畑地灌漑における日消費水量に関する研究

研究予算：運営費交付金
研究期間：令 4～令 5
担当チーム：資源保全チーム
研究担当者：奥田涼太、長竹新、
中山博敬、松田俊之
佐藤善文

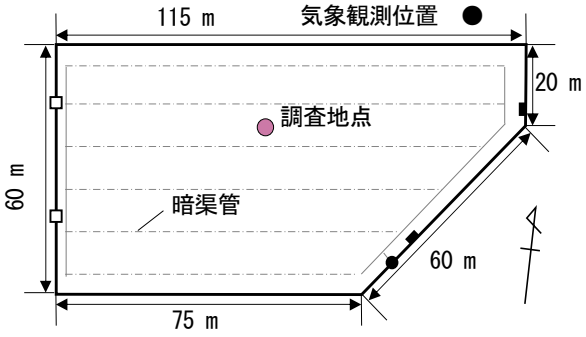
【要旨】
メッシュ農業気象データの畑地灌漑用水計画への適用可能性の検討を目的とし、メッシュ農業気象データと FAO ペンマン・モンティース式から推定した日消費水量と、土壌水分減少法により実測した日消費水量とを比較した。メッシュ農業気象データは実測の気象データとおおむね一致し、日消費水量の推定に用いるのに十分な精度を持つことが確認された。推定した日消費水量は実測値とおおむね一致する年としない年があった。その要因として FAO ペンマン・モンティース式で用いる作物係数やアルベドが、作物生育の年次変動に対応しきれていない可能性が考えられた。
キーワード：用水再編、メッシュ農業気象データ、日消費水量、ペンマン・モンティース法

１．はじめに

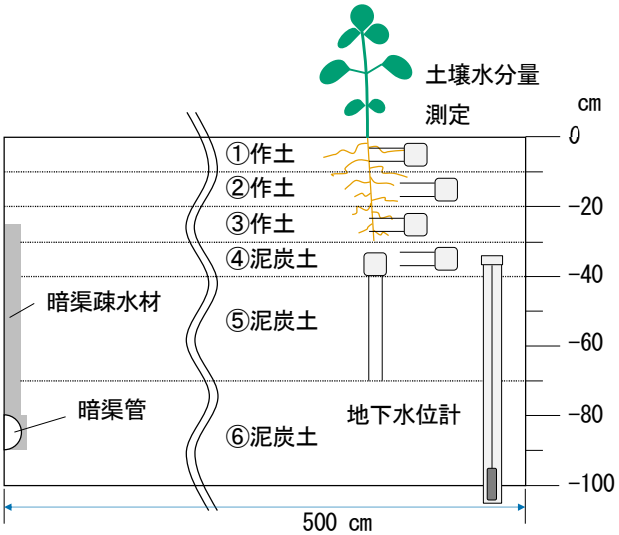
食料・農業・農村基本計画、土地改良長期計画では「高収益作物への転換、産地形成を通じた産地収益力の向上」が政策目標の一つとして挙げられており、畑地灌漑施設をはじめとする農業生産基盤の整備を推進している。しかし、近年の地球温暖化の影響と考えられる降水量の変化や高収益作物の導入による営農の変化など、水需要を取り巻く状況が変化する一方で、ダム等の新設による新たな水資源の確保は困難となっている。このため、営農の変化に対応する用水再編や気候変動による水資源逼迫への懸念に備え、精度良い用水計画の樹立が望まれる。

これまで、畑地灌漑の用水計画をたてるもととなる日消費水量は、実測値をもとに設定されてきたため労力や予算上の制約から調査点数が限られてきた。一方、農研機構が「メッシュ農業気象データ」[1]を 2016 年より外部に提供しており、推定値ではあるが、日射量や相対湿度等のアメダスでは入手できない 1 km メッシュ間隔での気象データを入手することが可能となった。この「メッシュ農業気象データ」を用いて精度の良い日消費水量を算出することが可能となれば、効率的でよりきめ細やかな用水計画をたてることができると考えられるが、事業計画上の畑地灌漑用水計画に適用する上で問題がないか検証することが必要である。

