給排水バルブに対して電力供給を行う太陽電池とバッテリー、水管理ホストとのデータ送受信を行う無線ユニット、水管理ホストからの制御信号に従って給排水バルブの駆動を行う制御ユニットより構成する。無線データ伝送には免許の不要な特定小電力無線（430MHz/10mW）を用い、一般の農家でも利用可能としている。無線の伝送距離は500m程度と短めであるが、中継伝送可能なため、各水田にフィールドユニットを設置することにより、広範囲の大区画水田地域を十分カバーできる能力を持つ。

水管理ホストは、PC、外部記憶装置、通信制御装置等の情報処理デバイスによって構成され、24時間稼働の必要性から耐雷トランスと無停電電源装置を備えている。各水田設置機器から15分周期で無線伝送される各種計測データと、CRC総研等の気象情報提供システムからNTT回線を介して1日2回送信される地域気象予報データ（1kmメッシュ、15分周期、4日先までの気温・湿度・日射・雨量・風向・風速）とを受信・蓄積するとともに、上記データに基づいて各水田の給排水バルブ開度を決定し、フィールドユニット内制御ユニットを介して15分周期で給排水バルブの遠隔制御を行う。

2.2 従来システムの課題と研究開発システムの特長

最も実用化が進んでいる水管理システムとして文献3)の水管理システムが挙げられる。この従来システムでは、冷害対策としての深水灌漑機能が充実しているほか、多くの水管理作業の省力化が図られている。しかしながら水管理作業の完全自動化、水使用量の低減、安定した収量確保の観点から鑑みて、いくつかの問題点が存在する。これを以下に示す。

(1) 水稲栽培では稲の生育に応じた適切な目標水位管理が要求されるため、現在の稲の生育段階を把握することが必要不可欠となる。従来システムでは稲の生育を表す指標として稲丈と葉面積指数を採用しているが、1～2週間ごとに人手で計測しなければならないため、完全な

意味での自動化が図られていない。

- (2) 風の強い水田地域では、風上と風下で数センチ以上の水位差が発生することがある。そのため制御量である水田水位計測値は大きく変動し、精度の高い水位管理ができなくなる。これは無駄な給排水の繰り返し（ハンチング）の原因にもなる。
- (3) 水田ではモグラやザリガニのあけた横穴により漏水が発生することがある。そのため本来不要であるはずの無駄な給水が行われる。
- (4) 給水終了後に降り始めた雨水が余剰水として排水される場合があり、水資源としての雨水の積極的な有効利用が図られない。
- (5) 冷害対策としての深水灌漑において、水が豊富であることを前提としており、水が足りない場合について考慮していない。特に冷害等の気象災害は水田地域全体に起こりうる問題であるため、複数水田全体として気象災害対策を考える必要がある。

上記の問題点を解決するため、本研究では、5つのアルゴリズムを開発し、水管理ホスト上に実装している。その機能と構成を Fig. 2 に示す。

①生育ステージ予測では、気温データに基づいて毎日の稲の生育予測を行う。②目標水位設定では、稲の生育に応じた水田目標水位とその許容範囲を設定し、給排水バルブによる水位制御を行う。近い将来降雨が予想される場合には、目標水位の下限値を低めに設定し給水を猶予するといった雨水利用型の制御を行う。更に稲の冷害

危険期において低温が予想される場合には、目標水位を高め設定し深水灌漑を行うことにより冷害を回避する。

- ③平均水位推定では、水田水位計測値から風の吹き寄せによる水位変動の影響を取り除いた平均水位を推定し、該平均水位を制御量とすることにより制御の精度向上を図る。
- ④田水消費量予測では、各種気象予報データに基づいて4日先までの田水消費量（減水深）予測を行う。そのため、数日に1回しか灌漑の順番が回ってこないような輪番灌漑地域において、過不足ない灌漑用水量の決定支援が可能となる。また予測された田水消費量と平年値との比較により漏水検知も可能となる。
- ⑤用水最適配分では、複数区画からなる水田地域において、利用可能な地域用水量が限られている場合の、気象被害を最小とするような各水田への水配分量の決定を行う。

