

8. 計画日消費水量等の決定

(基準 3.3.4.3 関連)

計画日消費水量の決定手法には、土壌水分減少法、ライシメータ法、チェンバー法等の実測法とペンマン法等の気象データからの推定法がある。

ここでは、計画日消費水量の決定方法として、土壌水分減少法を用いた実測法と、ペンマン法により計算する蒸発位を用いた推定法を紹介する。

8.1 土壌水分減少法を用いた決定手法

土壌水分減少法は 24 時間容水量からの土壌水分の減少量を測定する方法であり、有効土層内の消費水量を求めるための適切な方法の一つと考えられる。なお、これらの実測はかんがい期間を通じて実施することが望ましいが、多大の労力と時間を要することになるので消費水量が最大となる期間に重点的に行い、その他の期間については信頼できる近傍の実測資料や推定法を用いてもよいものとする。

また、消費水量は、測定期間中の気象条件に左右されるので、測定中は降雨量や蒸発散に関連する気象因子（蒸発計蒸発量、日射量、日照時間、温度（最高・最低・平均）、湿度、風速等）を併せて観測することが望ましい。

土壌水分減少法を用いた計画日消費水量等の決定手順は、**図-8.1** のとおりである。

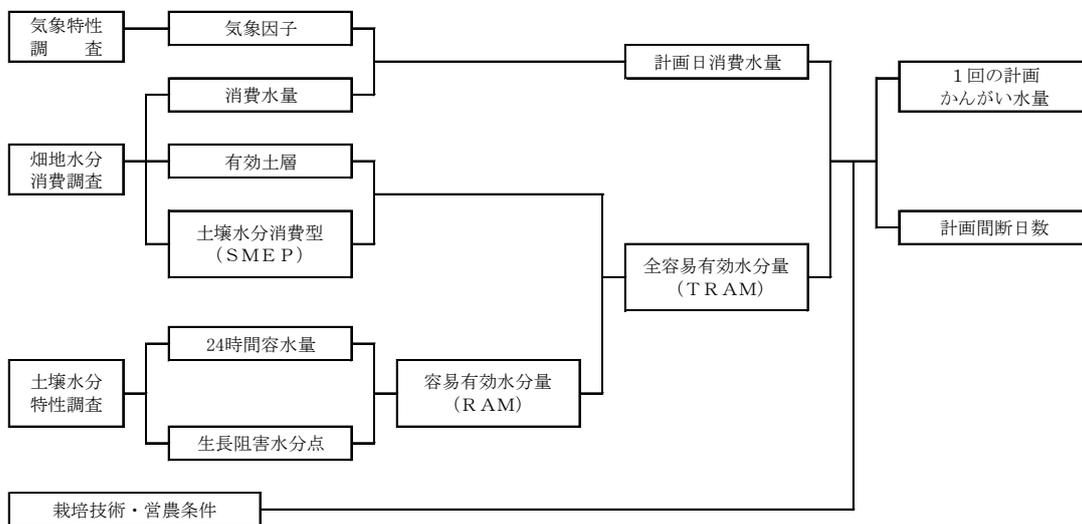


図-8.1 土壌水分減少法を用いて計画日消費水量等を決定する手順

(1) 土壌水分の測定

十分な降雨又はかん水の後、24 時間経過してから測定を開始する。かん水する場合はほ場全域で均等に行う。土壌水分は、1 日の間で変動するため測定時刻は一定とし、比較的気象条件が安定している時間帯（例えば午前 5 時から 9 時の間）に測定することが望ましい。測定の位置は吸水根が平均的に分布している場所を選ぶものとし、次のような位置とする。

ア. うね立てをしている場合（**図-8.2 (a)**）

株の両側約 10 cm の位置

イ. うね立てをしていない場合

- ① 条播：作物の株間中央部よりやや株寄り（麦類の場合は、株の両側約 10cm の位置）
- ② 散播：株より約 10 cm のところ（麦類の場合は、株から任意の位置）

ウ. 果樹（図-8.2 (b)）

樹冠の外縁部よりやや幹寄りの位置とし、平面的にみた実測の位置は東西、南北など条件の異なる場所で 2 か所以上を選ぶ。

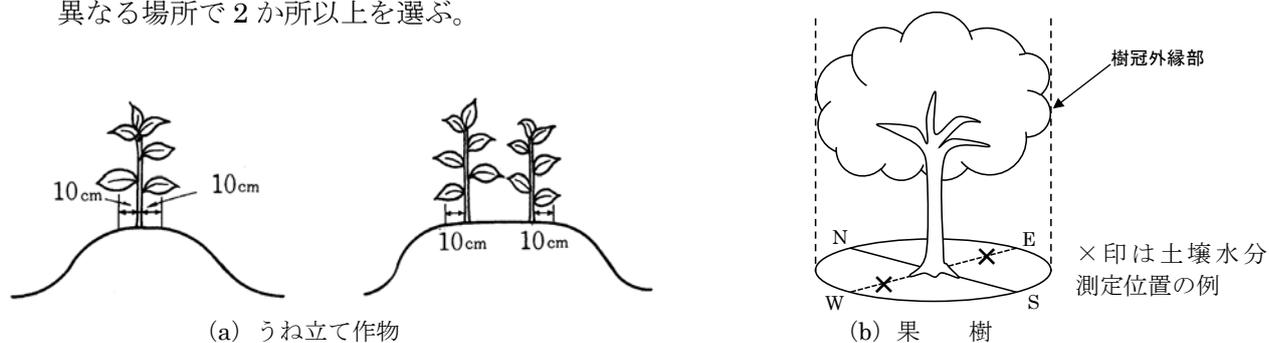


図-8.2 土壌水分測定位置

土壌水分の測定深は原則として畑面より 5、15、25、35、50、70 cm の位置とする。図-8.3 に示す①～⑥の位置の土壌水分はそれぞれ土層 $D_1 \sim D_6$ の部分の平均値を示す。なお、土層断面の観察等により有効土層が浅いと考えられる場合には深部の測定は省略してもよい。

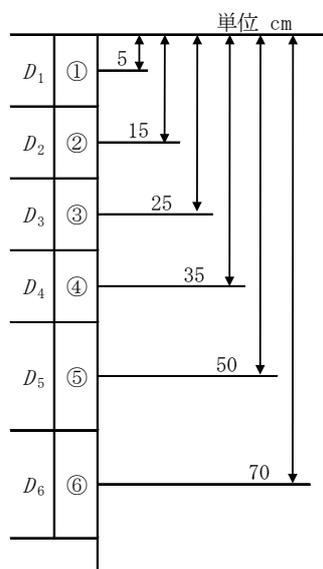


図-8.3 土壌水分測定深

(2) 計画日消費水量の算出

日消費水量（1 日当たりの消費水量）は、日々の気象因子により変動するので計画値の決定に際しては次のような検討を加え調整する必要がある。

- ① 計画に用いる日消費水量を極めて短期間の実測値だけで決定することには問題があるので、実測及び推定法によりある栽培管理上のステージで同一とみなしうる期間の日消費水量の平均値として求める。

計画上の日消費水量をある期間の平均値として考えるならば、その間の曇天や小雨（計画上、無効降雨となるような雨）の日は日消費水量が確実に減少しているため、このような値も結果的に考慮されることとなって実情に近い値を決定することができる。

- ② 土壌水分減少法により日消費水量の実測値が得られても、①において求めた値をそのまま計画値として採用できるとは限らない。一般には実測が行われた期間の気象因子と計画基準年のそれとを比較し、修正を施す。

上記①及び②の検討に当たっては蒸発計蒸発量を用いるのがよい。蒸発計蒸発量は、蒸発位に関与する多くの気象的要因を総合的に表現するもので、実測値が得られるならば測定値の修正は簡単に行うことができる。もし蒸発計蒸発量の累年の測定値が得られなければ、あらかじめ日射量、日照時間、温度、湿度、風速等との相関関係を統計的に解析しておく必要がある。

これらの検討の結果、最終的に計画値として決定された日消費水量を計画日消費水量といい、期別の最も大きな値を計画最大日消費水量という。

日消費水量 Σe_n は、有効土層（深さ ΣD_n ）の毎日の土壌水分の実測結果から次の式（8.1）により求める。

$$\Sigma e_n = e_1 + e_2 + \dots + e_n \quad \dots \dots \dots (8.1)$$

$$e_1 = \frac{1}{10} \cdot (M_1 - M'_1) \cdot D_1 \quad , \quad e_2 = \frac{1}{10} \cdot (M_2 - M'_2) \cdot D_2 \quad , \quad \dots \dots \dots ,$$

$$e_n = \frac{1}{10} \cdot (M_n - M'_n) \cdot D_n$$

ここで、

- D_1 、 D_2 、 $\dots \dots \dots D_n$ ：図-8.3に示した各層の厚み（cm）
 M_1 、 M_2 、 $\dots \dots \dots M_n$ ：各層のその日の土壌水分測定値（体積%）
 M'_1 、 M'_2 、 $\dots \dots \dots M'_n$ ：各層の翌日の土壌水分測定値（体積%）
 e_1 、 e_2 、 $\dots \dots \dots e_n$ ：各層の土壌水分消費量（mm）

ただし、降雨日及び降雨停止後24時間以内の実測値は除外する。また、1日で土壌水分差が明確でない場合は2～3日単位で計算する。旬別日消費水量は原則としてその旬に実測された平均日消費水量とする。

8.2 ペンマン法を用いた決定手法

ペンマン法とは、熱収支法と空気力学的方法を組合せたもので、気象観測所の気象データからペンマン式により蒸発位を計算できる。この蒸発位に主として作物の種類と生育ステージによって決まる作物係数を乗じて蒸発散量を推定できる。なお、本章では蒸発位の基準表面を自由水面として算定することとしている。

ペンマン法により計算された蒸発位に作物係数を乗じて推定した蒸発散量から有効土層への下層からの上向き補給水量を差し引くことで計画日消費水量が算定できる。

ペンマン法を用いた決定手法では、全国一律の基準で観測されている気象観測所の気象データから蒸発位を計算して蒸発散量を推定し、これを用いて計画日消費水量が算定できるため、現場での

土壌水分減少法による消費水量の測定を省略できるという特徴がある。

ペンマン法を用いた決定手法の手順は、**図-8.4**に示すとおりである。

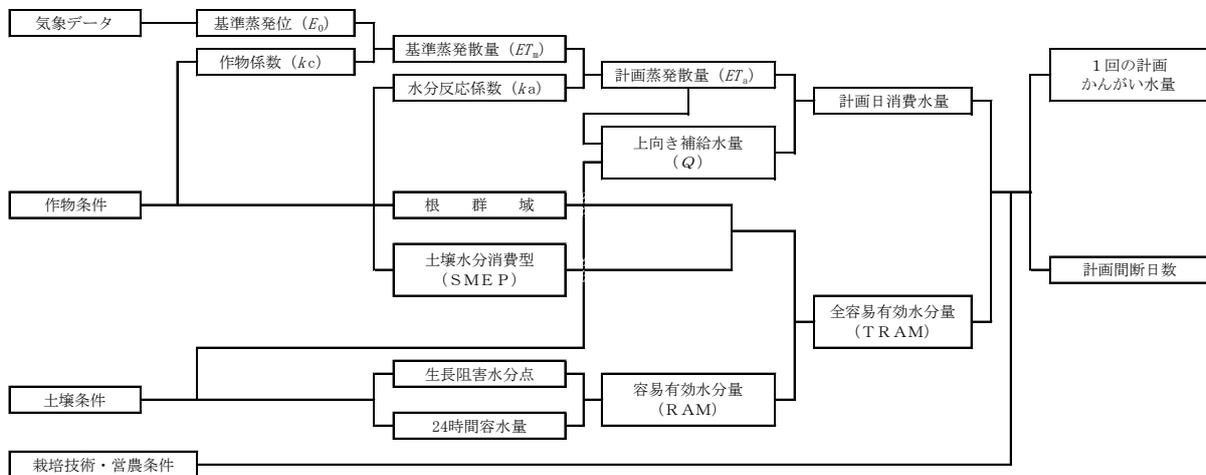


図-8.4 蒸発散量を推定して計画日消費水量等を決定する手順

ここでは、露地畑、樹園地及び牧草地において栽培される作物の水分補給用水量を、ペンマン法を用いて決定する場合について紹介する。なお、施設畑については技術書「11. 施設畑（ハウス）の計画日消費水量等」を参照されたい。

(1) 基準蒸発位 (E_0)

基準蒸発位 (E_0) は、用水計画のための蒸発ポテンシャルを水深 (mm/day) で表したものであり、気象データを用いてペンマン式により算定される水面蒸発量 (蒸発位 (E_p)) を基に定める。

ア. 気象観測所の選定

ペンマン法の適用に必要な気象データは、**表-8.1**に示すとおり日平均気温、1日当たりの日照時間、日平均風速、日平均相対湿度である。算出される蒸発位は、気温が高く、風速が強く、日照時間が長く、湿度が低いほど大きくなる。

これらの気象観測値は、気象観測所の立地環境や属する気候区によって大きく異なる。このため、事業計画地区の近傍の気象官署（地方气象台、測候所等）あるいは地域気象観測所（以下「アメダス4要素観測所」という。なお、「4要素」とは降水量、気温、風速、日照時間である。）における気象観測値の整備状況を調査し、気象データを収集、解析して、事業計画地区の気象条件を代表し蒸発位の計算に必要な気象データが十分に整備蓄積されている気象観測所を選定することが重要である。

気象官署は事業計画地区の近傍に位置することが少なく、事業計画地区とは立地条件、気象条件が異なる場合もあることから、アメダス4要素観測所の気象データを活用した方が、事業計画地区の気象特性をより正確に反映できる場合もある。アメダス4要素観測所では、湿度のデータを測定していないが、湿度は蒸発位の計算値に及ぼす影響が小さいことから、近傍の気象官署のデータ又は地区内を代表する実測値を代用してもよい。また、観測地点の中間に地区が位置する場合等では複数地点でのデータの比較検討を行うものとする。

気象データについては可能な限り長期間のデータを用いるものとし、気象官署については30年間以上、アメダス4要素観測所では観測開始以降全期間（約30年間）とし、また、観測所の移転によるデータの不連続や欠測値がある場合は、近傍のデータから推測する等の対策を講じる。