本研究では、メッシュ農業気象データを用いて算出した日消費水量の畑地灌漑用水計画への適用可能性の検討を目的とした。



図－1　調査圃場概要図



図－2　調査地点断面概要図

２．現地調査

調査は北海道新篠津村の圃場の暗渠から水平方向に 5 m 離れた地点で行った（**図−1**）。2022、2023 年ともに 5/15 に大豆の播種が行われた。2022/10/3 に測定地点付近で 100 cm 深までの断面調査を行った（**図−2**）。0～13、13～20 cm は作土層、20～30 cm は硬盤層、30～54、54～73、73～100 cm は泥炭土層であった。0～30 cm の土性は、0～10 cm が埴壌土（CL : Clay Loam）、10~20、20~30 cm は軽埴土（LiC : Light Clay）であった。0～10、10～20、20～30、40～70 cm 深に土壌水分センサを設置し、2022/6/10～10/3、2023/6/16～9/19 に土壌水分量を 30 分間間隔で連続測定した。圃場端に日射計、風速計、温湿度計、雨量計を設置した。2022 年の測定期間は、日射が測定なし、風速が 7/30～11/30、温湿度が 9/17～11/30、降雨量が 6/15～10/6 である。2023 年の測定期間は、日射が 9/9～9/20、風速が 6/22～9/19、温湿度が 5/18～10/31、降雨量が 5/13～10/31 である。

３．日消費水量の計算

３．１　土壌水分減少法

土層を 0～10、10～20、20～30、40～70 cm に分け、5 mm 以上の降雨があった日の 1 日後から、次に 5 mm 以上の降雨がある日までに減少した水分量を期間中の蒸発散量（mm）とした。これを日数で割ることで日蒸発散量（＝日消費水量）$ET_{\mathrm{obs.}}$（mm day^{-1}）を計算した。以降、土壌水分減少法で求めた日消費水量を実測値、以下の FAO ペンマン･モンティース法で求めた日消費水量を推定値とする。

３．２　FAO ペンマン・モンティース法

2022/6/1～11/30、2023/5/12～10/31 における圃場の農研機構メッシュ農業気象データ（The Agro-Meteorological Grid Square Data, NARO）[1) 2)]（大野ら、2016）（https://amu.rd.naro.go.jp/）をダウンロードした。

メッシュ農業気象データから全天日射量R_{s}（MJ m day^{-1}）、高度z（m）における風速u_z（m s^{-1}）、相対湿度RH（%）の日平均値と、日平均気温T（℃）、日最高気温T_{max}（℃）、日最低気温T_{min}（℃）の日平均データが得られる。これらの値をFAOペンマン・モンティースの式[3)]（式(1)）に代入し、基準蒸発散位ET_0（mm day^{-1}）を求めた。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta\left(R_{\mathrm{n}} - G_{\mathrm{day}}\right) + \gamma\dfrac{900}{T+273}u_2(e_{\mathrm{s}} - e_{\mathrm{a}})}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

ここで、Δは蒸気圧曲線の傾き（kPa ℃$^{-1}$）、R_{n}は作物表面における純放射量（MJ m day^{-1}）、G_{day}は1日の土中熱フラックス、Tは日平均気温（℃）、u_2は2 m高における風速（m s^{-1}）、e_{s}は飽和水蒸気圧（kPa）、e_{a}は実水蒸気圧（kPa）である。蒸気圧曲線の傾きΔの計算には式(2)を用いた。

$$\Delta = \frac{4098\left[0.6108\exp\left(\dfrac{17.27T}{T+237.3}\right)\right]}{(T+237.3)^2} \quad (2)$$

純放射R_{n}は純短波放射R_{ns}（MJ m day^{-1}）と純長波放射R_{nl}（MJ m day^{-1}）の和で表される。

$$R_{\mathrm{n}} = R_{\mathrm{ns}} + R_{\mathrm{nl}} \quad (3)$$

純短波放射R_{ns}は式(4)から求めた。

$$R_{\mathrm{ns}} = (1-\alpha)R_{\mathrm{s}} \quad (4)$$

ここで、αは作物群落反射率（-）で今回実測をしていないため、仮想作物の値として与えられている0.23を用いた。純長波放射R_{nl}は式(5)、(6)から求めた。

$$R_{\mathrm{nl}} = \sigma\left[\frac{T_{\mathrm{max,K}}^4 + T_{\mathrm{min,K}}^4}{2}\right]\left(0.34 - 0.14\sqrt{e_{\mathrm{a}}}\right)\left(1.35\frac{R_{\mathrm{s}}}{R_{\mathrm{s0}}} - 0.35\right) \quad (5)$$

$$R_{\mathrm{s0}} = (0.75 + 2\times10^{-5}z)R_{\mathrm{a}} \quad (6)$$

ここで、σはステファン-ボルツマン定数（4.903 10^{-9} MJ K^{-4} m^{-2} day^{-1}）、$T_{\mathrm{max,K}}$は日最高気温（K=℃+273.16）、$T_{\mathrm{min,K}}$は日最低気温（K = ℃ + 273.16）、R_{s}は全天日射量（MJ m day^{-1}）、R_{s0}は晴天日射量（MJ m day^{-1}）、$R_{\mathrm{s}}/R_{\mathrm{s0}}$は短波放射比で 1.0 以下になるように制限する必要がある。地球外放射R_{a}は式(7)～(10)から推定した。