以下、上記5つのアルゴリズム機能の実現手段を示し、検証を加える。

3. 生育ステージ予測

予測モデルには、全国的に広く利用され、日平均気温のみから稲の生育ステージを容易に予測可能な DVI 予測モデル (Development Index Model) を採用する⁴⁾。

$$DVI = \sum_{\text{田植日}}^{\text{予測日}} \frac{100}{A} (1 - e^{-B(T_i - C)}) \quad (1)$$

ここに、 T_i は田植日より数えて i 日目の日平均気温 (°C) であり、 A, B, C は稲の品種・地域によって定まるパラメータである。

式(1)右辺のΣ内は、日平均気温によって定まる1日の稲の生育速度である。これを日々積算することにより DVI 値と呼ばれる稲の生育ステージが求められる。DVI 値0が田植日に、DVI 値100が出穂日に対応しており、またそのように未知パラメータ A, B, C の同定が行われる。

1989年から1995年までの茨城県産コシヒカリの出穂日データ、及び日平均気温データを用いて最小2乗法によりパラメータ同定を行った結果、 $A=72.72, B=0.25, C=12.4$ を得た。このときのモデル(1)による出穂日の予測結果を Table 1 に示す。冷害年の1993年を除いてほぼ1日程度の誤差に収まっており、実用的な精度で生育予測が行われていると考える。

目的	システム機能	アルゴリズム
水管理作業の自動化	稲の生育予測	①
	稲の生育に応じた水位制御	②
水使用量の低減	水田水位計測値から風・外乱の影響を除去し、水田平均水位を推定	③
	4日先までの田水消費量(減水深)予測	④
安定した収量確保	降雨が予想される場合は給水を猶予	②
	低温が予想される場合は深水灌漑	②
	気象被害の最小化を図る用水最適配	⑤

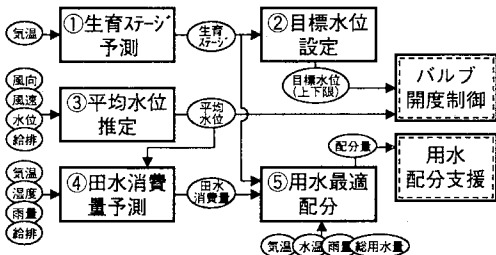


Fig. 2 Function and structure of algorithm.

Table 1 Prediction result of heading date.

年	出穂日 (田植後日数)	予測日 (田植後日数)	誤差 (日)
1989	95	94	-1
1990	84	84	0
1991	82	83	+1
1992	93	95	+2
1993	99	92	-7
1994	84	84	0
1995	87	87	0

4. 目標水位設定

水田目標水位の設定には、稲の生育ステージ (DVI 値) と目標水位との関係を示した目標水位テーブルを用いる。Fig. 3 に目標水位テーブルの一例を示す。横軸が DVI 値、縦軸が目標水位となっており、上記算出された稲の DVI 値より目標水位を一意に決定できる。目標水位にはその許容範囲を割り当てており、該許容範囲内に水田水位 (正しくは水田平均水位) が収まるよう、15分周期で給排水バルブの比例開度制御を行っている。

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。

また本機能は、以下に示すいくつかの水管理ルールを記憶し、実行する。

- (1) 現在より48時間以内の降雨量予測値の合計が20mmを超えるならば、現在の目標水位の上下限値を20mmだけ低く設定する。
- (2) 稲の生育ステージが穂ばらみ前期 (冷害危険期) でありかつ気温予測値が20℃以下である場合は、目標水位を25cmに設定する。

ルール(1)により、上述の降雨が予想される場合、給

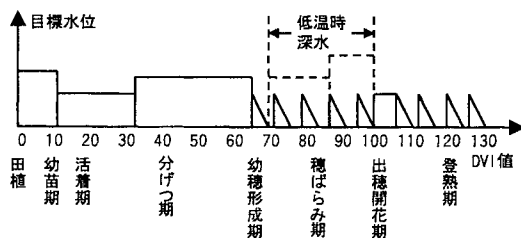


Fig. 3 Target water level.