蒸発位を計算する際、気象官署のデータを用いる場合とアメダス4要素観測所のデータを用いる場合の特徴を整理すると表-8.2のとおりとなる。

表-8.1 ペンマン式の計算に必要な気象データ

気象データ	注 意 事 項
日平均気温 (°C)	
1日当たりの日照時間 (h)	日照計の機種が、観測所と測定年月日により異なっており、機種の違いによる測定値の差を修正する必要がある。
日平均風速 (m/s)	風速の測定地上高度も把握する必要がある。
日平均相対湿度 (%)	気象官署のみで測定されている。

表-8.2 気象観測所のデータの特徴

	気象官署（地方気象台、測候所等）	アメダス4要素観測所
長所	ペンマン式に必要な気温、湿度、風速、日照時間の全てが測定され、長期間のデータ蓄積がある。	観測地点が多い（全国約840か所 21km四方に1か所）。かんがい計画地域と比較的よく似た環境下にあることが多い。
短所	観測地点が少なく、その分布も都市部、海岸部に集まっている（全国約160か所）。	湿度のデータが測定されていない。データの蓄積が少ない（全国的整備は1981年に完了）。

イ. ペンマン式の概要と蒸発位 (E_p) の計算

ペンマン式にはいくつかの種類があるが、ここではペンマンが1948年に最初に発表した次の式(8.2)を用いるものとする。計算に必要な気象データは、気温、日照時間、相対湿度、風速の4要素で、その日平均値、日総量を用いる。

$$E_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{S}{l} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot f(u_2) \cdot (e_{sa} - e_a) \dots \dots \dots (8.2)$$

ここで、

- E_p : ペンマンの蒸発位 (mm/day)
- S : 純放射量 (日照時間、気温、湿度から計算) (MJ/m²/day)
- Δ : 温度飽和蒸気圧曲線の勾配 (気温から) (hPa/°C)
- l : 水の蒸発潜熱 (気温から) (MJ/kg)
- γ : 乾湿計定数 (定数: 0.66) (hPa/°C)
- f(u₂) : 風速関数 (高度2mでの風速u₂(m/s)から)
- e_{sa} : 気温での飽和蒸気圧 (気温から) (hPa)
- e_a : 空気の蒸気圧 (湿度と湿度観測地点の気温から) (hPa)

ペンマン式の計算途中で純放射量を推定するが、その際、蒸発位を求めたい蒸発面のアルベド(日射の反射率)を入力する必要がある。ここではアルベドに水面での値0.06を用いること

とする。水面では蒸散はないので、このときの蒸発位を特に蒸発位 E_p と呼ぶ。なお、この蒸発位は日本で一般に使用されてきた小型蒸発計蒸発量とよく一致する。

次に、ペンマン式の計算手順を図-8.5に、ペンマン式の計算プログラムの一例を表-8.3に、また、そのプログラム用のデータと計算結果を表-8.4、表-8.5に、表計算により求める場合の様式例を表-8.6に示す。

気象関係のデータ以外に、日射量を計算するため計算時点の経度と計算月日の赤緯が必要である。赤緯は理科年表等に記載されているが、日付（1月1日からの通算日数（以下「通日」という。))からも計算できるのでその方法を採用した。

また、地球太陽間の距離を考慮している。地球公転軌道は楕円で、楕円の焦点の一つに太陽がある。そのため季節により太陽との距離が若干異なり、1月上旬に最も接近し、7月上旬に最も離れる。地球太陽間の距離も通日から計算でき、プログラムでは1行追加するだけなのでここでは考慮している。

ペンマン式の計算に必要な気象データは、日照時間、気温、風速、相対湿度の4要素である。

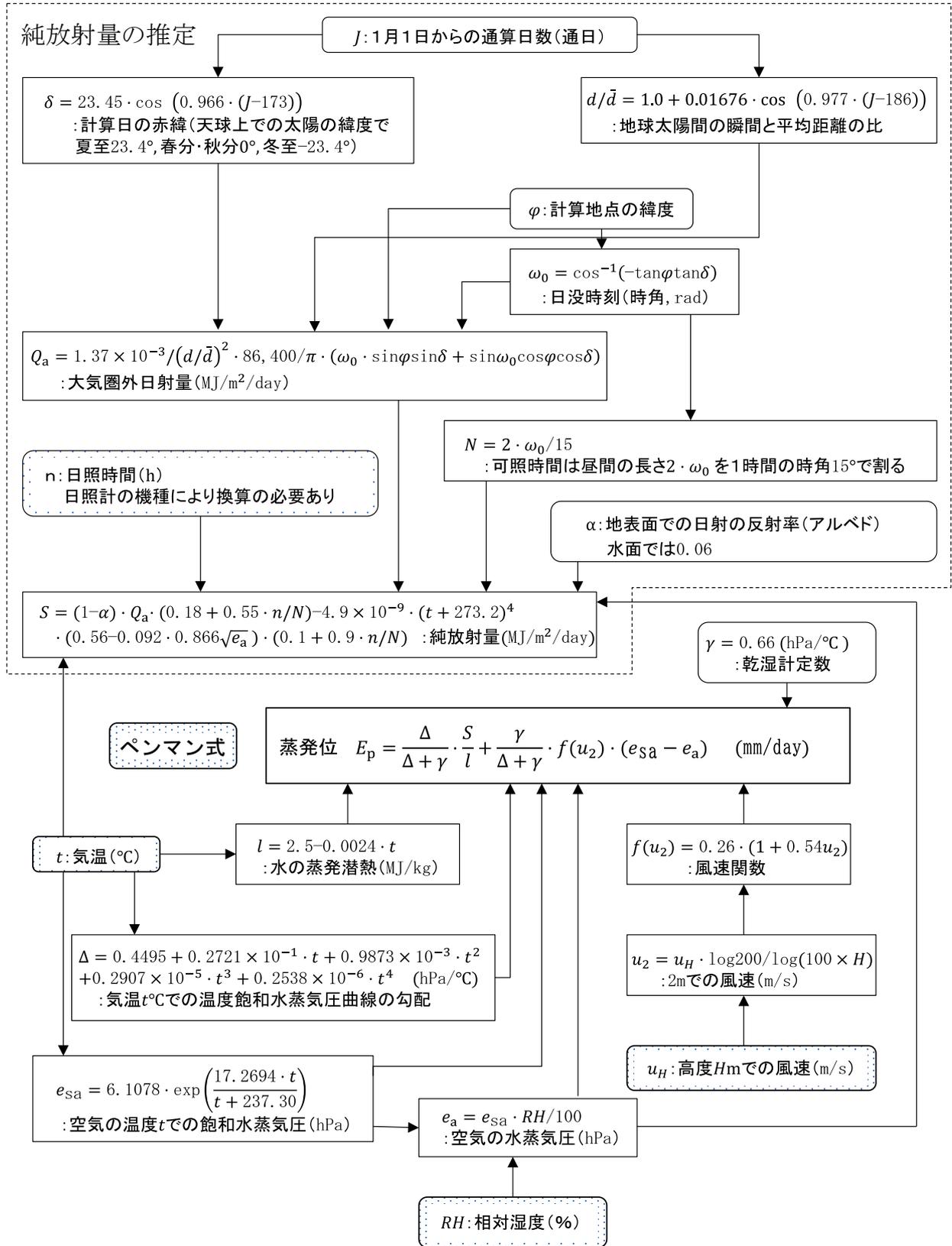


図-8.5 ペンマン式の計算手順

表-8.3 ペンマン式計算プログラム例

```

100 '*****
110 '*      ペンマン式による蒸発散位計算プログラム ( BY T.MIURA )      *
120 '*      日データで計算し結果をファイルに月報として保存          *
125 '*      ①~⑭は本文中の同数字の計算処理に対応 ( MS-DOS N88BASIC ) *
130 '*****
140 'save "PENMAN-F.BAS", A
150 DIM SEKII(365),SEKIIR(365),T(31),RH(31),WIND(31),N(31),RAIN(31),W(31),
WDO(31),NN(31),QA(31),ESA(31),EA(31),S(31),DELTA(31),L(31),U2(31),FU2(31),
P1(31),P2(31),RTP(31),MDAYS(12),KYORI(365)
160 FOR I=0 TO 11 :READ MDAYS(I) :NEXT I  :' 各月の日数を600行より読む
170 OPEN "OKA85-7.DAT" AS #1           :' 入力ファイルオープン
180 OPEN "OKA85-7.ANS" AS #2           :' 出力ファイルオープン
190 INPUT #1,TITEN$                    :' 地点名
200 INPUT #1, IDODEG,HWIND,ALBEDO      :' 緯度(DEG), 風速測定高度(m), アルベド
210 INPUT #1, YEAR,MONTH,DAYS         :' 年, 月, 日数
220 IDO=IDODEG*3.1416/180             :' 緯度(RAD)
230 FOR I=1 TO DAYS                   :' 470行(NEXT I)の間を日数(31日)分回す
240 INPUT #1,HIZUKE,T(I),RH(I),WIND(I),N(I),RAIN(I) :' データ入力
250 TUSAN=MDAYS(MONTH-1)+HIZUKE       :' 1月1日からの通算日数 ①
260 KYORI(I)=.01676*COS((TUSAN-186)*.977*3.1416/180)+1  :' 太陽との距離②
270 SEKII(I)=23.45*COS((TUSAN-173)*.966*3.1416/180)    :' 赤緯(DEG) ③
280 SEKIIR(I)=SEKII(I)*3.1416/180      :' 赤緯(RAD)
290 JJ=-TAN(IDO)*TAN(SEKIIR(I))        :' BASICではCOS-1なし,TAN-1より変換
300 W(I)=-ATN(JJ/SQR(-JJ*JJ+1))+1.5708  :' 日没の時角(RAD) ④
310 WDO(I)=W(I)*180/3.1416            :' 日没の時角(DEG)
320 NN(I)=2*WDO(I)/15                 :' 日照時間(h) ⑤
330 QA(I)=.00137/KYORI(I)^2*86400!/3.1416*(W(I)*SIN(IDO)*SIN(SEKIIR(I))+
SIN(W(I))*COS(IDO)*COS(SEKIIR(I)))    :' 大気圏外日射量(MJ/m2/d) ⑥
340 ESA(I)=6.1078*EXP((17.2694*T(I))/(T(I)+237.3)):' 飽和水蒸気圧(mbar)⑦
350 EA(I)=ESA(I)*RH(I)/100            :' 実際の水蒸気圧(mbar)
360 S(I)=(1-ALBEDO)*QA(I)*(.18+.55*N(I)/NN(I))-4.9E-09*(T(I)+273.2)^4*(.
56-.092*.866*SQR(EA(I)))*(.1+.9*N(I)/NN(I)):' 純放射量の推定(MJ/m2/d) ⑧
370 DELTA(I)=.4495+.02721*T(I)+.0009873*T(I)^2+2.907E-06*T(I)^3+2.538E-0
7*T(I)^4                               :' 飽和水蒸気圧曲線の勾配 ⑩
380 L(I)=2.5-.0024*T(I)                :' 水の蒸発潜熱(MJ/kg) ⑪
390 U2(I)=LOG(200)/LOG(100*HWIND)*WIND(I) :' 2mでの風速(m/s) ⑫
400 FU2(I)=.26*(1+.54*U2(I))           :' 風速関数 ⑬
410 P1(I)=DELTA(I)/(DELTA(I)+.66)*S(I)/L(I)  :' 第1項(放射項)
420 P2(I)=.66/(DELTA(I)+.66)*FU2(I)*(ESA(I)-EA(I)):' 第2項(空力項)
430 ETP(I)=P1(I)+P2(I)                 :' ペンマンの蒸発散位(mm/d)⑭
440 ST=ST+T(I) :SRH=SRH+RH(I) :SW=SW+WIND(I) :SN=SN+N(I)  :' 440-460 積算
450 SRAIN=SRAIN+RAIN(I) :SQA=SQA+QA(I) :SS=SS+S(I) :SSEKI=SSEKI+SEKII(I)
460 SP1=SP1+P1(I) :SP2=SP2+P2(I) :SETP=SETP+ETP(I)
470 NEXT I
480 Z=DAYS :HT=ST/Z :HRH=SRH/Z :HW=SW/Z :HN=SN/Z :HP2=SP2/Z
490 HRAIN=SRAIN/Z :HQA=SQA/Z :HS=SS/Z :HP1=SP1/Z :HETP=SETP/Z :HSEKI=SSE
KI/Z                                     :' 480-490 平均
500 '***** 計算結果の出力 *****
510 'ファイル:PRINT #2,(OPEN文に対応),ディスプレイ:PRINT,プリンタ:LPRINT
520 PRINT #2,USING "& &####年##月の蒸発散位 緯度=##.## 風速
計=##.##m ALBEDO=##.##";TITEN$,YEAR,MONTH, IDODEG,HWIND,ALBEDO
530 PRINT #2,"月日 赤緯 気温 湿度 風速 日照 降水 外日射 純放射
第1項 第2項 PENMAN"
540 FOR I=1 TO DAYS
550 PRINT #2,USING "## ## ##.## ##.## ##.## ##.## ##.## ##.##
##.## ##.## ##.##";MONTH,I,SEKII(I),T(I),RH(I),WIND(I),N(I),RAIN(I),
QA(I),S(I),P1(I),P2(I),ETP(I)
560 NEXT I
570 PRINT #2,USING "合計 ##.## ##.##
##.## ##.## ##.##";SN,SRAIN,SP1,SP2,SETP
580 PRINT #2,USING "平均 ##.## ##.## ##.## ##.## ##.## ##.## ##.##
##.## ##.## ##.## ##.##";HSEKI,HT,HRH,HW,HN,HRAIN,HQA,HS,HP1,HP2,HETP
590 CLOSE #1,#2 :END                    :' 入出力ファイルのクローズ
600 DATA 0,31,59,90,120,151,181,212,243,273,304,334  :' 各月の日数データ

