

先行降雨指数を用いた沼沢地の灌漑制御方法 に関する研究

加治佐隆光・木本 凱夫
三重大学生物資源学部

Relation between Antecedent Precepitation Index and Water Level in Drying Wetlands

Takamitsu KAJISA and Yoshio KIMOTO
Faculty of bioresources, Mie University

Abstract

For conserving the plants in the wetland where is gradually drying up, the effects of irrigation by using pumps has been discussed. Because the geographical feature of the wetland is too complicated to estimate the water balance, the effects of irrigation was discussed here from the stochastic relation of antecedent precipitation index (API) and the water level in the wetland. For this purpose, the precipitation, the water level, and the suction of unsaturated soil in the wetland were measured in this study. And in this paper, API is extended from the original one, which is the function of only daily precipitation, to the function of precipitation and pumped-up specific discharge of each day.

In the measured wetland, the water level was sufficiently high in the season of high API. When API reached one of the low point in the dry season, the water level became drastically low. As a result, it was clear that this low limit of API could be one of the critical low point of API for the wetland plants to survive.

From the daily measurements of the suction of unsaturated soil in the wetland, it was clarified that the constant amount of irrigated water was essential for reducing soil suction to neary zero. The zero value of suction seems to be preferable wetness needed for the wetland plants to be protected.

These two conditions of water level and soil suction are both important for wetland plants to survive. This means that it will be very practical procedure to evaluate the daily API of precipitation and pumped-up discharge for controlling the water circumstances of the wetland.

For comparing some control rules of automatic pumping-up irrigation system, the numerical simulation was tried by using the API and the total amount of pumped-up water for one year. As a result, one example of the rules showed that it was possible to use API not only for the evaluation of the each controle rule but also as the parameter of the control rule.

Key words: API · wetlands · water management

I. はじめに

本論では、湿田から乾田へと整備された圃場に周りを囲まれた沼沢地が植物生態学上、貴重な植物群落を失いつつ陸化してゆく際の水環境の変化について、主にその保護対策を前提とした解析を行った。

降雨の少ない時期、このような沼沢地内の池の水位 h (cm) は小さくなり水面積が急激に減少してゆく (写真 1, 2 参照)。このように水位の減少する時期には沼沢植物以外の植物の繁茂が危惧される。したがって、人工的に灌漑することが重要となる。本論では、このように水位が減少することのない灌漑システムの有効利用を考えて解析に着手した。

こういった灌漑システムの制御規則の設定は、池の水位とか減水深に注目すれば、当初には容易なことと思えた。しかし、後述の III. と IV. に示したように沼沢地に特有と思える水環境の存在が明らかになったので、日々の定常的な必要水量の成分を重視した制御規則の構築を現況のポンプ運転状況に即して試みた。Table 1 の pH の欄にも示したようにポンプ揚水の水質に全く問題がない訳ではない。従って制御規則の最適な条件は、総揚水量の極小化とした。そして、制御規則に適用するパラ

メータの最適値を探索した。

提示されたいくつかの制御規則の効果については、評価指標を設けて比較した。その際に必要となる沼沢地内の水環境を表すモデルとしては、後述の IV. に示すように、沼沢地の水収支モデルの構築は非常に困難と考えられたので、先行降雨指数を適用した統計的なモデルの構築を試みて結果を提示した。本論では、沼沢地への灌漑計画に対するこのモデルの有効性を具体的に検討する。沼沢地の灌漑制御方法のうち、先行降雨指数を利用するのは制御方法のひとつに過ぎない。しかし、沼沢地に関する灌漑制御に言及した論文が見あたらない現状において、本論中の考察は新しい知見のひとつになると考える。

なお、制御規則については、節水上の目的からリアルタイムに降雨強度 (mm/h) などを観測して制御する規則が实际的である。しかしここでは、沼沢地内の乾湿状況に関するシミュレーションを容易に行うために日雨量 R (mm/day) で代用した。

II. 地区概況

観測対象とした沼沢地内の沼沢植物群落は天然記念物に指定されており、乾燥化に対しても慎重な対処が求め



写真 1 乾燥状況の一例 (API=31 mm, $h=-97.6$ cm) 1990/09/12



写真 2 湿潤状況の一例 (API=58 mm, $h=-65.9$ cm) 1990/10/27

られている。全体の面積は 28514 m² である。地区概況を Fig. 1 および Table 1 に示す。

1992年現在、この沼沢地には毎日の定時に比流量で 4.8 mm/day (12.6 l/s) の定常的な灌漑が行われている。水源は地下水であり、ポンプで朝夕90分づつ揚水し灌漑している。

沼沢地は Fig. 1 にも示したように、混在した池と陸域からなる。陸域で比較的標高の高い箇所では根群域の数十 cm 下に地下水があって、池の貯水と連動していると考えられる (Figs. 2(a), (b) 参照)。地下水位の観測場所は Fig. 1 に図示されている観測井 1, 2 である。池の水位は満水時には基準点からほぼ -60 cm である。

現在、毎日行われている一定量の灌漑によって、根群域の水分張力 ψ はほぼ 0 cm H₂O に保たれている。水分張力 ψ の観測場所は Fig. 1 に示されている観測井 1 に隣接している。 ψ 測定箇所の地面は基準点から約 -26.5 cm であり、水分張力 ψ のセンサーは地表面下 20 cm にあるので基準点から約 -46.5 cm の高さに相当する。