水パイプラインからの水田給水が猶与され、用水補給が雨水によって賄われるようになるため、給水量の節約が可能となる。

ルール(2)により、上述の冷害が予想される場合、特に夜間において気温より温くなる水田水で稲が保護されるため、冷害の回避が可能となる。

5. 平均水位推定

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、精度の高い水位制御を行うためには制御量である水田水位から外乱の影響を取り除くことが不可欠となる。そこで本機能では、水位計測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する。水田水位に短期的に影響を及ぼす物理量は水田の給排水量、雨量、風向・風速であると考えられるため、上記物理量の計測値から推定を行うものとする。但し、推定に用いる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 (水田端水位) とする。

以下、5.1節では、水田水位に対して多大な影響を与える物理現象として風の吹き寄せに着目し、風向・風速と吹き寄せ水位上昇量との関係を示す。5.2節では上記関係に基づくモデルの構築と水田実データによるモデルの検証を行う。

5.1 強風時の水田水位特性

水田水位に対する風の影響は吹き寄せ水位上昇及び風波による水位変動として現れる。従って風を考慮した水位推定モデルを考える際は、その両方を考慮したモデルとすべきである。しかしながら風波による水位変動はその周期が0.5秒程度と小さく、かつ複合センサによって計測される水田水位は、10秒ごとに計測された水位の15分平均値であることから十分無視できると考える。

本研究では、強風時の水田水位特性を把握するため、茨城県美浦村に実験水田を手配し、基礎データの収集を行った。実験水田の規模と設備配置を Fig. 4 に示す。ほぼ正方形の実験水田の対角線上に水位計1, 2を配置し、水田に隣接するポンプ機場に風向・風速、雨量等の気象値を計測する気象観測ロボットを設置した。但し給排水量計は未設置である。1997年5月21日から9月末までの期間において、15分ごとの平均値として上記水田水位、風向・風速、雨量の計測を行った。

水位計設置方向 (水位計2から水位計1に向かう方向を正とする) に対する風速成分を補正風速 u とし、補

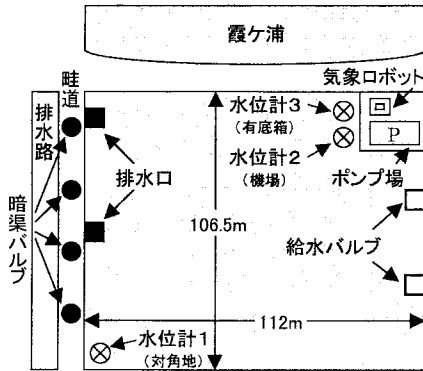


Fig. 4 Experimental equipment

正風速の2乗値に補正風速の符号を付加した新たな風速を $v (=u^2 \cdot \text{sgn}(u))$ とする。吹き寄せ水位上昇量 h_w (水位1 - 水位2) と風速 v との散布図を Fig. 5 に示す。田植え後20日経過時点 (5月21日) の散布図から回帰式 $h_w = 0.30 \cdot v + 0.06$ を導出でき、回帰係数に関して有意な関係が認められた。出穂期時点 (8月4日) の散布図からは回帰式 $h_w = 0.05 \cdot v + 0.55$ を導出できたものの、回帰係数、回帰定数ともに有意とは言えなかった。

上記実験結果から、吹き寄せ水位上昇量は補正風速の2乗に比例するが、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事が判る。

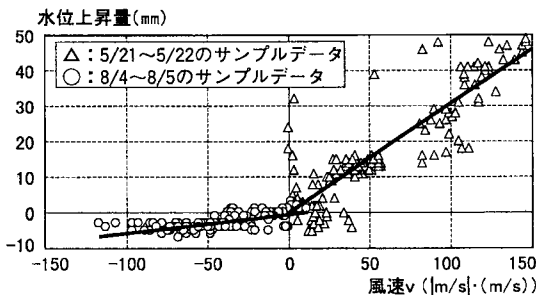


Fig. 5 Relationship between wind velocity and rise in water level

5.2 推定モデルの構築と検証

真の水田水位である平均水位を推定するには、吹き寄せ発生時の水位上昇量の把握のみならず、更にその水面形状をも把握しモデル化する必要がある。ここでは吹き寄せ発生時の水面は平面であると仮定してモデルの構築