```

表-8.4 ペンマン式計算データの事例

“岡山” ¹⁾ 1985 ⁵⁾	34.66 ²⁾ 7 ⁶⁾	43 ³⁾ 31 ⁷⁾	0.06 ⁴⁾			
1 ⁸⁾	25.4 ⁹⁾	62 ¹⁰⁾	3.5 ¹¹⁾	11.0 ¹²⁾	0.0 ¹³⁾	
2	22.5	87	1.8	0.0	3.0	
3	23.0	94	1.5	0.0	22.5	
4	24.6	92	1.9	0.1	5.5	
5	26.4	82	1.2	5.2	0.5	
6	23.2	89	1.5	1.0	53.0	
7	26.8	77	2.6	4.9	0.0	
8	28.2	69	4.3	10.1	0.0	
9	28.2	70	3.5	7.6	0.0	
10	28.5	73	2.9	4.5	0.0	
11	27.6	76	4.4	3.0	2.0	
12	26.2	91	1.9	1.8	26.0	
13	29.0	73	3.3	5.9	0.0	
14	27.4	69	2.6	6.5	0.0	
15	25.8	63	1.6	11.9	0.0	
16	26.3	65	1.8	10.6	0.0	
17	27.2	70	1.9	8.2	0.0	
18	27.0	74	1.4	5.8	0.0	
19	27.1	77	1.6	5.7	0.5	
20	28.3	75	1.6	8.4	0.0	
21	26.7	77	1.8	5.1	1.0	
22	27.2	74	1.4	6.6	0.0	
23	28.3	72	1.6	7.7	0.0	
24	29.1	67	1.6	11.4	0.0	
25	29.2	69	1.6	10.7	0.0	
26	29.5	63	1.6	11.5	0.0	
27	30.1	61	2.1	13.0	0.0	
28	30.0	61	1.9	12.6	0.0	
29	30.9	60	1.7	12.7	0.0	
30	31.0	63	1.8	10.9	0.0	
31	29.6	69	1.6	7.6	0.0	

1) 地点名 2) 緯度(°) 3) 風速計地上高度(m) 4) アルベド 5) 年 6) 月 7) その月の日数
8) 日付 9) 気温(°C) 10) 湿度(%) 11) 風速(m/s) 12) 日照時間(h) 13) 降雨量(mm)

表-8.5 ペンマン式計算結果例

岡山		1985年7月の蒸発散位				緯度=34.66		風速計=43.0m		ALBEDO=0.06		
月	日	赤緯	気温	湿度	風速	日照	降水	外日射	純放射	第1項	第2項	PENMAN
7	1	23.18	25.4	62.0	3.5	11.0	0.0	41.6	17.3	5.29	1.79	7.09
7	2	23.12	22.5	87.0	1.8	0.0	3.0	41.6	6.4	1.87	0.42	2.29
7	3	23.05	23.0	94.0	1.5	0.0	22.5	41.5	6.5	1.90	0.19	2.09
7	4	22.97	24.6	92.0	1.9	0.1	5.5	41.5	6.6	2.00	0.28	2.28
7	5	22.89	26.4	82.0	1.2	5.2	0.5	41.5	12.5	3.88	0.56	4.44
7	6	22.80	23.2	89.0	1.5	1.0	53.0	41.4	7.5	2.23	0.34	2.57
7	7	22.70	26.8	77.0	2.6	4.9	0.0	41.4	12.0	3.74	0.96	4.70
7	8	22.60	28.2	69.0	4.3	10.1	0.0	41.3	17.7	5.60	1.74	7.34
7	9	22.49	28.2	70.0	3.5	7.6	0.0	41.3	14.9	4.73	1.50	6.23
7	10	22.38	28.5	73.0	2.9	4.5	0.0	41.3	11.6	3.70	1.23	4.93
7	11	22.26	27.6	76.0	4.4	3.0	2.0	41.2	9.9	3.11	1.35	4.46
7	12	22.13	26.2	91.0	1.9	1.8	26.0	41.1	8.7	2.68	0.32	3.01
7	13	22.00	29.0	73.0	3.3	5.9	0.0	41.1	13.3	4.26	1.33	5.58
7	14	21.86	27.4	69.0	2.6	6.5	0.0	41.0	13.4	4.21	1.31	5.52
7	15	21.71	25.8	63.0	1.6	11.9	0.0	41.0	18.2	5.59	1.24	6.83
7	16	21.56	26.3	65.0	1.8	10.6	0.0	40.9	17.2	5.31	1.24	6.55
7	17	21.40	27.2	70.0	1.9	8.2	0.0	40.8	15.2	4.77	1.10	5.87
7	18	21.23	27.0	74.0	1.4	5.8	0.0	40.8	12.8	3.99	0.85	4.84
7	19	21.06	27.1	77.0	1.6	5.7	0.5	40.7	12.8	4.00	0.79	4.80
7	20	20.89	28.3	75.0	1.6	8.4	0.0	40.6	16.0	5.09	0.88	5.97
7	21	20.70	26.7	77.0	1.8	5.1	1.0	40.6	12.0	3.74	0.82	4.56
7	22	20.51	27.2	74.0	1.4	6.6	0.0	40.5	13.6	4.26	0.86	5.12
7	23	20.32	28.3	72.0	1.6	7.7	0.0	40.4	14.9	4.75	0.99	5.73
7	24	20.12	29.1	67.0	1.6	11.4	0.0	40.3	18.9	6.05	1.18	7.23
7	25	19.91	29.2	69.0	1.6	10.7	0.0	40.2	18.3	5.87	1.11	6.98
7	26	19.70	29.5	63.0	1.6	11.5	0.0	40.2	18.6	6.00	1.33	7.33
7	27	19.48	30.1	61.0	2.1	13.0	0.0	40.1	20.2	6.54	1.58	8.12
7	28	19.26	30.0	61.0	1.9	12.6	0.0	40.0	19.7	6.37	1.51	7.89
7	29	19.03	30.9	60.0	1.7	12.7	0.0	39.9	19.9	6.53	1.51	8.04
7	30	18.80	31.0	63.0	1.8	10.9	0.0	39.8	18.3	6.01	1.43	7.44
7	31	18.56	29.6	69.0	1.6	7.6	0.0	39.7	14.7	4.75	1.12	5.87
合計						222.0	114.0			138.83	32.86	171.69
平均		21.31	27.4	73.0	2.1	7.2	3.7	40.8	14.2	4.48	1.06	5.54
単位		°	°C	%	m/s	h	mm	MJ/m ² /day	MJ/m ² /day	mm/day	mm/day	mm/day

表-8.6 表計算により求める場合の様式例

地点名 ①	緯度 ϕ (DEG) ②	緯度 ϕ (RAD) ③	風速計地上高度 H (m) ④	地表面での日射反射率 (アルベド) α ⑤
作物係数 k_c ⑥	外気温 t_0 ($^{\circ}\text{C}$) ⑦	乾湿計定数 γ (hPa/ $^{\circ}\text{C}$) ⑧	年 ⑨	月 ⑩
日 ⑪	気温 t ($^{\circ}\text{C}$) ⑫	湿度 RH (%) ⑬	風速 UH (m/s) ⑭	日照時間 n (h) ⑮
降雨量 R (mm) ⑯	通日 J ⑰	太陽距離の比 d/d ⑱	計算日の赤緯 δ (DEG) ⑲	計算日の赤緯 δ (RAD) ⑳
日没時刻 ω_0 (時角, RAD) ㉑	日没時刻 ω_0 (時角, DEG) ㉒	可照時間 N (時間) ㉓	大気圏外日射量 Q_a (MJ/m ² /day) ㉔	飽和水蒸気量 e_{sa} (hPa) ㉕
実際の水蒸気量 e_a (hPa) ㉖	純放射の推定 S (MJ/m ² /day) ㉗	飽和水蒸気圧曲線の 勾配 Δ ㉘	水の蒸発潜熱 I (MJ/kg) ㉙	2mでの風速 u_2 (m/s) ㉚
風速係数 $f(u_2)$ ㉛	第1項 (放射項) ㉜	第2項 (空力項) ㉝	蒸発位 E_0 (mm/day) ㉞	

入力事項・計算式等

- ①：気象調査地点名
- ②：緯度 (DEG)
- ③：緯度 (RAD) = ②・ π /180
- ④：風速計設置地上高度 (m)
- ⑤：地表面での日射反射率 (アルベド) = 0.06 (水面での値)
- ⑥：作物係数
- ⑦：外気温 ($^{\circ}\text{C}$)
- ⑧：乾湿計定数 γ (hPa/ $^{\circ}\text{C}$) = 0.66
- ⑨～⑩：気象調査年月日
- ⑪：日
- ⑫：気温 ($^{\circ}\text{C}$) = ⑦ ※露地の場合。施設の場合は、11.施設畑 (ハウス) の計画日消費水量等を参照。
- ⑬：湿度 (%)
- ⑭：風速 (m/s)
- ⑮：日照時間 (h)
- ⑯：降雨量 (mm)
- ⑰：通日 (1月1日からの通算日数)
- ⑱：太陽距離の比 (地球太陽間の瞬間と平均距離の比) = $1.0 + 0.01676 \cdot \cos(0.977 \cdot ((\text{⑰}) - 186))$
- ⑲：計算日の赤緯 (地球上の太陽の緯度 : DEG) = $23.45 \cdot \cos(0.966 \cdot ((\text{⑰}) - 173))$
- ⑳：計算日の赤緯 (地球上の太陽の緯度 : RAD) = ⑲・ π /180
- ㉑：日没時刻 (時角, RAD) = $\cos^{-1}(-\tan \text{③} \tan \text{⑲})$
- ㉒：日没時刻 (時角, DEG) = ㉑・180/ π
- ㉓：可照時間 (昼間の長さ 1 時間の時角 15° で割る : h) = $2 \cdot \text{⑲} / 15$
- ㉔：大気圏外日射量 (MJ/m²/day) = $1.37 \cdot 10^{-3} / \text{⑱}^2 \cdot 86,400 / \pi \cdot (\text{⑲} \cdot \sin \text{③} \sin \text{⑲} + \sin \text{⑲} \cos \text{③} \cos \text{⑲})$
- ㉕：飽和水蒸気量 (空気の温度 t での飽和水蒸気圧 : hPa) = $6.1078 \cdot \exp((17.2694 \cdot \text{⑫}) / (\text{⑫} + 237.30))$
- ㉖：実際の水蒸気量 (hPa) = ㉕・⑬/100
- ㉗：純放射量 (MJ/m²/day)
= $(1 - \text{⑤}) \cdot \text{㉔} \cdot (0.18 + 0.55 \cdot \text{⑬} / \text{⑲}) - 4.9 \times 10^{-9} \cdot (\text{⑫} + 273.2)^4 \cdot (0.56 - 0.092 \cdot 0.866 \cdot \sqrt{\text{⑫}}) \cdot (0.1 + 0.9 \cdot \text{⑬} / \text{⑲})$
- ㉘：気温 t $^{\circ}\text{C}$ での温度飽和水蒸気圧曲線の勾配 (hPa/ $^{\circ}\text{C}$)
= $0.4495 + 0.2721 \times 10^{-1} \cdot t + 0.9873 \times 10^{-3} \cdot t^2 + 0.2907 \times 10^{-5} \cdot t^3 + 0.2538 \times 10^{-6} \cdot t^4$
- ㉙：水の蒸発潜熱 (MJ/kg) = $2.5 - 0.0024 \cdot \text{⑫}$
- ㉚：2mでの風速 (m/s) = $\text{⑭} \cdot \log 200 / \log(100) \cdot \text{④}$
- ㉛：風速係数 = $0.26 \cdot (1 + 0.54 \cdot \text{㉚})$
- ㉜：ペンマン式右辺の第1項 = $(\text{㉗} / (\text{㉘} + \text{⑧})) \cdot (\text{㉗} / \text{㉙})$
- ㉝：ペンマン式右辺の第2項 = $(\text{⑧} / (\text{㉘} + \text{⑧})) \cdot \text{㉛} \cdot (\text{㉕} - \text{㉖})$
- ㉞：蒸発位 (mm/day) = ㉜ + ㉝

ウ. 日照時間の測定計器間差の修正

ペンマン式では純放射量が必要であるが、純放射量の主要な因子である日射量は一部の気象官署でしか測定されていないので、全ての気象観測所で測定されている日照時間から推定する。

しかし、日照計の機種が気象官署とアメダス4要素観測所及び観測期間によって異なっており（表-8.7）、日照計によっては日照時間を修正する必要がある。ジョルダン式日照計と回転式日照計はほぼ同等な値を示すので換算は行わなくてよい。しかし、旧型太陽電池式日照計は回転式に比べて日照時間が長く、新型は短く計測されるので、それぞれ回転式での値へ換算する必要がある。

表-8.7 日照計の概要

測定場所	観測期間	日照計の種類
気 象 官 署	昭和 60 年～昭和 63 年頃以前	ジョルダン式日照計
	昭和 60 年～昭和 63 年頃以降	回転式日照計
アメダス4要素観測所	昭和 60 年～昭和 63 年頃以前	旧型太陽電池式日照計
	昭和 60 年～昭和 63 年頃以降	新型太陽電池式日照計

エ. 基準蒸発位（ E_0 ）の決定

ペンマン式により算出された蒸発位（ E_p ）は、梅雨、連続干天、天候不順といった気象現象に左右されており、毎日の値はもちろん月別の平均値であっても、年次によっては大きく変動するため、特定年の蒸発位（ E_p ）をそのまま使用することは好ましくない。このため気象台のデータを基に計算した過去 20～30 年間の各年の月別蒸発位を求め、かんがい期間の蒸発位の合計値を統計処理して、10 年に 1 回程度の割合で発生する蒸発位を決定し、これを基準蒸発位（ E_0 ）とする。この際に、基準蒸発位（ E_0 ）の決定に当たっては、かんがい期総有効雨量、かんがい期総雨量、かんがい期連続干天日数、かんがい期総干天日数等により異常年でないかを確認する必要がある。

入手できるデータの制約がある地区については、統計処理・解析手法による再現値等を使用してもよい。

なお、基準蒸発位（ E_0 ）は小数点以下第 2 位を四捨五入して 1/10mm 単位で表示するものとする。

(2) 基準蒸発散量（ ET_m ）の算出

基準蒸発散量（ ET_m ）は、作物に利用可能な土壌水が十分供給され、作物が正常に生育できる生育環境の下での栽培ほ場からの蒸発散量を水深で表したものであり、地域の気象特性を基に決められた基準蒸発位（ E_0 ）と、導入作物の種類とその生育ステージによって決まる作物係数（ k_c ）を基に、次の式（8.3）により決定する。

$$ET_m = k_c \cdot E_0 \text{ (mm/day)} \dots\dots\dots (8.3)$$

作物係数（ k_c ）は、ペンマン式により計算される蒸発位（ E_p ）と実際の作物の蒸発散量の比に基づいて、作物の種類とステージ別に定められている。

ア. 作物係数（ k_c ）

用水計画に用いることのできる作物係数（ k_c ）は表-8.8 のとおりである。生育ステージ欄は、播種・定植期（播種・定植用水を使用した以降で初期生育が開始するまでの期間）、生育期、完熟期又は収穫期（完熟日又は収穫日）のそれぞれの生育段階の数値を示す。作物係数（ k_c ）に