定常状態でかつセンサーと同じ高さに水面が位置している場合、理論的に ψ はゼロ cm H₂O である。定常状態でかつセンサー上の地表面の高さに水面が位置している

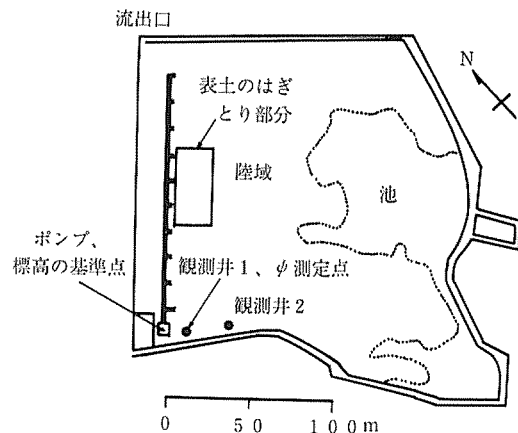
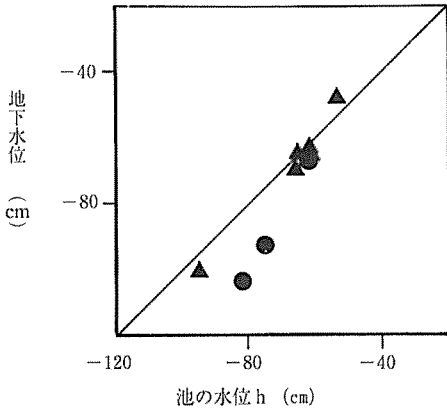


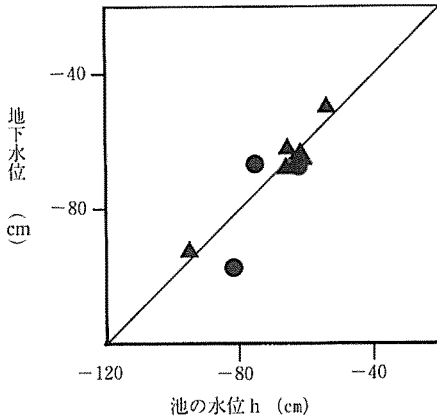
Fig. 1 地区概況図 (文献¹⁾の資料に加筆)

場合、理論的には ψ は -20 cm H₂O である。土壌が乾燥する程、 ψ は大きくなる。なお、 ψ の測定には大起理化工業 (株) の DIK-3202 を用いた。

農作物のための普通畑としては、0 cm H₂O に近い水分張力 ψ は過小であり水分過多と言える。しかし、陸化が問題となっているこの沼沢地内の沼沢植物にとってこの程度の水分張力 ψ はむしろ好ましい状況であり、数十 cm H₂O といった大きな水分張力 ψ は沼沢地とし



(a) 観測井 1 における地下水位状況



(b) 観測井 2 における地下水位状況

Fig. 2 地下水位と池の水位との関係
丸印：1989年度，三角印：1990年度

ては過大であると考えられる。

Ⅲ. 沼沢地への灌漑の効果と灌漑水量の成分

水質などに関することを除いて水量のみに関する水環境を考える。沼沢地に対する灌漑の効果を考えることによって、沼沢地に対する灌漑水は、ほぼ以下の①と②の成分で説明できると考える。

① 土壌水分張力調整のための土壌への定常的な必要水量の成分

ポンプが数日間停止した際には、降雨もなくすべての水分補給が停止したので、この水分張力 ψ は時間的に見て小さい正午においても 40 cm H₂O 近くにまで上昇することを観測した（後述の Fig. 3 (b) 参照）。この観測結果は II. に示した ψ 測定点における結果であるが、陸域の土壌の水分張力状況を表す代表的な例であると考ええる。すなわち、水位 h のある程度高く維持されている状況下でも灌漑の必要性が生じる。

沼沢地全体で水位 h の設定値を水分張力 ψ のセンサーの深さまで上昇させれば、根群域の水分張力 ψ は 0 cm H₂O 近くになるものと予想できる。すなわち、上記の -46.5 cm の高さまで水位を上昇させて、しかもその水位を一定に保てば、上述のように根群域の水分張力 ψ は 0 cm H₂O 近くで一定に設定される。

しかし、観測対象とした沼沢地以外の湿潤な沼沢地では、沼沢地内に常時、自然水の流入のあるところが少なくない。そういった意味から、土壌中の水分張力 ψ のみならず植生に対する地中の空隙の必要性とか温度環境

Table 1 観測地区の概要（文献^{1,2)} から引用）

位置	三重県北勢地区
年平均気温	14.9°C (1967~1980年)
年平均降水量	1827.7 mm (1967~1980年)
標高	35 m 内外
面積	28514 m ²
地形	湿地帯
表土の地質	腐植土
池水の pH	pH 5.0 (1968年), pH 5.5 (1971年), pH 6.6 (1983年)
揚水の pH	pH 8.0 (1979年, 給水施設工事は1978年度)
周辺の土地利用状況	1890年頃から水田として利用されはじめる 1965年代には圃場整備事業によって乾田化

なども合わせて考えれば、水位 h を高く設定することは必ずしも安全な対策とは言えない。

このように、沼沢地内の土壌に対して日々、流入する水の定常的な成分を特に考慮しておくことは、沼沢地などの水環境を議論する際に重要なことである。

以下では、土壌の水分張力 ψ が小さく維持される程度の定常的な必要水量の成分を考慮しつつ灌漑システムの制御を考える。ただし、雨天日などには降雨によって根群域の水分張力 ψ は減少するであろうから、水分張力 ψ 減少のための灌漑は不要と考える。

② 池の水位維持のために必要な水量の成分

陸域の広がりが見られるほどに水位 h が低下する際には、沼沢植物以外の植物の繁茂が懸念される。したがって、水位 h の低下が顕著である場合には、水位 h の上昇のための灌漑を行う必要がある。