を行う。

上記仮定より水田平均水位は上記2地点の水位の平均値に一致するため、前節にて示した回帰式を用いれば、風向・風速及び1水田端水位から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、水田端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 理論に基づいて⁵⁾、独自に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、観測方程式は次のように導出できる。時点 k における水田端水位、平均水位、補正風速、比例パラメータをそれぞれ h_k, x_k, u_k, p_k とすれば、吹き寄せ水位上昇と補正風速との関係より、

$$h_k - x_k = p_k \cdot v_k \tag{2}$$

$$\text{ここに、} v_k = u_k^2 \cdot \text{sgn}(u_k)$$

が成り立つ。非線型項 $p_k \cdot v_k$ を線形化して、観測方程式は、

$$h_k + p^* \cdot v^* - p^* \cdot v_k = [1 \quad v^*] \begin{bmatrix} x_k \\ p_k \end{bmatrix} + e_k \tag{3}$$

となる。ここに e_k は観測誤差であり、また p^*, v^* の値は時点 $k-1$ 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 までの水田に対する雨量 r_{k-1} 、給排水量 q_{k-1} (水位換算) とすると、水収支関係より、

$$x_k = x_{k-1} + r_{k-1} + q_{k-1} \tag{4}$$

が成り立つ。ここで比例パラメータ p_k の短期的時間変動はないものとみなせば、システム方程式は、

$$\begin{bmatrix} x_k \\ p_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ p_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{k-1} + q_{k-1} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{k-1} \\ w'_{k-1} \end{bmatrix} \tag{5}$$

となる。ここに w_k, w'_k はシステム誤差である。

上記モデル式(3)(5)に対して Kalman-Filter アルゴリズムを適用し、H9年の実験水田で計測された水位2、雨量、風向・風速データを用いて平均水位を推定した結果

を Fig. 6 に示す。但し給排水量データは未計測のため非給排水時のデータを用いた。5月時点での推定結果より、強風のため水位2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。真の水田水位を水位1と水位2の平

均値と仮定した場合、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。精密な水管理が必要となる寒冷地方において1cm単位の水管理が要求されることから鑑みて⁶⁾、十分実用的な精度で平均水位推定が行われていると考える。

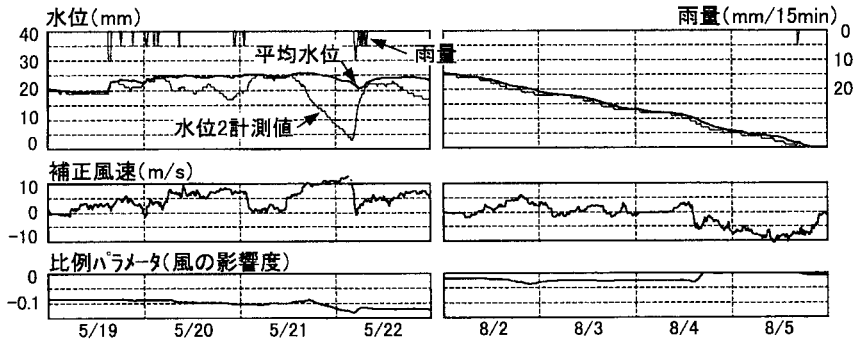


Fig. 6 Estimation result of mean water level.