については、作物の蒸発散特性からグループ分類された標準値を表示しており、そのグループに属する作物については、原則として、この標準値を作物係数 (k_c) として用いる。

常緑果樹、永年牧草など年間を通して被覆程度が大きいものは、基本的には常に生育期として扱い、季節的変動が知られている場合は、季節変動を考慮する。落葉果樹やアスパラガス等の永年性作物の表示は、葉の群落形成過程を1年生作物に模して適用する。

表-8.8 作物係数表 (k_c)

作物	生育ステージ			作物	生育ステージ		
	播種 定植期	生育期	完熟期 収穫期		播種 定植期	生育期	完熟期 収穫期
なす トマト ピーマン	0.7	1.0	1.0	ねぎ たまねぎ にんじん			
きゅうり	0.7	1.0	1.0	だいこん			
メロン すいか かぼちゃ その他うり類	0.7	1.0	0.7	てんさい ごぼう ながいも ホップ	0.7	1.0	0.8
レタス キャベツ はくさい ブロッコリー カリフラワー 芽キャベツ アスパラガス その他大型葉菜類 (タカナ・みずな等)	0.7	1.0	0.9	その他冬型野菜類等(飼料ビー ト、にんにく、らっきょう、にら、 なたね等)			
ほうれんそう セルリー いちご その他軟弱野菜類(しゅんぎく、 ちんげんさい等)	0.7	1.0	0.9	さといも やまといも	0.7	1.1	0.9
未成熟とうもろこし	0.7	1.1	1.0	かんしょ ばれいしょ	0.7	1.0	0.8
とうもろこし ソルガム さとうきび ネピアグラス その他大型禾本科類 (らい麦等)	0.7	1.1	0.6	しょうが こんにゃく	0.7	1.0	0.8
大豆 らっかせい 小豆 菜豆 その他食用豆類等(オクラ等)	0.7	1.1	0.5	陸稲	0.7	1.1	1.0
そらまめ えんどう その他食用冬作類等	0.7	1.1	1.0	小麦 大麦 えん麦 その他食用禾本科類	0.7	1.1	0.3
あわ きび 雑穀 その他食用夏作禾本科類等 (ひえ、そば等)	0.7	1.0	0.3	ごま			
ひまわり	0.7	1.1	0.4	イタリアンライグラス オーチャード チモシー その他寒地型禾本科類 牧草(ペレニアルライグラス等)	1.2	1.2	1.2
				芝			
				ローズグラス バヒアグラス その他小型禾本科牧草 (ダリスグラス等)	1.0	1.0	1.0
				クローバ アルファルファ その他飼料用豆科類	1.1	1.1	1.1
				たばこ	0.7	1.0	0.8
				クワ かき なし りんご ぶどう	0.7	1.1	0.8
				その他落葉果樹(もも、おうとう、 くり等)			
				みかん	0.7	0.9	0.7
				茶・常緑果樹(びわ等)	1.0	1.0	1.0

出典：平成5年度計画基準改定調査(畑地用水量調査)報告書(H4全国農業試験場アンケート結果)

ステージ別の作物係数 (k_c) の決定方法の例を図-8.6 に示す。

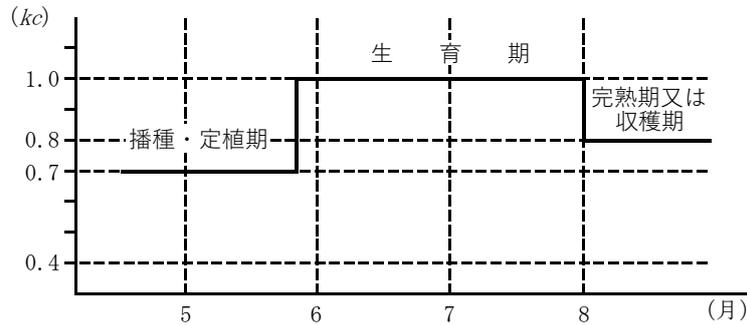


図-8.6 ステージ別の k_c 値の決定方法

イ. 作物の生育ステージ

生育ステージの区分を表-8.9 に示す。

表-8.9 作物の生育ステージ

①播種・定植期	土壌表面に作物被覆のない発芽の段階又は生育が始まる段階 (被度 10%以下)
②生育期	播種・定植期の後期から土壌が完全に効果的に被覆されるまでの段階 (被度 70~80%) 土壌表面が効果的に完全被覆され葉の変色又は落葉により成熟が始まるまでの段階。茎葉野菜類はこの段階で収穫するものが多い。 生育旺盛期の終わりから完熟期又は収穫期までの段階
生育前期	
生育旺盛期	
生育後期	生育旺盛期の終わりから完熟期又は収穫期までの段階
③完熟期又は収穫期	穀実が完熟し、地上部が枯死するまでの状態 (完熟日又は収穫日)

(3) 計画蒸発散量 (ET_a)

計画蒸発散量 (ET_a) は、作物の生育の一定期間において水供給が不足しても収量・品質に影響を受けない場合の蒸発散量をいい、基準蒸発散量 (ET_m) を修正した次の式 (8.4) により求める。水分反応係数 (k_a) は、一時的な低水分状態での土壌水分管理に対する作物固有の水分反応特性を考慮し、用水計画上にあって基準蒸発散量 (ET_m) より少ない蒸発散量に修正する係数である。

$$ET_a = k_a \cdot ET_m \quad (\text{mm/day}) \dots \dots \dots (8.4)$$

ここで、

k_a : 水分反応係数 ($k_a \leq 1.0$)

上記の適用は、①作物の耐干性が強い、②収量に関して致命的な生育ステージではない、③十分な保水力を持った土壌などの条件が満たされる場合のみに限定する。

作物によっては、比較的高水分の条件下では蒸発散量の変化は少ないが、低水分の条件下では蒸発散量は減少する。また、短期間の干ばつを深根性のために回避する生態的耐干性を示すものや茎葉そのものが強い耐干性を示すため、生育ステージによっては、一時的なかんがい水量の減少の影響を受けにくく基準蒸発散量 (ET_m) より少ない蒸発散量によっても同程度の収量を期待できるものがある。したがって、これらの作物については、水分反応係数 (k_a) を考慮することで利用形態に即したより適正な用水計画が可能となる。

用水計画に用いることのできる水分反応係数（ k_a ）を表-8.10に示した。表に該当しない作物については1.0として取り扱うこととする。蒸発散量が長期にわたって基準蒸発散量（ ET_m ）以下となる土壤水分条件下では、作物中の体内水分が不足し、生育阻害を来し、収量、品質に悪影響を与える。影響の程度は、作物の種類、品種、水不足の程度やそれが起こる時期によって異なる。また、かんがい条件、施肥、栽植密度、病虫害防除などの栽培条件や土壤条件、地下水位などの立地条件と独立して考えることはできない。

したがって、作物により土壤面が十分に被覆され、蒸散量が蒸発散量の大部分を占め作物固有の特徴が明確に現れる生育期のみ適用する係数である。

表-8.10 水分反応係数（ k_a ）

水分反応係数	作物	
0.8	野菜	たまねぎ、だいこん「秋冬」、かぼちゃ、にんじん「秋冬」、はくさい、すいか、トマト、メロン、キャベツ、かぶ、つけ菜類、ごぼう
	普通作物	えん麦、小麦、大麦、大豆、小豆、スイートコーン、さとうきび、ばれいしょ、てんさい、芝、たばこ、さつまいも、らっかせい
	飼料作物	飼料かぶ、オーチャード、ローズグラス、チモシー、ネピアグラス、スーダングラス、アルファルファ、イタリアンライグラス、クローバ、ギニアグラス、ソルガム
	永年性作物	みかん、りんご、鑑賞木

(4) 計画日消費水量

ペンマン法を用いた決定手法では、根群域内の水分減少量で、計画蒸発散量（ ET_a ）と根群域より下層からの上向き補給水量（ Q ）を考慮して計画日消費水量を決定する。

根群域は、土壤面蒸発及び作物根による吸水・蒸散によって水分消費を生ずる土層であり、この土層には作物根の大部分（80～90%）が存在している。我が国のような湿潤地帯では、降雨の一部が根群域より下層に浸透し貯留される。その後、蒸発散による根群域の水分減少が下層との水分傾度を高める結果、毛管現象によって、土壤水分が下層から根群域へ再移動し、かんがい水と同様に機能して作物に消費される。これを上向き補給水量（ Q ）といい、ペンマン法による畑地かんがい用水計画では、この上向き補給水量（ Q ）を考慮して計画日消費水量を算出する。なお、計画日消費水量の単位は、一般には小数点以下第1位を四捨五入して表示する。

かんがい計画上の計画日消費水量は、計画蒸発散量（ ET_a ）より上向き補給水量（ Q ）を減じて算定する。ただし、根群域以下の下層土層が礫質、岩盤地帯などでは毛管連絡が遮断されるため上向き補給水量（ Q ）は見込めない場合があるので、土壤調査結果等から検討する必要がある。

$$\text{計画日消費水量} = \text{計画蒸発散量} (ET_a) - \text{上向き補給水量} (Q) \quad (\text{mm/day})$$

ア. 土層の特性

土層の定義と水の動きの模式図を図-8.7に示し、各土層についての説明を以下に述べる。

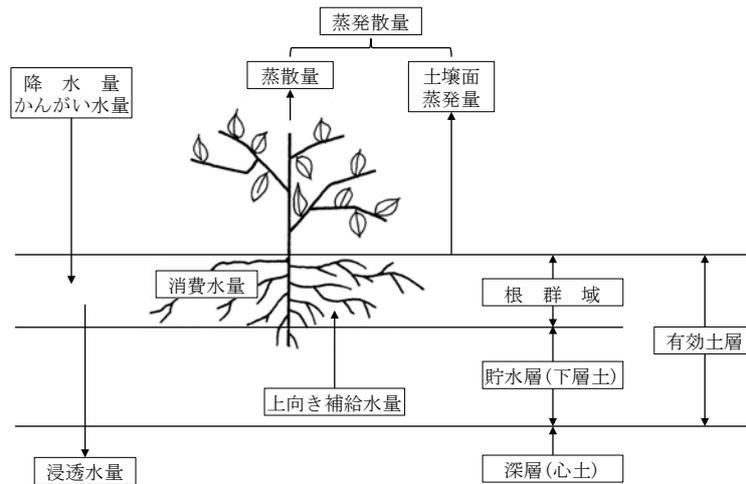


図-8.7 土層の定義と水の動き

(7) 主要根群域と根群域

根系の発達は、一次的には作物の種類によって定まるが、二次的には、地温、肥料、土壤水分、土壤構造等の環境が大きく作用する。土壤の物理性からみれば、根群域の深さは、地下水、岩盤、礫層、緻密な土層、あるいは耕盤などの障害によって制限される。

地力増進法に基づく指針「地力増進基本指針」では、普通畑、樹園地の土壤の基本的な改善目標が示されており、その概要は表-8.11のとおりである。

表-8.11 地力増進基本指針に示された普通畑、樹園地の土壤の改善目標

地目	改善目標
普通畑	<ul style="list-style-type: none"> ・作土の厚さ：25cm 以上 ・主要根群域¹⁾：地表下 40cm までの土層
樹園地	<ul style="list-style-type: none"> ・主要根群域の厚さ：40cm 以上 ・根群域²⁾の厚さ：60cm 以上

1)主要根群域とは、細根の70～80%以上が分布する範囲であり、主として土壤の化学的性質に関する項目(pH、陽イオン交換容量、塩基状態、有効態リン酸含有量及び土壤有機物含有量)を改善する対象。

2)根群域とは、根の90%以上が分布する範囲であり、主として土壤の物理的性質に関する項目(最大緻密度、粗孔隙量及び全容易有効水分保持能)を改善する対象。地力増進基本指針では「根域」という。

普通畑については、運用上、根群域＝主要根群域とみなせることから、これらの深さを畑地かんがい計画上の深さの目安とすることができる。

(イ) 貯水層（下層土）

根群域のすぐ下に位置する土層であり、根群域の貯水能力を上回る降水による浸透水が貯留される層である。根群域の水分減少に伴い、この貯水層から上向きの補給水(Q)が根群域に供給される。

(ウ) 深層

貯水層のすぐ下に位置する土層であり、浸透流の向きは一般にかんがい期間を通じて常に

下向きである。

(エ) 地下水位

地下水位が貯水層の直下、つまり地表面下1.0～1.5m程度のところに存在する場合がある。このような場合には、暗渠を設けたり、高うねにするなどして、地下水と貯水層との水理的な連続性を絶っておくことが望ましい。そうしなければ過湿畑となり、このような傾向は、冬期などの蒸発散量が小さい時期に顕著に現れる。

イ. 上向き補給水量 (Q) の決定

上向き補給水量 (Q) は、根群域より下の貯水層 (下層土) からの水分補給量であり、土性区分、根群域の深さ (D)、蒸発散量 (ET)、蒸散量 (T) 等によって異なる。

具体的には、まず地区内の土壌分布割合等から、地区を代表する土性区分を、表-8.12を参照して①、②、③及び④から選ぶ。土性区分が①か②である場合は、作物ごとの計画蒸発散量 (ET_a) とこれまでの研究成果の集積によって作成された図-8.8を参照して、月ごとに上向き補給水量 (Q) を決定する。

このとき、作物の生育ステージの変化に伴う上向き補給水量 (Q) の変化を考慮することとし、図-8.8の適用に当たっては、表-8.13に示した T/ET の値を使用する。(表-8.12、表-8.13、図-8.8は河野らの研究成果¹⁾に基づいている。)

また、土性区分が③か④である場合は、これらの上向き補給水量 (Q) が同程度かつ少ないため、計画上はグラフから読取る手法を用いず、普通畑、樹園地のそれぞれに対して平均的な値である0.2mm/day、0.1mm/dayを上向き補給水量 (Q) の値とする。