以上の①と②に示したように、観測対象とした沼沢地への灌漑は、主に水分張力 ψ の低減と水位 h の維持といった二つの効果をもたらしている。ただし、この両成分は状況に応じて重複し得る。

このような観点から、本論では沼沢地への灌漑水量 Q_{pump} は日雨量 R_0 を加味して以下の二式を満足する必要がある。

$$Q_{\text{pump}} + R_0 \geq Q_{\psi}$$

(土壌への定常的な必要水量の成分に関する条件式)(1)

$$Q_{\text{pump}} + R_0 \geq Q_h$$

(h の維持のための必要水量の成分に関する条件式)(2)

Q_{pump} : ポンプ揚水による灌漑水量 (mm/day), R_0 : 当日の日雨量 (mm/day), Q_{ψ} : 土壌への流入量のうち、水分張力 ψ を低減することなどに要する日々の定常的な水量 (mm/day), Q_h : 水位 h の維持に要する必要水量 (mm/day)。

一般的に流域の乾湿状況という場合には(1)式に示されているような土壌内の水分量に関連した成分の大きさを言うように思える。しかし本論では、(2)式に示されている水位 h も含めて流域の乾湿状況を表すものとする。

観測対象とした沼沢地に関して、現状では、灌漑システムに故障などが生じないかぎり(1)式はほぼ満足されているものの、降雨の少ない時期には(2)式が満足されてい

ない期間がある。また、 Q_{ψ} が毎日欠かせない成分であるのに対して、池にある程度の貯留機能があるので Q_h は変動的でありゼロとなっても支障ない場合がある。結局、灌漑制御の条件式として次式を得る。

$$Q_{\min} = \begin{cases} Q_h & (Q_h > Q_{\psi} \text{ の場合の条件}) \\ Q_{\psi} & (Q_h < Q_{\psi} \text{ の場合の条件}) \end{cases} \quad (3)$$

ただし、

$$Q_{\min} \equiv \text{|日々の } (Q_{\text{pump}} + R_0) \text{ の最小値} \quad (4)$$

である。

IV. 沼沢地の水環境モデル

灌漑システムの制御規則をシミュレーションによって比較・検証するために、沼沢地の水環境モデルを構築する。水環境モデルを構築するのに際して、水収支モデル導入の有効性の検討と統計的モデルの提示を行った。以下にその内容を示す。

1. 水収支モデルについて

水収支モデルを構築できる場合、次式の各項を求めることによって、日々の水位 h をシミュレートすることが可能となる。

$$E + S = R + Q_{\text{pump}} - Q_{\text{out}} - dV \quad (5)$$

E : 蒸発散量 (mm/day), S : 沼沢地外への浸透などによる地中流出量 (mm/day), R : 降雨量 (mm/day), Q_{out} : 流出口などからの地表流出量 (mm/day), dV : 貯留変化量 (mm/day) である。

一般的に地中流出量 S の日変化は小さいものの、 S の実測は困難である。長期的に(5)式中の各項を積算する過程では dV を無視できるので、 E , R , Q_{pump} , Q_{out} を測定して S を求める。その後、水位変化量 dh と貯留変化量 dV の関係、および水位 h と地表流出量 Q_{out} の関係などを決定すれば、(5)式に従い、仮想的に制御・設定された揚水量 Q_{pump} に対する日々の水位 h をシミュレートできる。

① 水位変化量と貯留変化量の関係把握にともなう困難
水位変化量 dh と貯留変化量 dV の関係について詳しく次式に示す。右辺第1項は池に関して得られた項であ

り、第2項は陸域に関して得られた項である。

$$dV = A_w \cdot dh + A_s \cdot d\theta \cdot dh \quad (6)$$

h : 池の水位であり、沼沢地内の水面から基準点までの標高差 (m), dh : 池の水位の時間的な変化量 (m), A_w : h に対応する池の水面の面積 (m^2), A_s : 水位 h に対応する陸域の面積 (m^2), $d\theta$: 水の貯留に有効な空隙率である。上式右辺の第2項では Figs. 2(a), (b) を参考にし、地下の水位変化量を池の水位変化量 dh で置き換えて示した。

沼沢地においては池と陸域の区別を明瞭に行いがたいので、水位 h の関数としての A_w , A_s を決定しがたい。また、水の貯留に有効な空隙率 $d\theta$ も封入空気などを考えると測定しがたい。結局、水位変化量 dh と貯留変化量 dV の関係は把握しがたい。

② 水位と地表流出量の関係の把握にともなう困難

当沼沢地では、周囲に多くの圃場がある。しかも、水田の排水路内の水位に沼沢地からの流出量が左右される。したがって、沼沢地内の水位 h のみから地表流出量 Q_{out} を求めがたい。

また、ここでは流出口付近の地形も自然の状態に近く、水田の流出口のように固定形状ではない。そういった意味からも水位 h と地表流出量 Q_{out} の関係を把握しがたい。

以上の①と②に示した内容から、本沼沢地に関する水収支モデルの構築は困難と考えられる。これらの困難は観測対象とした沼沢地以外の一般的な沼沢地にも共通の要因であると予想する。

2. 統計的モデルについて

統計的に沼沢地内の乾湿状況を評価する指標としては、種々考え得るが、(1), (2)式からも明らかに日雨量 R と灌漑水量 Q_{pump} を含んでいれば効果的である。そこで、先行降雨指数 API (Antecedent Precipitation Index) を拡張し、灌漑水量を含めた新たな指標として再定義する。

$$API \equiv \sum_{i=1}^n K_i \cdot (R_i + Q_{pump}) \quad (7)$$

API: 先行降雨指数 (mm), ここでは簡単のために午前0時における指数を考えたので、当日の日雨量 R_0 などは式に含めていない。この API は、本論では灌漑水量 Q_{pump} を含めているので、文献^{3,4,5)}に示した本来の API