6. 田水消費量予測

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⁷⁾、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。蒸発散量推定値 E 、地下浸透量推定値 C は、

$$E = \frac{1}{\ell} \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{e^*(T_a) - e_a}{r_0} \quad (6)$$

$$C = \frac{dh}{dt} + Q + r - E \quad (7)$$

ここに、 T_a : 気温 (°C)、 e_a : 空気の水蒸気圧 (mmHg)、気温・湿度の関数)、 e^* : 飽和水蒸気圧曲線 (mmHg)、

Δ : 曲線 e^* における気温 T_a での微分値 (mmHg/°C)、 R_n : 純放射量 (日射量、葉面積指数の関数)、 r_0 : 空気力学的抵抗 (風速の関数)、 ℓ : 水の蒸発潜熱 ($\approx 2.5 \cdot 10^6$ J/kg)、 γ : 乾湿計定数 (≈ 0.50 mmHg/°C)、 h : 水田水位 (mm)、 Q : 給排水量 (mm)、 r : 雨量 (mm) として記述できる。

モデル式(6)(7)により上記実験水田における1998年5月18日から6月17日までの日蒸発散量、日地下浸透量を推定した結果を Fig. 7 に示す。各物理量の真値は、実験水田の水田水位、有底箱水位の水位変化から算出した。蒸発散量推定誤差の標準偏差1.12mm/day となり、晴天時・降雨時ともに真値とよく似たトレンドを示している。晴天かつ非給排水時における地下浸透量推定誤差の標準偏差0.79 mm/day であるが、降雨時は雨量に比べて水田水位上昇量が大きく計測されているため、真値、推定値ともに不自然な値（負の値）となった。これは計測系の問題であり、推定精度向上のためには降雨による水田水位上昇量をより正確に計測することが必要となる。

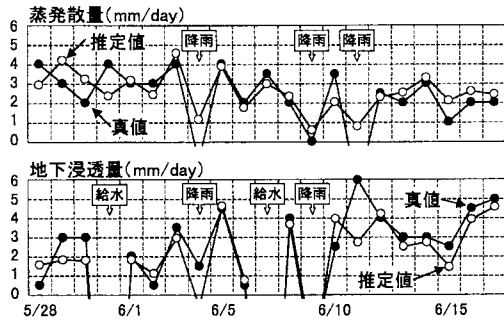


Fig. 7 Estimation result of evapotranspiration and infiltration

7. 用水最適配分

水田水管理は単に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、冷害、風害、水害、干害等の気象災害を、ある程度回避させることが可能となる。例えば冷害回避のためには、水温が気温より高いことを利用して稲を水田水で保護してしまう深水灌漑が有効であるとされる⁸⁾。しかしながら冷害等の気象災害は水田地域全体に起こりうる問題であるため、例えば渇水等により各水田が深水灌漑を行うに十分な水量が得られない場合、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。そこで本機能では、利用可能な地域用水量が限られている場合の、気象被害を最小とするような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。

以下7.1節では気象被害を軽減させるための水管理の在り方について述べ、7.2節では全気象災害の61%を占める冷害⁹⁾に関し、その被害率計算方法を提案する。7.3節では上記被害率計算に基づく水配分最適化問題を構築し、7.4節にて冷害被害最小化のための最適水配分シミュレーションを行う。

7.1 気象被害軽減のための水管理

稲作に対する気象災害には冷害、風害、水害、干害等さまざまな災害があるが、これらの災害は水管理によって被害の軽減が可能である。水害・干害は水田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。

十分な水が得られないときの被害軽減方法としては、節水栽培と呼ばれる水管理方法が有効である⁸⁾。例えば水稲が干害被害を受けやすい時期は苗の移植期・穂ばら

み期・出穂開花期でありその他の時期は比較的干害の影響が少ないため、限られた用水を必要な時期の水田に使うよう節水を行う。また一度被害を受けた水田はその回復が困難であることから、被害の少ない水田に用水を優先配分することも被害軽減に有効である。

上述のことから、気象被害を軽減するための複数水田群への水配分方法の指針を纏めると、

- (1) 気象災害危険期の水田に対して優先的に水配分
- (2) 未被害の水田に対して優先的に水配分となる。

7.2 冷害時の被害率計算方法

上記水配分指針に基づく複数水田群への水配分量を決定するためには、水配分を行ったときの水田の被害率を定量的に計算できることが必要不可欠となる。そこで本節では被害率計算法の一例として、冷害の被害率計算方法を示す。