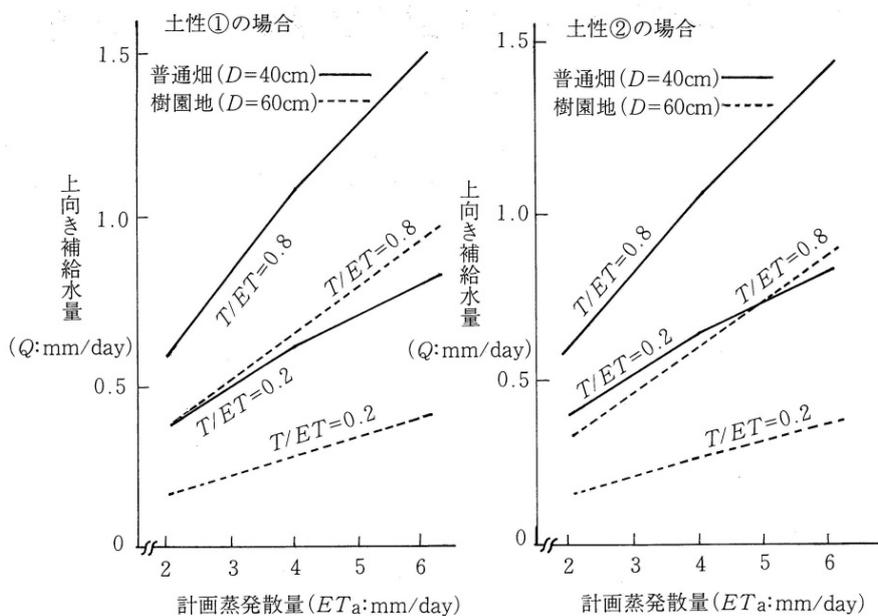
表-8.12 土性区分の区分

土性区分	主な土性 (国際法による粒径区分)
①	SL、L、S _i L
②	SCL、CL、S _i CL
③	SC、L _i C、S _i C、HC
④	S、LS

普通畑については40cm程度、樹園地については60cm程度の土性によって判断する。

表-8.13 T/ET の区分

土地利用の形態	播種・定植期	生育期	完熟期又は収穫期
普通畑	0.2	0.8	0.2
樹園地	0.2	0.8	0.8



D: 根群域の深さ
 普通畑の場合は 40cm、樹園地の場合は 60cm のグラフを採用する。

図-8.8 土性区分及び根群域別の上向き補給水量

8.3 その他の日消費水量の算定方法 (参考)

日消費水量の算定方法として、実測法としては土壤水分減少法以外にライシメータ法、チェンバー法等がある。また、気象データから日消費水量を求める推定法としてはペンマン法以外に、ブラネイ・クリドル法、蒸発散比法等がある。参考にこれらの概要を以下に示す。

(1) ライシメータ法

一般にライシメータには排水収支型、フローティング (浮遊式) 型、ウェイイング (秤量式) 型等がある。

排水収支型では土壤層と浸出水受水槽を持つライシメータにより、降雨量 (R) とかんがい水量 (I) を収入、浸出水量 (S) を支出とし、土壤水分変化量 (M) を考慮して、収支計算を行うことにより消費水量 (e) を求める方法である。ただし、M の符号は土壤水分減少量に+ (プラス) を土壤水分増加量に- (マイナス) をとる。

$$e = R + I - S \pm M \dots \dots \dots (8.5)$$

(2) チェンバー法

この方法は、あらかじめほ場の土壤水分を 24 時間含水量にしたのち、供試作物を蒸散室で被覆してこれに空気を送り込み、その出入口の湿度差を高い精度で求め、これと送り込んだ空気量から蒸発散量を測定する方法である。この方法による場合、実際の栽培管理状況に近い姿で測定でき、また、月別の変化を知ることができるという利点はあるが、一般に土壤水分減少法より大きな値となることから、特に土壤中での水分消費を求める場合には、補正が必要である。

(3) ブラネイ・クリドル法

この方法は、気温と可照時間と作物係数から消費水量を求めようとするものである。

$$e_m = 0.25k_c \cdot P \cdot t \quad \dots \dots \dots (8.6)$$

$$e_d = e_m/m \quad \dots \dots \dots (8.7)$$

ここで、

- t : 月平均気温 (°F)
- P : 全年可照時間の割合 (%)
- k_c : 作物係数で表-8.8による
- e_m : 月消費水量 (mm)
- e_d : 平均日消費水量 (mm/day)
- m : 月の日数 (day)

すなわち、実測によって e_m の値を求め、作物ごとに k_c の値を定めておけば、気象資料から任意の地域での消費水量が求まる。

(4) 蒸発散比法

この方法は、蒸発計蒸発量の値から消費水量を求める方法である。すなわち蒸発計蒸発量と消費水量の間に作物とその生長段階に応じて、一定の相関があるとする考え方により求めるものである。

$$e = \alpha \cdot E \quad \dots \dots \dots (8.8)$$

ここで、

- e : 消費水量 (mm/day)
- E : 蒸発計蒸発量 (mm/day)
- α : 蒸発散比

8.4 日消費水量の算定事例

参考事例として、各種文献において算定されている日消費水量を以下の表-8.14に示す。

表-8.14 日消費水量の算定事例

地区	作物	土性区分	日消費水量 (mm/day)	引用 文献
茨城県	なす	埴壤土	1.9~5.4	2)
千葉県	ごぼう、さつまいも等 飼料作物	砂壤土・壤土	1.5~6.0	3)
		砂壤土・壤土	1.5~8.0	
愛知県	冬にんじん	砂壤土・砂質埴 壤土	3.2~8.4	8)
近畿地方 日本海側	もも	砂土・砂壤土	1.3~4.2	4)
	なし	埴壤土	0.4~4.1	
	長だいこん	壤土・砂壤土	3.6~4.4	5)
	ひのな (日野菜)	砂壤土・砂土	0.7~5.2	
	かぼちゃ	砂土	0.7~3.0	
	とうもろこし	砂壤土・砂土	1.5~4.1	
	メロン	砂壤土・砂土	1.2~2.1	6)
	すいか	砂壤土・砂土	3.1~5.3	
	かんしょ	砂壤土	0.7~4.0	
		大かぶ	砂壤土・砂土	3.8~4.0
丸だいこん		砂土	5.4~6.5	
すいか		砂壤土・砂土	5.9~6.7	
ブロッコリー		砂壤土・砂土	4.6~6.2	
和歌山県	スターチス (ハウス栽培)		0.7~2.0	8)
	メロン (ハウス栽培)	砂壤土・壤土	0.8~2.0	
	すいか (ハウス栽培)		1.7~2.9	
	スターチス (ハウス栽培)		1.2~2.4	8)
	ダリア (ハウス栽培)	壤土・埴壤土	1.1~3.3	
	すいか (ハウス栽培)		1.2~3.3	
熊本県	きゅうり (ハウス栽培)	埴壤土	0.6~5.1	8)
宮崎県	いちご (ハウス栽培)	埴壤土・壤土	0.5~3.7	8)

引用文献

- 1) 河野 広・白谷栄作・グイエン クアン キム：畑地用水計画における根群域への上向き補給水量について、農業土木学会論文集 63(1)、pp9～15 (1995)
- 2) 宮本輝仁・塩野隆弘・亀山幸司・井口三郎・盛永一美・田中和博・長谷川昌美：畑地灌漑計画基礎諸元の算定へのキャパシタンスセンサーの適用性について、農業農村工学会論文集 81(6)、pp99～106 (2013)
- 3) 猪口琢真・河野英一・笹田勝寛・石川重雄：露地普通畑灌漑地区における水利用の実態と用水計画の適応性、農業土木学会論文集 75(2)、pp61～69 (2007)
- 4) 谷川寅彦・矢部勝彦：造成樹園地における水分消費と下層補給について、農業土木学会論文集 74(3)、pp113～120 (2006)
- 5) 谷川寅彦・金木亮一・矢部勝彦：傾斜畑における土壌水の動態と水分消費特性、農業土木学会論文集 70(5)、pp81～88 (2002)
- 6) 谷川寅彦・木原康孝・福桜盛一・矢部勝彦：フィルム被覆栽培下における造成畑の水分動態と水分消費特性、農業土木学会論文集 68(6)、pp103～109 (2000)
- 7) 谷川寅彦・木原康孝・福桜盛一・矢部勝彦：造成後の露地畑における水分動態と下層補給の事例、農業土木学会論文集 68(1)、pp119～129 (2000)
- 8) 農林水産省農村振興局整備部設計課：令和4年度計画基礎諸元調査報告書

参考文献

- 成岡道男・宮本輝仁・岩田幸良・亀山幸司・中村俊治：HYDRUS-1D を使ったユリ畑の上向き補給水量の算定、農業農村工学会誌 83(7)、pp31～36 (2015)
- (社)畑地農業振興会：畑地灌漑の新展開－明日の畑かんをみざして－、pp137～181 (1992)

9. 計画間断日数と1回の計画かんがい水量

(基準 3.3.4.3 関連)

9.1 計画間断日数と1回の計画かんがい水量

計画間断日数は、全容易有効水分量 (TRAM) を計画最大日消費水量 (CU_{max}) で除して、小数点以下を切捨てた値で求める。なお、計画日消費水量がピーク期以外の場合も、間断日数は変更せずにかんがい時間で調整する。

土壌の水分保持特性を最大限有効に利用する間断かんがいでは、かんがい回数を減らすことができるため、かんがい作業の軽減や無効かんがいの抑制に対して効果が高い。

用水計画においては、かんがい回数の減少だけにとらわれることなく、降雨の有効利用や営農の自由度なども考慮すべきである。

1回の計画かんがい水量は、全容易有効水分量 (TRAM) を上限値として、営農、栽培条件等の検討を行い、計画間断日数に期別ごとの計画日消費水量を乗じて求める。また、計画最大日消費水量 (CU_{max}) を乗じたものを1回の計画最大かんがい水量という。

間断かんがいによる土壌水分の管理は、一般に制限土層の有効水分が消費され、土壌水分張力が $pF3.0$ に達した時、それまでに有効土層で消費された全水量 (全容易有効水分量 (TRAM)) を一度にかんがいで、土壌水分を24時間容量に戻すという考え方に立っている。ローテーションブロックへ供給される水量の上限は、面積と作物の日消費水量から決まる。この供給水量を超過することなく、個々のほ場のかんがい回数を減らす合理的な方法が間断かんがいである。計画間断日数の最大値は、全容易有効水分量 (TRAM) を計画最大日消費水量 (CU_{max}) で除した計画間断日数である。理論的には、計画間断日数は1日 (毎日かんがい) から計画間断日数の最大値までの任意の日数に設定したとしても、ローテーションブロックへ供給される水量を超えることはない。

9.2 参考

計画地域の降雨特性からみて、かんがいのピーク時においてもかなりの降雨が期待でき、しかも、土壌及び作物の特性から全容易有効水分量 (TRAM) がある程度の大きさを持っているならば、1回のかんがい水量を若干低めに設定することにより、かんがい期間中の有効雨量の割合を増やすことが可能となり、結果として用水量の減少につながる場合もある。このとき、間断日数を若干小さめに調整した場合も想定し、日降雨量と気象因子により補正した日消費水量に基づき、かんがいの計画基準年及び干ばつ年を中心とした20年程度を対象としてシミュレーションを行い、土壌水分が生長阻害水分点を下回らない状態で確保されているかどうかをチェックする。

この結果、ある程度調整を加えた1回のかんがい水量と間断日数でも、土壌水分状態が正常生育を保証する状態に保たれているならば、計画値を若干修正して用いることも可能と考えられる。

以上のような検討を行うことにより、用水量を減少できる場合があるが、反面、かんがい頻度の増加を招く等の問題も生ずるので、水源施設の構造、管理組織の内容及び事業の経済性等も考慮しつつ総合的立場からの検討が必要である。また、このような方法を用いる場合は、従来の地区と比較してその必要性、妥当性が整理されていることが必要である。

10. マイクロかんがいにおける計画日消費水量等の決定

(基準 3.3.4.3 関連)

10.1 用水計画の基本的考え方

用水計画に当たっては、マイクロかんがいの特徴と対象地区の気象・土壌・作物の特性を十分把握するとともに、営農及び用水利用の展開方向にも配慮して施設計画と整合したものとなるよう作成する。

マイクロかんがいは、主に作物の根群域に用水を少量頻繁に供給するかんがい方式であり、作物の収量のみならず、土壌水分の管理から品質の向上にも対応することが可能である。このため、用水計画は、作物の水分生理上の特性を理解した上で、かんがい開始時期や土壌水分状態等について、作物別、生育段階別に作成することが望ましい。

マイクロかんがいにおける水分補給のための用水計画では、作物がうね状あるいは離散的に植栽されているほ場の場合、根群域付近を給水範囲としたかんがい（以下「部分かんがい法」という。）が計画され、一方、比較的密植されたほ場の場合、従来のスプリンクラかんがい方式と同様にほ場全面（以下「全面かんがい法」という。）に給水されるよう計画される。なお、全面かんがいの場合の消費水量は露地畑では技術書「8. 計画日消費水量等の決定」の項に準拠し、施設畑（ハウス）では技術書「11. 施設畑（ハウス）の計画日消費水量等」の項に準拠する。

部分かんがい法では、エミッターを中心とした給水範囲において土壌が湿潤状態（以下「湿潤域」という。）に保たれ、この範囲以外は降雨がない限り非湿潤状態（以下「非湿潤域」という。）にある。したがって、用水量の算定は、従来のほ場全面に給水を行い、深さ方向（一次元）についての給水と根群分布を対象とする用水量の考え方とは異なった考え方を必要とする。

したがって、部分かんがい法の用水計画は、このような考え方を基本に、次のような特徴を考慮して作成する。

(1) 湿潤域

マイクロかんがいによって形成される湿潤範囲を湿潤域といい、かんがいの範囲によって帯状分布、独立円分布、全面分布になる。分布する範囲は、エミッターの流量、配置間隔、土壌の種類、構造、土壌水分、気象条件等によって異なる。また、土壌面に形成される湿潤面の広がりには深さ方向の湿潤範囲の広がりとして検討される必要がある。