と異なるが、以下では、簡単のために単に API あるいは先行降雨指数と表わした。n, K: いずれも定数、ここでは引用文献^{3,4,5)}を参考に n を20として、K を0.85とした。これらの n, K の数値を適用した API には、すでに自然河川の低水流量^{3,4)}とか畑地内土壌のサクションとの関係⁵⁾が確認されている。ここでは、考察に際して不都合が生じた場合に、各数値を再考することとした。 R_i : API を求める日から i 日以前の日雨量 (mm/day)。

API と沼沢地の乾湿状況との経験的な関係が求まれば、日々の沼沢地の乾湿状況を近似的ではあるが簡単にシミュレートできる。

V. 観測例

Figs. 3(a), (b), (c) に、障害によるポンプ停止の際の API, 日雨量 R , 灌漑水量 Q_{pump} , および水分張力 ψ 水位 h の日変化を示す。図に示した期間は1990年のポンプ停止の時期も含めて1カ月間となるように7月15日から8月14日とした。日雨量 R は気象台の観測所における日雨量で代用した。この観測所は当沼沢地から約16 km と若干の距離がある。しかし、統計的モデルに適用することもあって、このことによる誤差はさほど重視していない。水位 h と水分張力 ψ は日記録紙からの読み取り値であるが、現地踏査結果との比較を行えるように正午の測定値を用いた。

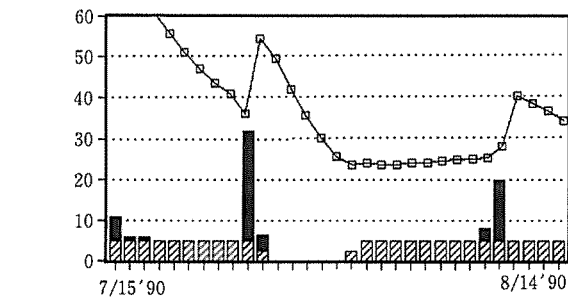
ポンプが修理されて灌漑が再開された後、API は24 mm 程度に維持されている。この期間中、水分張力 ψ は減少し回復に向かうが、水位 h は減少し悪化してゆく。すなわち、ポンプの修理後において(1)式は満足されるが(2)式は満足されない。

この観測対象の沼沢地では、1991年の2月に一部表土のはぎとりを実験的に行った (Fig. 1 参照)。そこで、夏期と冬期に分けて、水位 h と API の関係を Figs. 4(a), (b) に示す。各図では、灌漑水量 Q_{pump} として、現状の4.8 mm/day が適用されている。これらの図から、以下のことを確認できる。

- API がある程度以下 (ここでは40 mm 程度) になると、 h は-70 cm から急激に減少する (Fig. 4(a) の白矢印参照)。

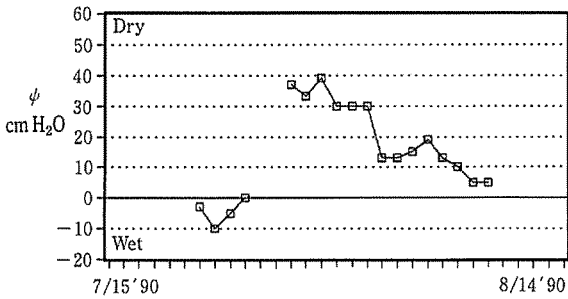
- 水位が急激に減少した後で回復する過程では、ヒステリシスが目立つ (Fig. 4 (a) の黒矢印参照)。
- 表土のはぎとりの影響は当初、危惧したほどではなく、Figs. 4 (a), (b) を較べても表土はぎとりによる違いを確認できない。

現地踏査では、API が 31 mm で h が -97.6 cm の時に、池の底の広い露出を確認した (写真 1 参照)。そこで、本論では、上記のように評価の境となる API を特に API_h と定義して、API と API_h を比較しつつ灌漑システムの制御規則を検証する。

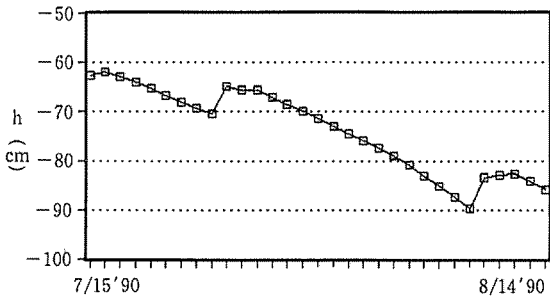


(a) API, R, Q_{pump} の日変化の現況

プロット: API (mm), 黒塗: 日雨量 R (mm/day)
 斜線: 灌漑水量 Q_{pump} (mm/day)

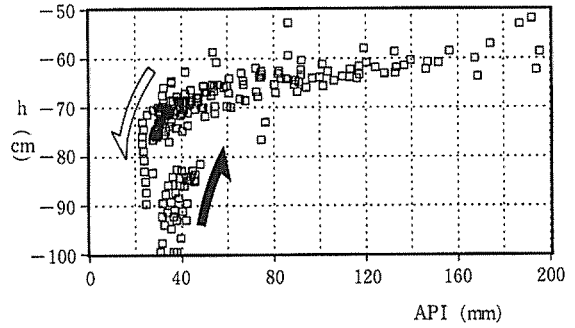


(b) 水分張力 ψ の日変化

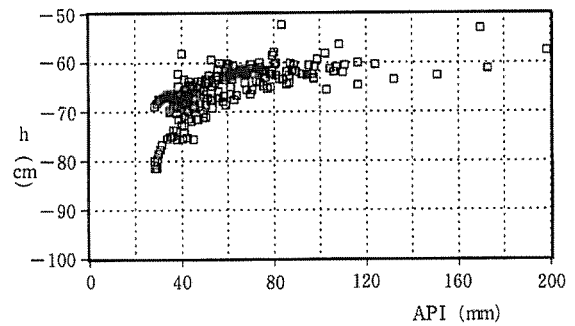


(c) 水位 h の日変化

Fig. 3 ポンプ停止時の実測例



(a) 表土はぎとり以前における測定例
 (1990年7月1日から1991年1月31日まで)