水稲の中で実際に冷害被害を受けるのは穎花（小穂）の部分であり、穎花が低温にさらされることにより花粉の充実不良による受精障害が発生する。冷害被害率は稲の生育時期や低温条件、低温継続日数によって変化し、穂ばらみ前期（小穂内で花粉が形成される時期）が最も冷害の影響を受けやすく、また低温条件が低くなるほど、低温継続日数が長くなるほど冷害被害率は高くなる。

各種実験によって得られている結果をFig. 8, Fig. 9に示す。Fig. 8は、穂ばらみ前期の穎花の地表面からの高さに応じた累積頻度の一例である⁹⁾。またFig. 9は、穂ばらみ前期の稲の低温条件、低温継続日数に応じた冷害被害率の一例である¹⁰⁾。これらの定量的関係を用いることにより、水田への水配分量から該水田の冷害被害率を、以下のようにして計算できる。

- (1) 穎花の分布範囲をいくつかの領域に分割し（Fig. 8参照）、稲の生育に応じた「地表面からの高さ」と穎花累積頻度との関係に基づいて、各領域における穎花存在率を算出する。
- (2) 水田への水配分量から、減水深や雨量を考慮して数日先までの日平均水田水位を予測する。
- (3) 上記日平均水位と上記各領域の高さを比較し、各領域での温度（気温/水温）を数日先まで予測する。
- (4) 上記各領域において、稲の生育に応じた「低温条件」と冷害被害率との関係に基づいて、各領域での冷害被害率を算出する。
- (5) 上記各領域における穎花存在率、冷害被害率より全領域での加重平均を算出し、該水田の冷害被害率とする。

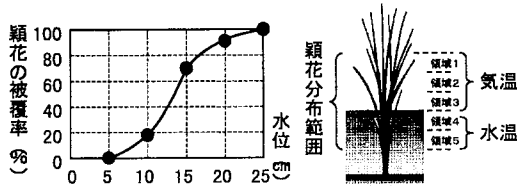
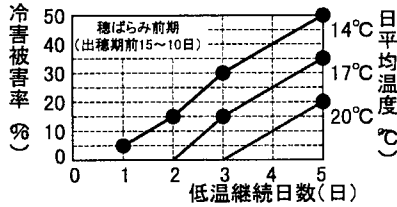


Fig. 8 Relationship between water level and rate of spikelet covered with water.



* 図示した基準温度 (14, 17, 20°C) 以外の日平均温度に対する冷害被害率曲線は、既存の曲線より線形補間する。
 ** 毎日の日平均温度が異なる場合は、同じ温度が継続するよう該温度条件を緩和(上昇)させた場合に導出される被害の中で最大のものを採用する。

Fig. 9 Relationship between low temperature and damage on rice crop.

7.3 水配分最適化問題の構築

利用可能な地域用水量が限られている場合の、気象被害を最小とするような各水田への水配分量は、各水配分量の合計が上記地域用水量以下であるという制約条件の下で、地域全体での被害量を最小化する最適化問題を解くことによって求められる。

即ち、水田枚数を N 枚とし、水田 i での第 j 日目の水配分量 x_{ij} 、地域用水量 T 、水田 i の未被害面積 S_j 、水田 i の被害率 $f(x_{ij})$ とすると、最適化問題は、

$$\sum_i x_{ij} \leq T \quad (8)$$

$$\text{目的関数：地域被害量 } J = \sum_{i=1}^N S_i \cdot f(x_{ij}) \rightarrow \min \quad (9)$$

として構築できる。但し、被害率算出のために必要となる水田初期水位、減水深、雨量等の予測値は既知とする。

7.4 最適水配分シミュレーション

本節では、冷害被害を最小化するような複数水田群への4日先までの最適水配分シミュレーションを行う。水配分期間を4日先までとしたのは、①冷害到来を把握するためのメッシュ気温予測の予測限界が4日先であることと、②水不足地域において普及している輪灌灌漑が通常数日ごとに行われていること、のためである。