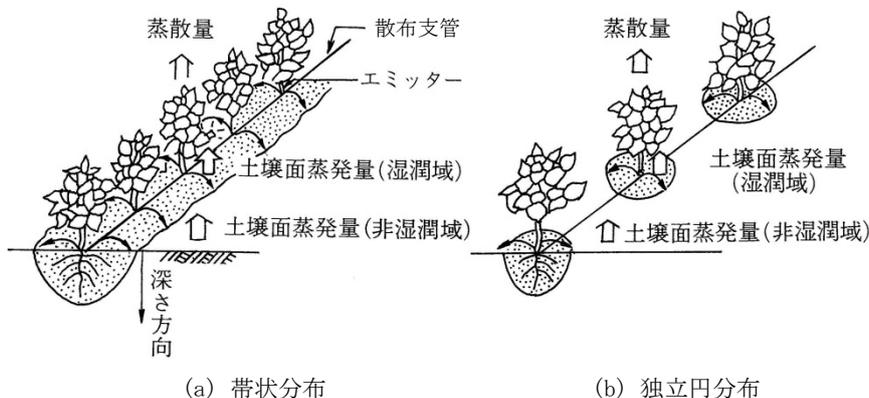


図-10.1 ドリップチューブによる湿潤パターン

(2) 水分消費域

水分消費域とは、作物の根群域が分布している領域で、従来の全面かんがい法では、対象ほ場の大きさに相当する。部分かんがい法では、露地栽培と施設栽培において根群分布が異なるので、それぞれの水分消費域の大きさを変えて取り扱う。水分消費域は、施設栽培では湿潤域の大きさと同じであるが、露地栽培では、たびたびの降雨で降雨後一定期間ほ場が全面に湿潤状態になるので、根群はほ場全面に分布しているとみなし、湿潤域だけでなく非湿潤域を包含し、全面かんがい法と同じほ場全面を対象とする。

(3) 少量頻繁かんがい

マイクロかんがいでは、湿潤域に少量で頻繁にかんがいをを行うことができる。このため、表面付近の根がストレスを受けないようにかん水することで、作物の生理的需要にきめ細かく対応することができ、集約的な栽培が可能となる。このようなマイクロかんがいの特徴は、一般に間断日数を短くして1回のかん水時間を長くするほど発揮できる。また、砂地のような保水力が小さい土壌でも少量頻繁かんがいによって適正な水分量を保つことができる。

対象作物によっては、湿潤域内の制限土層を対象に 24 時間容水量 (f_c) と生長阻害水分点 (pF3.0) との間に適正なかん水開始点水分量 (θ_1) を設定して f_c と θ_1 の間で水分管理を行うとよい。かん水開始点水分量の指標として、ここでは次の式 (10.1) に示す好水分作物係数 (C_r) を導入する。

$$C_r = \frac{(\text{かん水開始点水分量}(\theta_1) - \text{pF3.0水分量})}{(24\text{時間容水量}(f_c) - \text{pF3.0水分量})} \quad \dots \dots \dots (10.1)$$

C_r は 1.0 より小さい値を示し、耐干性作物では、かん水開始点水分量を pF3.0 程度にとることができるので C_r の値がかなり小さくなる。また、好水分作物では C_r の値が、1.0 に近づく。したがって、かん水開始点水分量を高く (f_c の近くに) 設定する場合には、一般には1回のかんがい水量が小さくなり間断日数も短くなる。このため、施設栽培のように好水分作物を導入して高品質と高収量を目指す営農体系下では、このようなマイクロかんがいの特徴を取り入れることが望ましい。

(4) マイクロかんがいにおける容易有効水分量 (RAM) と全容易有効水分量 (TRAM)

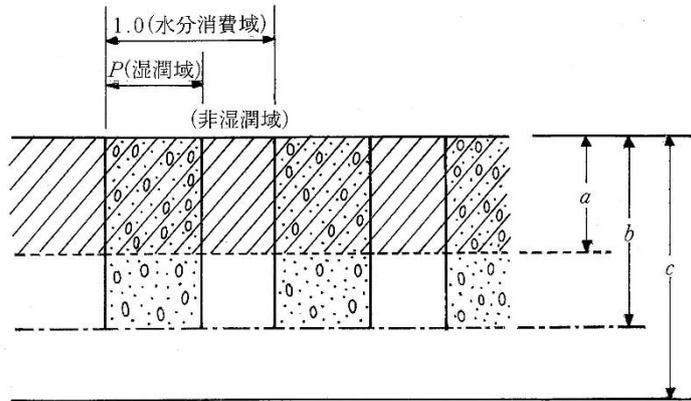
容易有効水分量 (RAM) は、24 時間容水量 (f_c) と生長阻害水分点の水分量 (pF3.0) との差として与えられる。全容易有効水分量 (TRAM) は、容易有効水分量 (RAM) と土壤水分消費型 (SMEP) から得られる。土壤水分消費型 (SMEP) は、高水分による管理と低水分による管理では、同じ土壌・作物でも異なり、高水分管理では土壤水分消費は表層に分布し、低水分管理では深層へも分布する。

また、マイクロかんがいでは、作物の水分生理を考慮した土壤水分の管理に即して、かん水点水分量 (θ_1) を設定するので、容易有効水分量 (RAM) の範囲 ($f_c - \theta_1$) が従来の考え方と異なる。

したがって、「作物の水分生理を考慮した土壤水分の管理を行うマイクロかんがいにおける TRAM」を、ここでは、マイクロ全容易有効水分量 (MTRAM) と定義する。MTRAM は計算上、TRAM に $(1 - C_r)$ を乗ずることによって得られる (10.4 参照)。

なお、部分かんがい法では部分湿潤域を形成するので、MTRAM に、さらに湿潤面積率 ($P = \text{全湿潤域面積} / \text{ほ場面積}$) を乗ずることによって1回のかんがい水量が求まる。このようにして

得られた値は、湿潤域での特性値であるが、計算上は図-10.2 に示すように、ほ場全面に均したものと取り扱う。これを全面換算仮想 TRAM (MTRAM×P=CTRAM) と定義する。なお、図-10.2 は、水分容量を模式的に表したものである。



- a : 全面換算仮想 TRAM (CTRAM) (mm)
- b : マイクロ全容易有効水分量 (MTRAM) (mm)
- c : 従来法における畑地かんがいの全容易有効水分量 (TRAM) (mm)
- b - a : 空き MTRAM (mm)
- P : 湿潤面積率 = 全湿潤域面積 / ほ場面積
-  : 湿潤域

図-10.2 露地栽培における MTRAM 等の容量模式図

(5) 用水量算定の手順

部分かんがい法での消費水量は、原理的には1株または1樹当たり何リットルと表示するのが望ましい。しかし、ほ場を対象とした用水計画の策定に際しては、他のかんがい方式の場合に準拠して、給水量をほ場全面の水量に均した全面かん水深で表示する。なお、マイクロかんがいにおける用水量算定の手順は図-10.3 のとおりである。

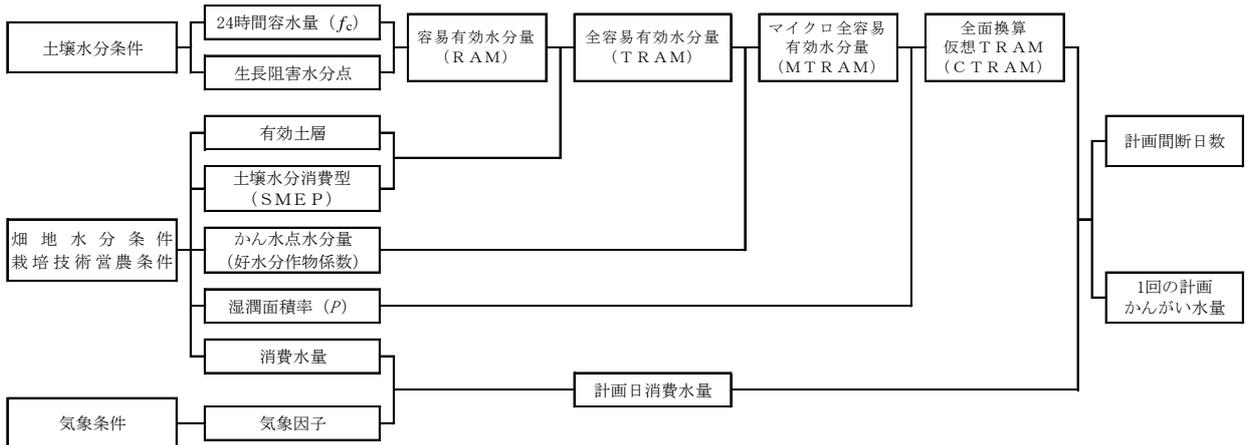


図-10.3 マイクロかんがいの用水量算定の手順

10.2 消費水量と計画日消費水量

消費水量は、作物が正常に生育し、高品質と多収量を実現し得る状況下で消費される有効土層内の土壌水分の減少量である。また、計画日消費水量は、消費水量に気象条件等を考慮して適切に求める。

(1) マイクロかんがいにおける消費水量の考え方

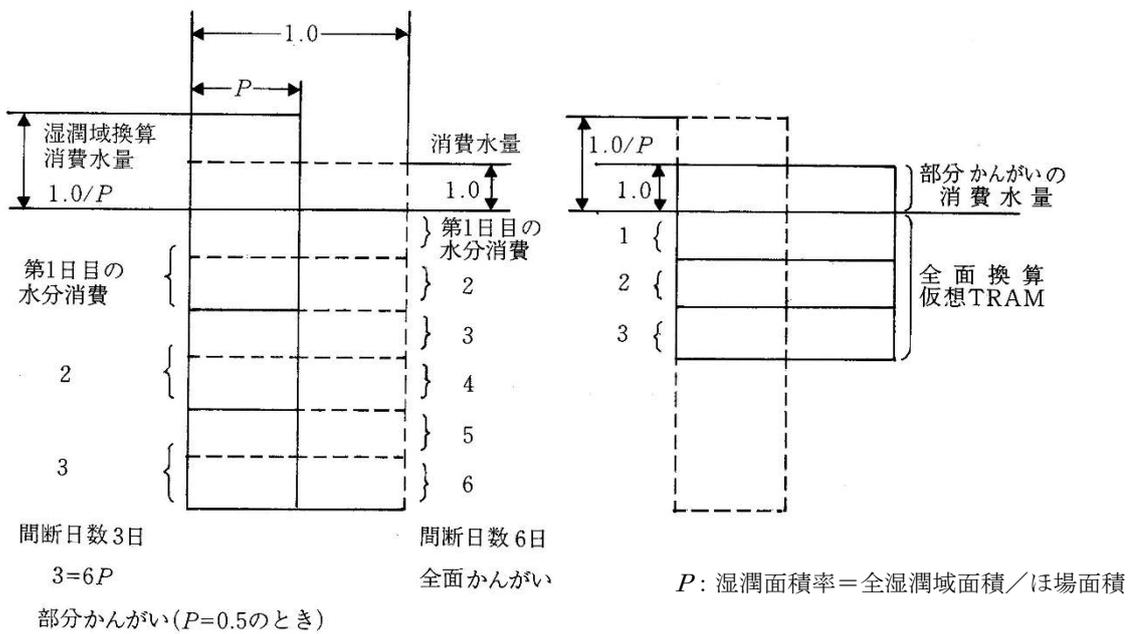
給水による土壌水分量は、無降雨条件下では一様に分布するのではなく、かん水点付近で大きく、かん水点から離れるに従って小さくなる。しかし、降雨の影響を受ける露地栽培では、降雨後の一定期間、ほ場は全面的に湿潤状態となり、土壌水分量はほ場全面に一様に分布する。

無降雨条件下において部分湿潤域を形成する場合の消費水量は、降雨によってほ場が全面的に湿潤状態になる場合に比べてやや小さくなる傾向にある。

しかし、降雨頻度が大きく、降雨影響期間の長い我が国の露地栽培にあつては、二つの消費水量を区分して取り扱うことは、計画上煩雑であるとともに、それほど実質的な差異はない。

降雨の影響を受けない部分かんがいの水分消費は、湿潤域からのみ生じる。一方、降雨の影響を受ける全面かんがいでは、ほ場全面から水分消費が生じる。両者の消費水量（容量表示）をほぼ同じとみなせば、両者の関係は図-10.4 に模式的に示される。湿潤域内で換算される消費水量（水深表示）は、部分かんがいで $1.0/P$ 、従来の全面かんがいでは、 1.0 であるが、同図 (a) 奥行単位長 (1.0) のものとして容量に換算すれば、部分かんがいは、 $(1.0/P) \times P = 1.0$ 、従来の全面かんがいは、 $1.0 \times 1.0 = 1.0$ となり、同じ値を示す。

また、湿潤域での特性値であるマイクロ全容易有効水分量 (MTRAM) は全面に均し、全面換算仮想 TRAM (CTRAM) として計画上取り扱う。したがって、部分かんがいの消費水量についても同様に、ほ場全面に均して取り扱う。この関係は、同図 (b) に示される。以下、ここでは消費水量についても全面に均したものとして取り扱うので、計画上容量に換算する場合は、この点について注意する必要がある。



(a) 湿潤域での水分消費の考え方 (b) 全面に均した部分かんがいの水分消費の考え方

図-10.4 部分かんがいによる消費水量 (模式図)

なお、露地栽培における部分かんがいで干天時の水分消費は、主に湿潤域において行われるが、降雨影響下の水分消費はほ場全面となり、湿潤域だけでなくその外側の非湿潤域においても行われる。その結果、図-10.2 に示す「空き MTRAM」(=MTRAM-CTRAM) に貯留される降

雨も有効雨量となる。したがって、従来法による全面かんがいに比べ有効雨量の割合が増加する。

(2) 消費水量の測定方法

消費水量の測定方法には、種々の実測法や推定法があるが、部分かんがい法では土壤水分減少法が適切な方法の一つとして考えられる。また、マイクロかんがいは、土壤水分の管理をきめ細かく行う場合があることから、作物の一作期間をいくつかの生育段階に区切り、生育段階ごとに平均日消費水量を求めることが望ましい。

露地栽培における部分かんがいで消費水量は、全土層が一様に 24 時間容水量 (f_c) となった状態を初期値として土壤水分の減少量を測定する。なお、このような測定によって得られた消費水量は、部分湿潤域での特性値ではなく、既にほ場全面に均した消費水量であることに注意する。

施設栽培における消費水量は、降雨の影響がない状況で給水し、部分湿潤状態を形成させ、土壤水分減少法による測定を行う。この場合、吸水根が平均的に分布している場所を把握した上で測定を行う必要がある。このようにして得られた値は、湿潤域での特性値であるので、これをほ場全面に均し、計画上の消費水量とすることが必要である。