(b) 表土はぎとり以後における測定例
 (1991年2月1日から1991年8月31日まで)

Fig. 4 API と水位 h の関係

$API_h = (h$ が急激に減少し始める際の API, 本論では 40 mm)

(8)

日々の API がこの API_h 以上の場合に(2)式は満足されていると考え得る。すなわち、次式を(2)式に代えて用いる。

$API \geq API_h$

(水位 h の維持のための必要水量の成分に関する条件式)

(9)

VI. 灌漑システムの制御規則と灌漑効果の評価

灌漑システムの制御規則としては種々考え得るが、ここでは沼沢地への灌漑に関する報告事例が少ないこともあって簡単なものを取扱う。制約条件には(1), (9)式を適用した。

1. 灌漑システムの制御規則

以下に灌漑システムの制御規則をいくつか設けてそれ

ぞれの効果を検証する。具体的には一定量 \bar{Q} 、しきい値 R_c 、目標値 API^* 、最小値 Q_{min} などのパラメータをいくつか設定して複数の計算例を示した後、後述の(11)式に従ってパラメータの最適値を求める。

① 現況に準拠した場合 (rule A)

毎日一定の水量が灌漑される場合、すなわち現況に準拠した灌漑システムの制御規則を rule A とする。タイマーのみで灌漑システムが作動する (Fig. 5(a) 参照)。この制御規則を適用した場合、1年間当たりの総灌漑水量は結果的に毎年一定となる。

探索すべきパラメータは次式中の一定量 \bar{Q} のみである。

$$Q_{pump} = \bar{Q} \quad (\text{現況に準拠した場合, rule A}) \cdots (10-A)$$

\bar{Q} : 一定に設定される灌漑水量 (mm/day)。

この場合、明らかに次式が成立する。

$$Q_{min} = \bar{Q} \quad (\text{ただし, rule A の場合}) \cdots (10-A)'$$

最小値 Q_{min} の定義はすでに(4)式に示したとおりである。

② 当日の日雨量で制御する場合 (rule B)

最も簡単と思える灌漑システムの制御規則として日雨量で制御する場合を rule B とする。雨量の大きさにともなって電源のスイッチが入ったり切れたりする簡単な雨センサーの導入を考える。この降雨量が大きい際にはこのセンサーによって灌漑システムが休止する (Fig. 5(b) 参照)。休止の時間としては、まず24時間を想定する。

当日の日雨量 R_0 がしきい値 R_c (mm/day) 未満の場合に、一定量 \bar{Q} (mm/day) だけ灌漑する。しきい値 R_c 以上の場合には灌漑水量をゼロとする。探索すべきパラメータは一定量 \bar{Q} としきい値 R_c である。すなわち、

$$Q_{pump} = \begin{cases} 0.0 & (\text{ただし, } R_0 \geq R_c) \\ \bar{Q} & (\text{ただし, } R_0 < R_c) \end{cases}$$

(当日の日雨量で制御する場合, rule B) $\cdots (10-B)$

R_c : 日雨量と比較されるしきい値 (mm/day)。

また、長期にわたるシミュレーションでは最小値 Q_{min} について明らかに次式を期待できる。

$$Q_{min} = \begin{cases} R_c & (\text{ただし, } \bar{Q} \geq R_c) \\ \bar{Q} & (\text{ただし, } \bar{Q} < R_c) \end{cases}$$

(ただし, rule B の場合) $\cdots (10-B)'$

③ 前日の日雨量で制御する場合 (rule B')

前述の②と同様であるが、前日の日雨量 R_1 を判断材料として灌漑する場合を rule B' とする。すなわち、

$$Q_{pump} = \begin{cases} 0.0 & (\text{ただし, } R_1 \geq R_c) \\ \bar{Q} & (\text{ただし, } R_1 < R_c) \end{cases}$$

(前日の日雨量で制御する場合, rule B') $\cdots (10-B')$

この場合、最小値 Q_{min} には言及しがたい (Fig. 5(b') 参照)。

④ API で制御する場合 (rule C)

(9)式に示されているように、本論では灌漑の効果を API でも評価するので、API を適用して灌漑システムの制御規則を構築する場合を rule C とした。以下に示した手順に従って、灌漑水量 Q_{pump} を算定する (Fig. 5(C) 参照)。

まず、簡単のために当日の日雨量をゼロとした上で、近似的に次日の API を当日の API の K 倍と予想する ((7)式参照)。

次日の API の予想値が予め設定された目標値 API^* 以下とならないように必要水量 Q_{needs} (mm/day) だけ灌漑すると考える。すなわち、

$$Q_{needs} = \begin{cases} API^*/K - API & (\text{ただし, } API^*/K - API \geq Q_{min}) \\ Q_{min} & (\text{ただし, } API^*/K - API < Q_{min}) \end{cases}$$