1 ha 水田×30枚からなる水田地域において、4日先までの日平均気温15°C、日平均水温18°C、日降雨量0 mmとして冷害の到来を仮定し、本日から4日先までに利用可能な総用水量21,000m³ (1水田当たり平均70mm)として各水田への水配分量を決定する。最適水配分の傾向を把握しやすくするため、30枚の水田を10枚づつA, B, Cの3つの地区に分類し、A地区は穂ばらみ前期(冷害危険期)、B, C地区は穂ばらみ中期(冷害安全期)とし、更にC地区のみ既に20%の生育被害を受けているものと仮定する。また各水田における初期水位はランダム(平均140mm)に設定し、4日先までの減水深は毎日10mmとした。上述の水田条件に基づいて7.3節に示す最適化問題を構築し、目的関数内の被害率計算には7.2節に示す冷害被害計算法を用いて、滑降Simplex法¹¹⁾による求解を行った。滑降Simplex法は目的関数の計算値のみで最適化計算が可能のため、目的関数の微分不可能点が存在する本問題には好適である。

Fig. 10に最適配分結果と各水田の被害率を示す。最適配分では、冷害危険期にあるA地区に優先的に水配分

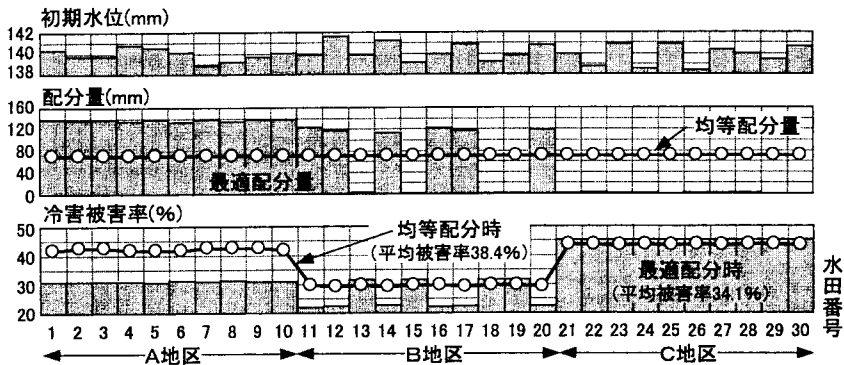


Fig. 10 Simulation result for optimal water distribution.

が行われ、既に生育被害を受けているC地区にはほとんど水配分が行われておらず、7.1節にて示した被害軽減のための水管理指針を実行できていることが判る。またB地区では初期水位の高い水田ほど配分が多くなっており、水を有効利用できていることが判る。このとき均等配分時の平均被害率38.4%に対し、最適配分時の平均被害率34.1%となり、4.3%の被害軽減(収量向上)が可能となる。

8. むすび

本研究で開発した5つのアルゴリズムのうち、平均水位推定と用水最適配分は従来の水田水管理にはない新たな発想であると考え。平均水位推定では、水田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) 川尻：素朴な用水論, pp.155, 公共事業通信社(1993)
- 3) 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)
- 4) 新潟県農林水産部：参考にする技術 参考となる情報, pp.12-13(1994)
- 5) 片山：応用カルマンフィルタ, 朝倉書店(1983)
- 6) 青森県農林部水田対策課：稲作改善指導要領, pp.108-115(1996)
- 7) Penman, H. L.: Natural evaporation from open water, bare soil and grass, Proc. Roy. Soc. A193, pp. 120-145(1948)
- 8) 水管理研究会：水田の水管理と圃場整備, 地球出版(1972)
- 9) 和田：水稻の冷害, 養賢堂(1992)
- 10) 新潟県農林水産部：改定 水稻, 麦, 大豆, 野菜, 果樹, 花き, 養蚕の被害推定尺度および技術対策(1981)
- 11) W. H. Press et al.: Numerical Recipes in C, pp. 295-299 技術評論社(1994)

(受付 1999. 1. 12)

(受理 1999. 3. 2)