10.3 土壤の湿潤パターン

土壤の湿潤パターンは、1 個のエミッター等から形成される各々の湿潤域の重複割合から決定される。

1 個のエミッターによって形成される湿潤域の大きさは、気象・土壤・作物及びかん水因子により異なる。これらの因子を整理すれば以下のとおりである。

- ① 気象因子（降雨、気温、日射等）
- ② 土壤因子（土性、初期水分量、土壤構造、蒸発量等）
- ③ 作物因子（根群分布、蒸発量、品質、生育ステージ等）
- ④ かん水因子（かんがい強度、かん水時間、エミッターの配置間隔等）

影響する因子のうち①～③が同一であれば、湿潤域の形成パターンは、主にエミッターの配置間隔によって決定され、配置間隔が密な場合は全面分布、帯状分布となり、粗な場合は独立円分布となる。用水計画上は、帯状分布として取り扱うか、独立円分布として取り扱うかは 1 個のエミッターによって形成される湿潤域相互の重複割合によって決定され、重複割合 (C/D) が 20% 以上の場合は帯状分布、20%未満の場合は独立円分布として取り扱う。

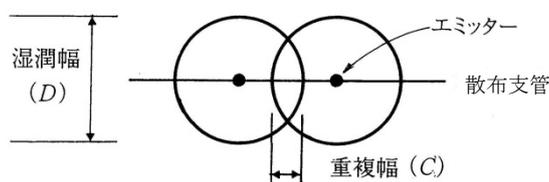


図-10.5 湿潤円相互の重複関係

対象ほ場の全面積に対する湿潤域の面積割合、すなわち、湿潤面積率 P は以下のとおり算定する。

- ① 帯状分布（エミッター配置間隔が密な場合）

$$P=(D \times L \times \text{散水支管本数}) / \text{ほ場面積}$$

② 独立円分布 (エミッター配置間隔が粗な場合)

$$P=(\pi/4 \times D^2 \times \text{エミッター数}) / \text{ほ場面積}$$

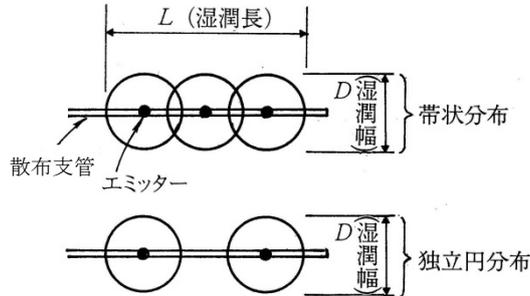


図-10.6 湿潤域面積の算定諸元

10.4 1 回のかんがい水量と間断日数

1 回のかんがい水量と間断日数は、マイクロかんがいの特徴を考慮し、対象地区の作物、営農に応じて適切に定める。

(1) マイクロ全容易有効水分量 (MTRAM)

全容易有効水分量 (TRAM) の算定式とマイクロかんがいによる全容易有効水分量 (MTRAM) の算定式を比較すると次の式 (10.2)、(10.3) のようになる。

$$\text{全容易有効水分量 TRAM} = (f_c - M_L) \cdot D \cdot \frac{1}{C_p} \quad (\text{mm}) \quad \dots \dots \dots (10.2)$$

$$\begin{aligned} \text{マイクロ全容易有効水分量 MTRAM} &= (f_c - \theta_1) \cdot D \cdot \frac{1}{C_p} \\ &= \frac{f_c - \theta_1}{f_c - M_L} \cdot (f_c - M_L) \cdot D \cdot \frac{1}{C_p} \\ &= \frac{f_c - \theta_1}{f_c - M_L} \cdot \text{TRAM} \\ &= (1 - C_r) \cdot \text{TRAM} \quad (\text{mm}) \quad \dots \dots \dots (10.3) \end{aligned}$$

ここで、

- f_c : 24 時間容水量 (体積含水率%)
- D : 制限土層の厚さ (mm)
- M_L : 生長障害水分点 (体積含水率%)
- C_p : 制限土層における土壌水分の消費割合 (%)
- θ_1 : マイクロかんがい法におけるかん水点水分量 (体積含水率%)
- C_r : 好水分作物係数

マイクロ全容易有効水分量 (MTRAM) は、従来の全面かんがいによる全容易有効水分量 (TRAM) 算定式において生長障害水分点を任意のかん水開始点水分量に置き換えたものである。計算上は従来の全容易有効水分量 (TRAM) の測定手法により求め、これに (1 - C_r) を乗じて求める。

(2) 計画間断日数

マイクロ全容易有効水分量 (MTRAM) から全面換算仮想 TRAM (CTRAM) を次の式 (10.4) により求める。

$$\text{全面換算仮想 TRAM } CTRAM = MTRAM \times P \quad (\text{mm}) \quad \dots \dots \dots (10.4)$$

ここで、

$$P : \text{湿潤面積率} = \text{全湿潤域面積} / \text{ほ場面積}$$

次に、計画間断日数は次の式 (10.5) から求める。

$$\text{計画間断日数} = \frac{\text{全面換算仮想TRAM}}{\text{計画最大日消費水量}} \dots \dots \dots (10.5)$$

なお、計画間断日数は、1 以上の場合、小数点以下を切り捨てて求め、1 未満の場合は連日かんがいとする。

(3) 1 回の計画かんがい水量

1 回の計画かんがい水量は、計画間断日数に各作物生育段階の計画日消費水量を乗じて求める。なお、計画最大日消費水量を乗じたものを 1 回の計画最大かんがい水量という。

(4) 計画用水量

計画用水量の算定は技術書「13. 計画用水量の決定」による。この場合、マイクロかんがいの適用効率は 95% 以上を目安とする。

11. 施設畑（ハウス）の計画日消費水量等

（基準 3.3.4.3 関連）

11.1 施設畑でのかんがいの特徴と計画上の留意点

(1) 施設畑でのかんがいの特徴

施設畑とは一般に園芸用ガラス室、ハウス（塩化ビニルフィルム、ポリエチレンフィルム、硬質プラスチックフィルム、硬質プラスチック板等のガラス以外のもので被覆された施設）等の施設で、降雨を完全に遮断し、土壌水分等の環境を人為的に制御し、閉鎖された立地空間としての畑を指す。ただし、降雨がうね間から横方向に浸潤することのできるトンネル・マルチのタイプは含まれない。

我が国における園芸用ガラス室、ハウス等は表-11.1 のとおり、昭和 40 年から平成元年頃にかけて急速に増加してきている。

施設畑でのかんがいの特徴を挙げると、① 施設畑では降雨を遮断して作物栽培を行うため、降雨を有効に利用することが難しく、このため水分補給としての用水が露地畑と比較して多量に必要であること、② ハウス内は特殊な気象環境下にあるため、作物の正常な生育を保証し、高品質・高収量を得るためのきめ細かな水分管理が必要であること、③ 施設畑では土壌の塩類集積や連作による生育障害の発生防止に多量の栽培管理のための用水が必要であること、などが露地畑と異なる点である。

表-11.1 園芸用ガラス室・ハウス等の設置実面積の推移

（単位：ha）

施設別	昭和 40 年	昭和 44 年	昭和 48 年	昭和 52 年	昭和 56 年	昭和 60 年	平成元年	平成 5 年	平成 9 年
ガラス室	520	724	1,035	1,285	1,698	1,891	2,074	2,178	2,264
ハウス	4,472	10,613	20,096	24,963	32,590	37,196	42,807	47,503	50,307
小計	4,992	11,337	21,131	26,248	34,288	39,087	44,881	49,681	52,571
雨よけ施設						7,419	10,156	11,887	12,948
合計	4,992	11,337	21,131	26,248	34,288	46,506	55,037	61,568	65,519

施設別	平成 13 年	平成 17 年	平成 21 年	平成 24 年	平成 26 年	平成 28 年	平成 30 年	令和 2 年
ガラス室	2,255	2,262	2,039	1,889	1,658	1,663	1,595	1,870
ハウス	50,913	49,947	47,010	44,560	41,574	41,558	40,569	38,745
小計	53,168	52,209	49,049	46,449	43,232	43,220	42,164	40,615
雨よけ施設	14,256	14,194	13,538	10,927	10,587	11,214	10,383	9,610
合計	67,424	66,403	62,587	57,376	53,819	54,435	52,547	50,225

【出典】農林水産省農産局園芸作物課花き産業・施設園芸振興室：園芸用施設の設置実面積及び栽培延べ面積の推移（令和 2 年）より抜粋

(2) 計画上の留意点

施設栽培では一般的に根群域が浅く、また根の吸水部位は比較的浅い部分となるため、土壌水分が不足すれば作物は生育障害を受けやすい。したがって露地畑と比較して、よりきめ細かなかんがいが必要になる。一般に露地畑では、有効土層の水分保持機能が強く全容易有効水分量

(TRAM) が大きければ降雨の有効化の可能性が大きくなる。また、間断日数の長短によっても降雨の有効化率が異なり計画用水量にも波及し、水源水量の増減にもつながる。しかし、降雨を遮断した施設畑では全容易有効水分量 (TRAM) が大きくてもそのような効果はなく、間断日数の長短は計画用水量の多少には波及しない。

11.2 計画日消費水量

(1) 計画日消費水量の算定方法

露地畑、施設畑にかかわらず、作物の正常な生育を保証するためには、作物がその蒸散速度に見合った水分量を速やかに吸収できるように用水計画を立てなければならない。そのため、施設畑における用水計画の考え方も基本的には露地畑と同じであり、計画日消費水量の決定方法は露地畑に準ずればよい。このとき、実測法を用いる場合は露地畑と同じであるが、ペンマン法を用いる場合には、ペンマン式による蒸発位 (E_p) の計算方法等に露地畑との違いがあり注意が必要である。

図-11.1 に、施設畑におけるペンマン法を用いた算定手法の手順を示す。

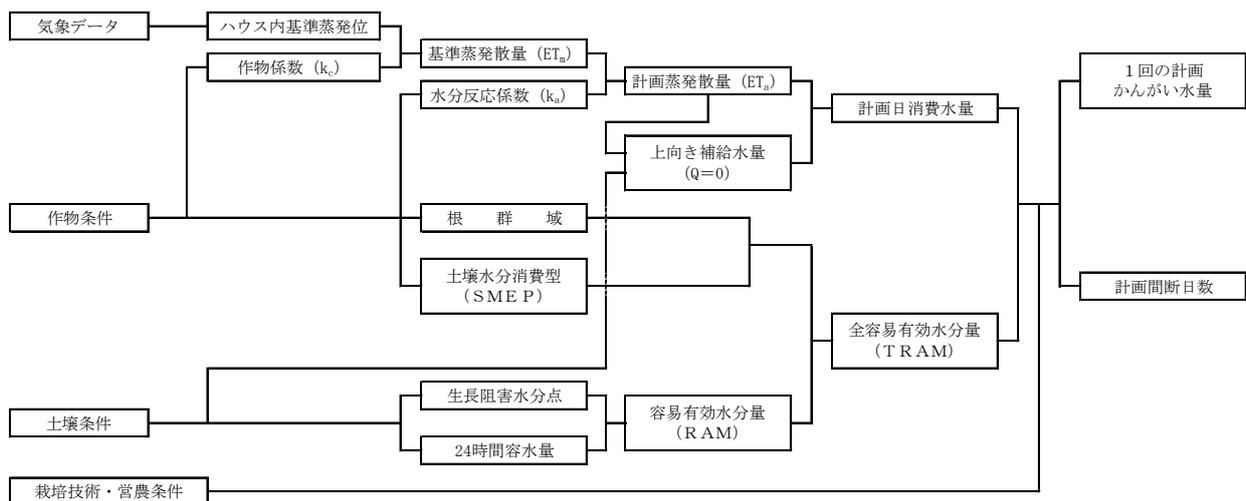


図-11.1 施設畑における蒸発散量をペンマン法により求める場合の計画日消費水量等の算定手順

(2) ペンマン式による蒸発位の計算

ペンマン式によるハウス内の蒸発位の計算は、ハウス内の気象が露地とは異なるため、ペンマン式に代入する気象要素はハウス内の値を用いなければならない。そこで、外部の気象データを補正して、ハウス内の気象条件を推定し、以下に述べる方法で計算するものとする。

ア. ハウス内気象の蒸発位に及ぼす影響

ハウス内気象が蒸発位に及ぼす影響をまとめると表-11.2 のようになる。

表-11.2 ハウス内気象が蒸発位に及ぼす影響

ハウス内の気象環境を戸外と比較すると	蒸発位への影響
純放射：減少 (日射が 2~5 割減)	減 少
気 温：日中高温 (+冬季の暖房)	増 加
風 速：微弱	減 少
湿 度：高湿	減 少

イ. ハウス内気象データの推測方法

ハウス内の放射環境は施設の形態と被覆資材の透光率、気温は換気率と暖房設定温度、風速と湿度は主として換気率により影響を受けている。詳しく見ると放射環境についてはハウスの形態や被覆資材の種類、被覆が一重か二重か、二重被覆の昼間の一重化、被覆の汚れによる透過率の低下、日射の入射角度（季節）の違いによる透過率の変化等の影響を受けている。ハウス内気温については、作物による設定温度の違いと換気の程度により、湿度や風速についても被覆の開閉度や換気の程度により大きく影響を受ける。さらに、被覆の開閉や換気率等は一日の中でも変化する。

ハウス内気象環境を正確に推定するには、これらを考慮する必要があるが、得られる値のペンマン蒸発位の中での重みを考えればハウス内の気象データの推定は表-11.3 のような方法で推定すればよい。

表-11.3 ハウス内の気象データの推定

純放射：	吸収短波放射（日射の透過率、70%）					
気温：	1、2月	3、12月	4、11月	5、10月	6、9月	7、8月
	外気温+15℃	外気温+12℃	外気温+ 8℃	外気温+ 5℃	外気温+ 3℃	外気温+ 1℃
風速：	露地の15%					
湿度：	飽差が露地に等しい※（飽差：飽和水蒸気圧と実際の水蒸気圧の差）					

※加温すると等しくならない場合があるため留意する必要がある。

なお、表-11.3 は全国一律かつ加温の有無を区別しない推定方法であり、実際の気象条件とは若干異なる。このため、ハウス内の気象データを実測可能な場合は、実測の気象データを用いることが望ましい。参考として、実測した気象データの例を表-11.4 及び表-11.5 に示す。