API^* : 次の日の API の目標値 (mm) である。 Q_{needs} : 次の日の API が API^* 以上となるために必要な灌漑水量 Q_{pump} と R_0 の和である (mm/day)。

n が十分に大きい場合には、次日の API に関する上記の予想には妥当性が高い。したがって、目標値 API^* はシミュレーション期間中の API の最小値に一致するものと期待できる。

当日の日雨量 R_0 と、灌漑水量 Q_{pump} の和が必要水量 Q_{needs} 以上となるように灌漑水量 Q_{pump} を決定する場合、

$$Q_{pump} = \begin{cases} Q_{needs} - R_0 & (\text{ただし, } Q_{needs} \geq R_0) \\ 0.0 & (\text{ただし, } Q_{needs} < R_0) \end{cases}$$

(API で制御する場合, rule C) $\cdots (10-C)$

探索すべきパラメータは目標値 API^* と最小値 Q_{min} である。

以上に示したそれぞれの制御規則には以下のように関連がある。すなわち、現況に準拠して制御する場合の灌漑水量 Q_{pump} は一定値 \bar{Q} に限定される。したがって、日雨量で制御する場合のしきい値 R_c を ∞ とした結果は、現況に準拠して制御した結果に等しい ((10-A), (10-B) 式参照)。

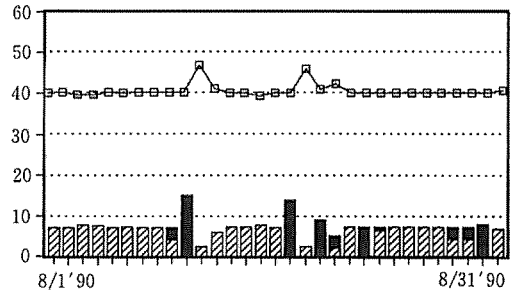
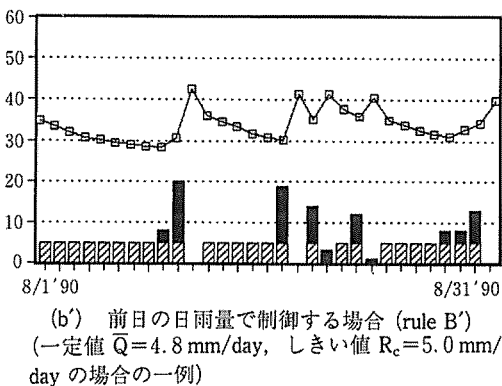
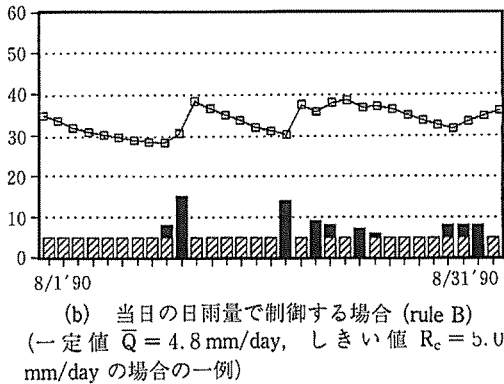
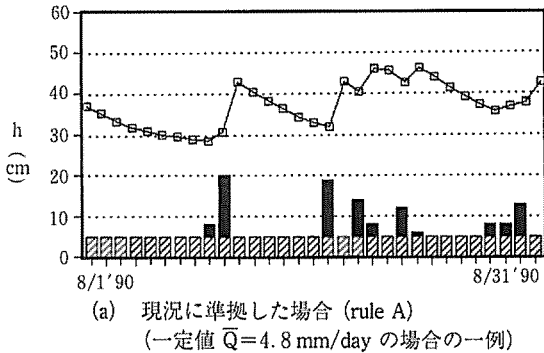


Fig. 5 シミュレーション結果の例
プロット: API (mm), 黒塗: 日雨量 R (mm/day)
斜線: 灌漑水量 Q_{pump} (mm/day)

2. 各制御規則の評価指標

以上の各制御規則に対してシミュレートした結果に対する評価は年間の総灌漑水量 $\sum Q_{\text{pump}}$ で行った。この総灌漑水量 $\sum Q_{\text{pump}}$ は電気代の大きさに関連しているのでランニングコストに注目した評価指標とも言える。

最適条件: $\sum Q_{\text{pump}} \rightarrow$ (極小)

(ただし, (1), (9)式が満足されていること)……………(11)

$\sum Q_{\text{pump}}$: 1年間当たりの総灌漑水量 (mm/year)。

仮に、基本的に沼沢地の環境は自然状態が好ましいと考えて灌漑などの人為的関与をできるだけ小さくしたいと考える場合にも、同じ評価指標を適用できる。また、水質などに問題があって灌漑水量を制限したいと考える場合にも同じ評価指標を適用できる。すなわち, (11)式は多くの理由によって一般的な評価指標のひとつである。

Ⅶ. シミュレーション結果

シミュレーションは1990年8月1日から1991年7月31日までの365日について行った。ただしここでは、シミュレーション結果の比較が目的であるので、実際に生じたポンプの故障などは考慮していない。

パラメータとなる一定値 \bar{Q} , しきい値 R_c , 目標値 API^* , 最小値 Q_{min} については、現況を参考にしていっつか設定した。

一定値 \bar{Q} と最小値 Q_{min} については現況の半分である 2.4 mm/day 以上を考えた。この半分ということにはさ

Table 2 シミュレーション結果 (1990. 8. 1~1991. 7. 31)

(a) 現況に準拠した場合 (rule A)

\bar{Q} mm/day	$\sum Q_{\text{pump}}$ mm/year	API の最小値 mm
2.4	876	14.5 (1/17'91)
*4.8	1752	27.6 (1/17'91)
7.2	2628	40.8 (1/17'91)
9.6	3504	53.9 (1/17'91)

*: 1992年現在でのポンプの制御規則

(): API の最小値の発生日

(b) 当日の日雨量で制御する場合 (rule B)

R_c mm/day	5.0		10.0		15.0	
\bar{Q} mm/day	$\sum Q_{\text{pump}}$ mm/year	API の最小値 mm	$\sum Q_{\text{pump}}$ mm/year	API の最小値 mm	$\sum Q_{\text{pump}}$ mm/year	API の最小値 mm
2.4	684	14.3 (1/17'91)	732	14.3 (1/17'91)	782	14.5 (1/17'91)
4.8	1368	27.3 (1/17'91)	1464	27.3 (1/17'91)	1565	27.6 (1/17'91)
7.2	2052	40.3 (1/17'91)	2196	40.3 (1/17'91)	2347	40.8 (1/17'91)
9.6	2736	50.9 (9/14'90)	2928	53.2 (1/17'91)	3130	53.9 (1/17'91)

(): API の最小値の発生日

(b') 前日の日雨量で制御する場合 (rule B')

R_c mm/day	5.0		10.0		15.0	
\bar{Q} mm/day	$\sum Q_{\text{pump}}$ mm/year	API の最小値 mm	$\sum Q_{\text{pump}}$ mm/year	API の最小値 mm	$\sum Q_{\text{pump}}$ mm/year	API の最小値 mm
2.4	686	14.3 (1/17'91)	734	14.3 (1/17'91)	782	14.5 (1/17'91)
4.8	1373	27.2 (1/17'91)	1469	27.2 (1/17'91)	1565	27.6 (1/17'91)
7.2	2059	39.9 (9/13'90)	2203	40.2 (1/17'91)	2347	40.8 (1/17'91)
9.6	2746	49.9 (9/05'90)	2938	53.1 (1/17'91)	3130	53.9 (1/17'91)

(): API の最小値の発生日

(c) API で制御する場合 (rule C)

API* mm	40.0		50.0		60.0	
\bar{Q} mm/day	$\sum Q_{\text{pump}}$ mm/year	API の最小値 mm	$\sum Q_{\text{pump}}$ mm/year	API の最小値 mm	$\sum Q_{\text{pump}}$ mm/year	API の最小値 mm
2.4	1388	36.4 (12/23'90)	1867	45.0 (12/23'90)	2390	55.0 (12/23'90)
4.8	1576	36.4 (12/23'90)	1992	45.0 (12/23'90)	2476	55.0 (12/23'90)
7.2	1948	39.8 (1/18'91)	2198	45.0 (12/23'90)	2610	55.0 (12/23'90)
9.6	2660	52.6 (9/08'90)	2660	53.6 (12/23'90)	2832	55.0 (12/23'90)

(): API の最小値の発生日

Table 3 パラメータの最適値 (1990.8.1~1991.7.31)
(a) API_h を 40 mm とした場合

rule	最適なパラメータ				評価指標	
	\bar{Q} mm/day	R_c mm/day	API* mm	Q_{min} mm/day	$\sum Q_{pump}$ mm/year	API の最小値 mm
A	7.2	—	—	[7.2]	2628	40.8 (1/17'91)
B	7.2	5.0	—	[5.0]	2052	40.3 (1/17'91)
B'	7.2	10.0	—	—	2203	40.2 (1/17'91)
C	—	—	40.0	7.2	1948	※39.8 (1/18'91)

A: 現況に準拠した場合, B: 当日の日雨量で制御した場合, B': 前日の日雨量で制御した場合, C: API で制御した場合, ※: 近次的に(9)式を満足していると判断した。
(): API の最小値の発生日

(b) API_h を 50 mm とした場合

rule	最適なパラメータ				評価指標	
	\bar{Q} mm/day	R_c mm/day	API* mm	Q_{min} mm/day	$\sum Q_{pump}$ mm/year	API の最小値 mm
A	9.6	—	—	[9.6]	3504	53.9 (1/17'91)
B	9.6	5.0	—	[5.0]	2736	50.9 (9/14'90)
B'	9.6	10.0	—	—	2938	53.1 (1/17'91)
C	—	—	40.0	9.6	2660	52.6 (9/8'90)
C	—	—	50.0	9.6	2660	53.6 (12/23'90)

A: 現況に準拠した場合, B: 当日の日雨量で制御した場合, B': 前日の日雨量で制御した場合, C: API で制御した場合,
[]: (10-A)', (10-B)'式による結果, (): API の最小値の発生日

ほど根拠はないが結果的に得られるパラメータの最適値が 4.8 mm/day よりも大きければ支障ない。そこで、一定量 \bar{Q} と最小値 Q_{min} には 2.4, 4.8, 7.2, 9.6 mm/day を検討した。

R_c については有効降雨を 5 mm/day 前後と考えることが多いので、5, 10, 15 mm/day を検討した。目標値 API* については(8)式に注目して 40, 50, 60 mm を検討した。

Table 1(a) に示した現況に準拠した場合の結果によれば、1992年現在の制御規則で API の最小値は 27.6 mm である。この結果は Fig. 3(a) と Fig. 4(a) に図示されている API の最小値とは異なる。これは、Fig. 4 の実測値が障害によるポンプの停止を考慮しているのに対して、Tables 2, 3 を示すためのシミュレーションではこのことを考慮していないことによる。

Tables 2(a)~(c) 中、それぞれの制御規則について最

小の総灌漑水量 $\sum Q_{pump}$ であるものを選定した結果を Table 3 に示す。ただし、Table 3(a) は(9)式中の API_h を 40 mm とし、Table 3(b) は 50 mm とした結果である。各表中、前日の日雨量で制御する case B' 以外の結果では、 Q_{min} が現在の 4.8 mm/day よりも大きく、(1)式を満足していると言える。