表-11.4 ハウス内の実測気象データの例（加温なし・和歌山県）

	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月
日射の透過率	—	—	—	—	—	59%	57%	57%	56%	57%	60%	—
気温	外気温 +1.8℃	外気温 +1.6℃	外気温 +2.1℃	外気温 +2.8℃	外気温 +2.9℃	外気温 +2.9℃	外気温 +3.4℃	外気温 +3.3℃	外気温 +6.4℃	外気温 +2.8℃	外気温 +3.1℃	—
湿度 (飽差)	-1.2hPa	-1.6hPa	0	-0.5hPa	0.1hPa	-0.8hPa	-0.5hPa	-0.6hPa	1.5hPa	-1.4hPa	0.1hPa	—

※1

※1 ハウス内実測飽差—気象台データの飽差

出典) 農林水産省農村振興局整備部設計課：令和4年度計画基礎諸元調査報告書

表-11.5 ハウス内の実測気象データの例（加温あり・熊本県）

※1	9月	10月 (加温)	11月 (加温)	12月 (加温)	1月 (加温)	2月	3月 (加温)	4月	5月	6月	7、8月
日射の透過率	61%	68%	65%	61%	67%	—	64%	66%	72%	74%	—
気温	外気温 +1.8℃	外気温 +1.1℃	外気温 +3.2℃	外気温 +8.4℃	外気温 +10.1℃	—	外気温 +5.9℃	外気温 +4.3℃	外気温 +1.9℃	外気温 +0.8℃	—
風速※2	0.14m/s (露地の11%)	0.14m/s (露地の11%)	0.19m/s (露地の19%)	0.19m/s (露地の18%)	0.20m/s (露地の18%)	—	0.18m/s (露地の14%)	0.18m/s (露地の11%)	0.18m/s (露地の12%)	0.19m/s (露地の14%)	—
湿度 (飽差)	2.8hPa	-1.5hPa	-2.8hPa	-1.3hPa	-0.4hPa	—	5.6hPa	0.3hPa	-1.2hPa	-1.2hPa	—
※3											

※1 9、4、5、6月は非加温

※2 加温した月はハウス内のファン及び換気時のハウス内の月平均風速、非加温の月は換気時のハウス内の月平均風速を示している。また、ハウス内の風速（2mでの風速）と近隣の気象台データ（2mでの風速）との比率を%で示している。

※3 ハウス内実測飽差—気象台データの飽差

出典）農林水産省農村振興局整備部設計課：令和4年度計画基礎諸元調査報告書

ウ. ハウス内蒸発位に適用する時のペンマン式の計算プログラムの修正

ペンマン式の計算プログラム例（表-8.3）では、気象データをファイルから読み出した後、以下の行を挿入又は該当行を次のように修正すればよい。

純放射：

$$S(I) = (1 - \text{ALBEDO}) \cdot \text{QA}(I) \cdot (0.18 + 0.55 \cdot \text{N}(I) / \text{NN}(I)) \cdot 0.7$$

気温：

```
IF MONTH=1 OR MONTH=2 THEN T(I)=T(I)+15
IF MONTH=3 OR MONTH=12 THEN T(I)=T(I)+12
IF MONTH=4 OR MONTH=11 THEN T(I)=T(I)+8
IF MONTH=5 OR MONTH=10 THEN T(I)=T(I)+5
IF MONTH=6 OR MONTH=9 THEN T(I)=T(I)+3
IF MONTH=7 OR MONTH=8 THEN T(I)=T(I)+1
```

風速：

$$U2(I) = U2(I) \cdot 0.15$$

湿度：

340行の気温T(I)を外気温とする。

エ. ハウス内外気象データで計算した蒸発位の比較

岡山地方気象台の1985年の月平均データを用いて、ハウス内の気象を気象台の値から、前述の方法で推定し計算した値と元データで求めた値を比較し、図-11.2に示す。

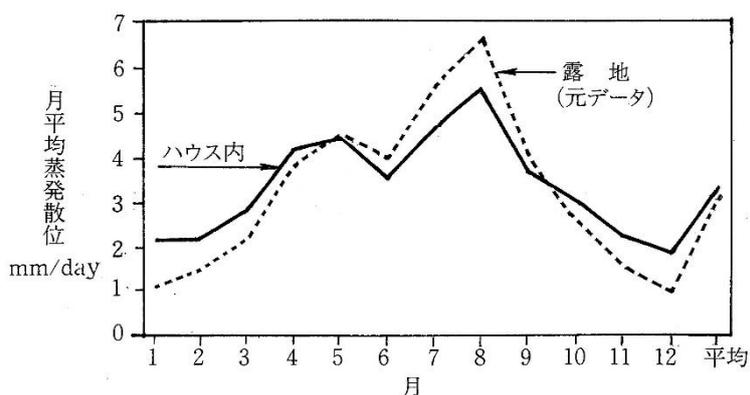


図-11.2 月平均ペンマン蒸発位のハウス内外比較 (1985年岡山)

[設定条件]

気 温：1、2月 3、12月 4、11月 5、10月 6、9月 7、8月
 外気温+15℃ 外気温+12℃ 外気温+8℃ 外気温+5℃ 外気温+3℃ 外気温+1℃

湿 度：ESA (I) を計算する際の T (I) を外気温とする。

風 速：戸外の 15%

純放射 = $(1 - \text{ALBEDO}) \times \text{日射} \times \text{透過率}$ (=吸収短波放射)、(透過率=70%)

ALBEDO=0.06

ハウス内の試算と元データによる計算結果(ハウス外)の比較をまとめると次のようになる。

蒸発位は	夏	ハウス内 <	ハウス外
	春・秋	ハウス内 =	ハウス外
	冬	ハウス内 >	ハウス外

すなわち上記のような設定条件では、ハウス内蒸発位は、夏期にはハウス外の内数で、冬期には若干ハウス外より大きくなる。

(3) 基準蒸発散量 (ET_m) の算定

(露地畑に準じる)

(4) 計画蒸発散量 (ET_a) の算定

(露地畑に準じる)

(5) 計画日消費水量の算定

ア. 上向き補給水量 (Q)

上向き補給水量 (Q) の水源は根群域下層に浸透した降雨か地下水である。露地畑では多量の降雨が下層に供給されるが、施設畑では降雨が完全に遮断されるので根群域下層の有効土層の水分は枯渇する。このため、上向き補給水 (Q) はほとんど期待できない。地下水位も 2m より深くなれば毛管上昇量は極端に小さくなる。少量頻繁かんがい、間断かんがいを行った場合、かんがい水はいったん根群域外に流出することもあるが、図-11.3 に示すようにその大部分は根群域が乾燥するにつれ再び表層に移動し有効化する。施設畑の土壌中ではこうした規則的な水分移動が繰り返されている。

また、降雨時にハウス外壁面を伝って流下する水や、密閉したハウスの内壁面に凝結し流下

する還流水は、側方からの補給水として一部有効化するが量的には僅かである。よって、施設畑の用水計画では上向き補給水量（ Q ）は期待しないものとする。

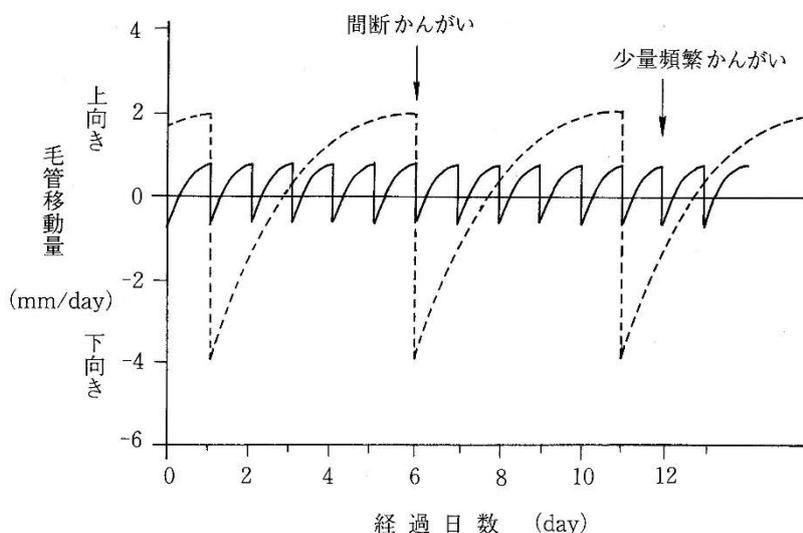


図-11.3 施設畑における一般的なかんがいと根群域下端の毛管移動

イ. 計画日消費水量

計画日消費水量は次の式で算定する。

$$\text{計画日消費水量} = \text{計画蒸発散量} (ET_a) - \text{上向き補給水量} (Q) \quad (\text{mm/day})$$

ただし、上向き補給水量はゼロとする。

11.3 間断日数と1回のかんがい水量

(1) 全容易有効水分量（TRAM）

ア. 容易有効水分量（RAM）

24時間容水量と生長阻害水分点の水分量の差が容易有効水分量（RAM）である。露地畑では、生長阻害水分点として $pF3.0$ が定着しているが、施設畑の用水利用実態では、土壌水分張力が $pF2.0 \sim 2.5$ に達した時にかんがいが行われている例が多い。

その理由としては、① 施設内の気象環境が好ましい条件下に制御されるため、作物の伸長速度が速いこと、② 集約多肥栽培を実施していることから、土壌の塩類濃度が高くなり、高品質を要求される作物では生育が阻害されること、③ 栽培密度が高いため土壌水分の消費が激しく、また、根群域が狭く浅いため土壌の乾燥が速いこと、などが挙げられる。

したがって、施設畑の用水計画では、 $pF2.0 \sim 2.5$ の範囲を生長阻害水分点としてよいが、具体的な値は現地の実情に適応したものを試験研究機関等の協力を得て選定する。なお、この場合、技術書「10. マイクロかんがいにおける計画日消費水量等の決定」の項で述べた好水分作物係数（ C_r ）の導入等も考慮することができる。

土壌の容易有効水分量（RAM）は、その値が大きいほど土壌水分保持機能が高いことを示す。したがって、露地畑では降雨の有効化の可能性が高まり、その有効化率は計画用水量に關与する。しかし、降雨を遮断した施設畑では容易有効水分量（RAM）の多少は間断日数の長短には關係するが計画用水量には關与しない。

イ. 全容易有効水分量（TRAM）

全容易有効水分量（TRAM）の算出に当たっては、制限土層の厚さ、容易有効水分量（RAM）及び制限土層における土壌水分の消費割合（SMEP）を明らかにする必要がある。制限土層は施設畑の地床栽培では根の吸水部位が比較的浅い部分に集中する傾向があるため、表層 10～15cm の土層としてよいが、具体的な値は現地の実状に適応したものを試験研究機関等の協力を得て選定する。なお、揚げ床栽培ではその厚さを根群域とするとともに制限土層とする。制限土層における土壌水分の消費割合（SMEP）は 100%としてよい。

全容易有効水分量（TRAM）は露地畑と同様に次の式（11.1）により算出する。

$$\text{全容易有効水分量 TRAM} = (f_c - M_L) \cdot D \cdot \frac{1}{C_p} \quad (\text{mm}) \quad \dots \dots \dots (11.1)$$

ここで、

- f_c : 制限土層の 24 時間容水量（体積含水率、%）
- M_L : 制限土層の生長阻害水分点（体積含水率、%）
- D : 制限土層の厚さ（mm）
- C_p : 制限土層における土壌水分の消費割合（%）

ペンマン式を用いた推定法で計画日消費水量を算定する場合は、根群域における全有効水分量（TAM）に対する全容易有効水分量（TRAM）の割合（TRAM/TAM）として、測定データの平均値である 70%を用いてもよい。

施設畑では、根の吸水部位が比較的浅い部分に集中するため土壌水分の消費は、表層消費型となる場合が多く、制限土層の消費割合が大きい。また施設畑では、生長阻害水分点を pF3.0 より小さな値とするため、制限土層の容易有効水分量（RAM）が少なくなり、さらに根群域は浅いため結果として、露地畑と比較して、施設畑の全容易有効水分量（TRAM）は小さな値となる。

この場合、技術書「10. マイクロかんがいにおける計画日消費水量等の決定」の 10.4(1)のマイクロ全容易有効水分量（MTRAM）の式を利用して全容易有効水分量（TRAM）を計算することができる。なお、部分かんがいの場合には、全面換算仮想 TRAM（CTRAM）まで計算を進める。

(2) 間断日数と 1 回のかんがい水量

ア. 計画間断日数と 1 回の計画かんがい水量

露地畑と比較して、施設畑においては、全容易有効水分量（TRAM）は小さな値となるため、その値を作物の計画日消費水量で除した計画間断日数も短くなる。計画間断日数に計画日消費水量を乗じたものを 1 回のかんがい水量とする。この値が 1 回のかんがい水量の理論的な最大値である。

イ. 間断日数の長短による 1 回のかんがい水量の修正

計画間断日数とその理論的な最大値であり、理論的には間断日数を計画間断日数以内の任意の日数に設定したとしても施設容量を超過することはない。

施設畑の用水利用実態では、作物によっては毎日かんがいされる例も多く、間断日数は計画間断日数より極端に短い。このような実態を考慮して、施設畑での間断日数は 1 日から計画間

断日数までの任意の日数とし、計画間断日数より短縮した間断日数に計画日消費水量を乗じて、1回のかんがい水量とする。

施設畑での用水利用実態では、間断日数は6日以内であり1回のかんがい水量は12mm以下の場合が最も多い。間断日数及び1回のかんがい水量の最大値としてこれらの値を参考にすることができる。

11.4 栽培管理のための用水

施設畑での栽培管理に必要となる用水には、播種・定植・連作障害防止（陽熱処理・除塩）等のための用水がある。

播種・定植のための用水は露地畑のように降雨が期待できないので、必ず確保しなければならない用水である。その水量は土壌、栽培作物によって多少異なるが、50～80mm程度の値で栽培期間中の総使用水量の15～35%の範囲を占めている。

このほか、施設畑では特に連作障害防止（陽熱処理・除塩）等のための用水が必要とされ、その水量は、ほぼ250～400mm/年に相当している。このように、栽培管理に使用される用水は、施設畑においては相当量を見込む必要がある。

11.5 施設容量の検討

施設畑では降雨日でもかんがいが行われ、間断日数が極端に短く、かんがい時間は午前あるいは午後の短時間に集中する。これらは、ファームポンド等の施設容量に大きく関係してくる。一つのファームポンド掛かりに施設畑がかなりの面積割合で存在する地区及び施設畑の増加が見込まれる地区では、施設容量の検討が必要になる。

参考文献

■ 農林水産省構造改善局資源課：平成5～7年度 計画基準改定調査（施設畑用水計画調査）報告書