現在の制御規則に対する $\sum Q_{pump}$ は Table 2(a) から 1752 mm であり API の最小値は 27.6 mm である。仮に条件となる API_h に 40 mm に設定すれば、現況に準拠した制御規則で総灌漑水量 $\sum Q_{pump}$ に 2628 mm/year が必要になることが Table 3(a) に示されている。すなわち、現在よりも約 900 mm/year の灌漑水の増加が必要である。

条件となる API_h を 40 mm とした場合、Table 3(a) から以下のことを確認できる。

・当日の日雨量と前日の日雨量で制御した結果には大差ない (Table 3(a), rule B, B' の欄参照)。ただし、7.2 mm/day の \bar{Q} と異なり最適の場合の R_c の設定値として 5.0 mm/day と 10.0 mm/day の 2 通りが選定された。

・API で制御する場合の総灌漑水量 $\sum Q_{\text{pump}}$ は、日雨量で制御する場合の結果と同程度であり、約 2000 mm であった。すなわち、現在よりも約 300 mm/year 程度の灌漑水の増加で不足を補える (Table 3(a), rule B, C の欄参照)。

・API で制御する場合の結果として、API の最小値が目標値 API* よりも小さい場合が生じた (Table 3(a) ※印参照)。これは n をさらに大きく設定することによって対処すべきと考える。

条件を 50 mm とした場合も、API_h が 40 mm の結果と同様の傾向であった。

Ⅷ. ま と め

以上のように乾燥してゆく沼沢地への揚水灌漑の効果が議論された。この目的のために、まず API と沼沢地の水位との統計的な関係が確認された。本論中、降雨のみの関数である本来の API の拡張が(7)式のように提示された。

沼沢地の陸域における土壌の水分張力の測定結果に基づいて、灌漑水の定常成分は土壌の水分張力をほぼ 0 cm H₂O に低減するために重要であることが明らかとなった。したがって、この定常成分は潤滑化のために十分考慮されなくてはならない。この概念は(1)式に示された。一方、他の種類から沼沢地の植物を守るために水位を高く設定する灌漑水の成分がある。この概念は(9)式に示された。

(1), (9)式で示される 2 つの成分に関する概念は乾燥する沼沢地のために重要である。(1)式の左辺は(9)式中の API の項のうちのひとつに含まれている ((7)式参照)。したがって、(7)式で定義されている API は乾燥する沼沢地の水環境を評価する際に有効に適用される。

応用例として示したシミュレーションの結果としては、1992年現在のポンプの使用状況で総揚水量は約 1700 mm/year であるが、仮に API が 40 mm 以上必要であれば、更に 900 mm/year 程度必要であることを示した。

また、制御規則に工夫を行えば、この 900 mm/year ではなく 300 mm/year 程度の増加で支障ないことを示した。

Ⅸ. お わ り に

本論では、沼沢地に固有な水環境を考え、灌漑システムの制御手法に関する一連のとりまとめを行った。専門的に見れば、多くの分野が関連しており、まとめる際には多くの試行錯誤がともなった。各専門の方々のご鞭撻をたまわりたい。

観測に際しては、四日市市教育委員会の方々、および専攻生の澤田臣弘君、高森寿士君、瀧嶋正人君らに協力を得た。記して謝意を表する。

要 約

次第に乾燥してゆく沼沢地の植物を保護するために、ポンプを用いた灌漑の効果が議論された。沼沢地の地形特性は複雑すぎるために水収支を評価できないので、灌漑の効果は先行降雨指数 (API) と沼沢地内の水位との統計的関係を用いて検討された。この目的のために、沼沢地内の降雨、水位、および不飽和土壌の水分張力が測定された。本来、API は日降雨量のみの関数なのであるが、日々の降雨量と揚水比流量の関数に拡張して適用した。

観測された沼沢地内で、高い API の期間では水位は十分に高かった。API が乾期において小さくなると水位は急激に低下した。結果として、API のこの臨界点は、沼沢地の植物が生き残るための下限値であることが明らかとなった。

沼沢地内の不飽和土壌の水分張力の日々の測定から、灌漑水の一定量が土壌の水分張力をゼロ近くに減少させるために重要であることが明らかとなった。水分張力ゼロというは状況、沼沢地の植物が保護されるために好ましい湿り具合に思える。

水位と土壌水分張力のこれらふたつの条件は双方ともに沼沢地の植物が生き残るために重要である。このことは、沼沢地の水環境を制御するために降雨と揚水量の日々の API を評価することが非常に実際的な手法であることを意味している。

全自動の揚水灌漑システムのいくつかの制御規則を比較するために、API と年間総揚水量を用いて数値シミュレーションを行った。結果的に、規則の評価のためだけでなく制御規則のパラメータとして API を用いることが有効であることが計算例で示された。

引用文献

- 1) 地区概況などについては、四日市市教育委員会：御池沼沢植物群落環境整備事業報告書（1983）
- 2) 津地方気象台：創立百年誌（1989）
- 3) たとえば、田中丸治哉：流域土湿指標に関する一考察，農土学会京都支部研究発表会講演要旨，pp. 63～64（1985）
- 4) 加治佐隆光：先行降雨指数による溪流取水の評価事例，三重大学生物資源学部紀要 No. 7，pp. 59-62（1992）
- 5) 加治佐隆光：先行降雨指数と畑地内サクシヨンの関係，三重大学生物資源学部紀要 No. 8，pp. 35-41（1992）