$$R_{\mathrm{a}} = \frac{24(60)}{\pi}\mathrm{G_{sc}}\mathrm{d_r}[\omega_{\mathrm{s}}\sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\sin\omega_{\mathrm{s}}] \quad (7)$$

$$\mathrm{d_r} = 1 + 0.33\cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad (8)$$

$$\omega_{\mathrm{s}} = \arccos(-\tan\varphi\tan\delta) \quad (9)$$

$$\delta = 0.409\sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right) \quad (10)$$

$\mathrm{G_{sc}}$は太陽定数（0.0820 MJ m^{-2} min^{-1}）、$\mathrm{d_r}$は太陽と地球の逆相対距離、Jはその年の1月1日を1とした日付の通し番号（1～366）、ω_{s}は日没時の角度、δは太陽偏角で太陽光線と地球の赤道との間の角度（rad）である。

1日の土中熱フラックスG_{day}は小さく無視できると仮定した。

$$G_{\mathrm{day}} \approx 0 \quad (11)$$

大気圧P（kPa）を式(12)から推定し、乾湿計定数γを式(13)から求めた。

$$P = 101.3\left(\frac{293 - 0.0065z_{\mathrm{asl}}}{293}\right)^{5.26} \quad (12)$$

$$\gamma = 0.665 \times 10^{-3}P \quad (13)$$

ここで、z_{asl}は標高（m）で地理院地図から入手可能である。Pは大気圧（kPa）である。

近くのアメダスである月形、新篠津の風速計設置高さはどちらも10 mであったため、メッシュ農業気象データから高度10 mにおける風速が得られたと判断した。以下の式(14)を用いて高度2 m相当の風速に変換した。

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (14)$$

飽和水蒸気圧は温度と非線形の関係にある（式(15)）。そのため、式(15)と日平均気温から飽和水蒸気圧e_{s}を求めるのではなく、日最高気温と日最低気温から計算した飽和水蒸気圧の平均値をe_{s}とした（式(16)）。

$$e^{\mathrm{o}}(T) = 0.6108\exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \quad (15)$$

$$e_{\mathrm{s}} = \frac{e^{\mathrm{o}}(T_{\max}) + e^{\mathrm{o}}(T_{\min})}{2} \quad (16)$$

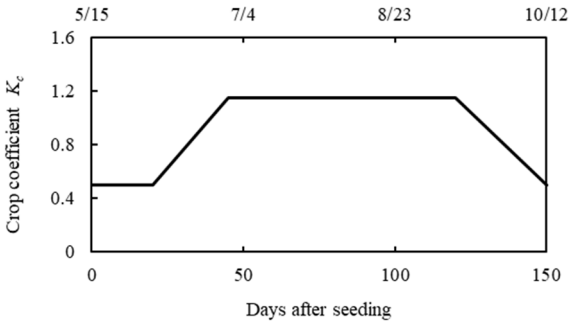
水蒸気圧e_{a}は式(17)から求めた。

$$e_{\mathrm{a}} = \frac{RH}{100}e^{\mathrm{o}}(T) \quad (17)$$

FAOペンマン・モンティース法より求めた基準蒸発散量ET_0（mm）に作物係数K_{c}を乗じ、上向き補給水量Q（mm）を差し引いたものを日消費水量$ET_{\mathrm{est.}}$（mm）とした（式(18)）。

$$ET_{\mathrm{est.}} = ET_0 \times K_{\mathrm{c}} - Q \quad (18)$$

ここで、作物係数K_{c}はFAOペンマン・モンティース法における大豆デフォルト値[3]を採用した。具体的には、播種から20、45、120、150日目におけるK_{c}をそれぞれ0.5、1.15、1.15、0.5とし、それぞれの間の期間は線形補完した値を与えた（**図－3**）。また、土地改良計画基準の技術書[4]（以下、技術書）では上向き補給水量は土性によって定められるが（**表－1**）、泥炭土の上向き補給水量は記載されていない。泥炭土の水分移動特性は、SandやClayよりもLoamに近いと考え、技術書に記載されている土性1、土性2の2種類を適用して計算した。



図－3　大豆の作物係数

表－1　技術書記載の土性区分

土性区分	主な土性（国際法による粒径区分）
1	SL, L, SiL
2	SCL, CL, SiCL
3	SC, LiC, SiC, HC
4	S, LS

4．結果と考察

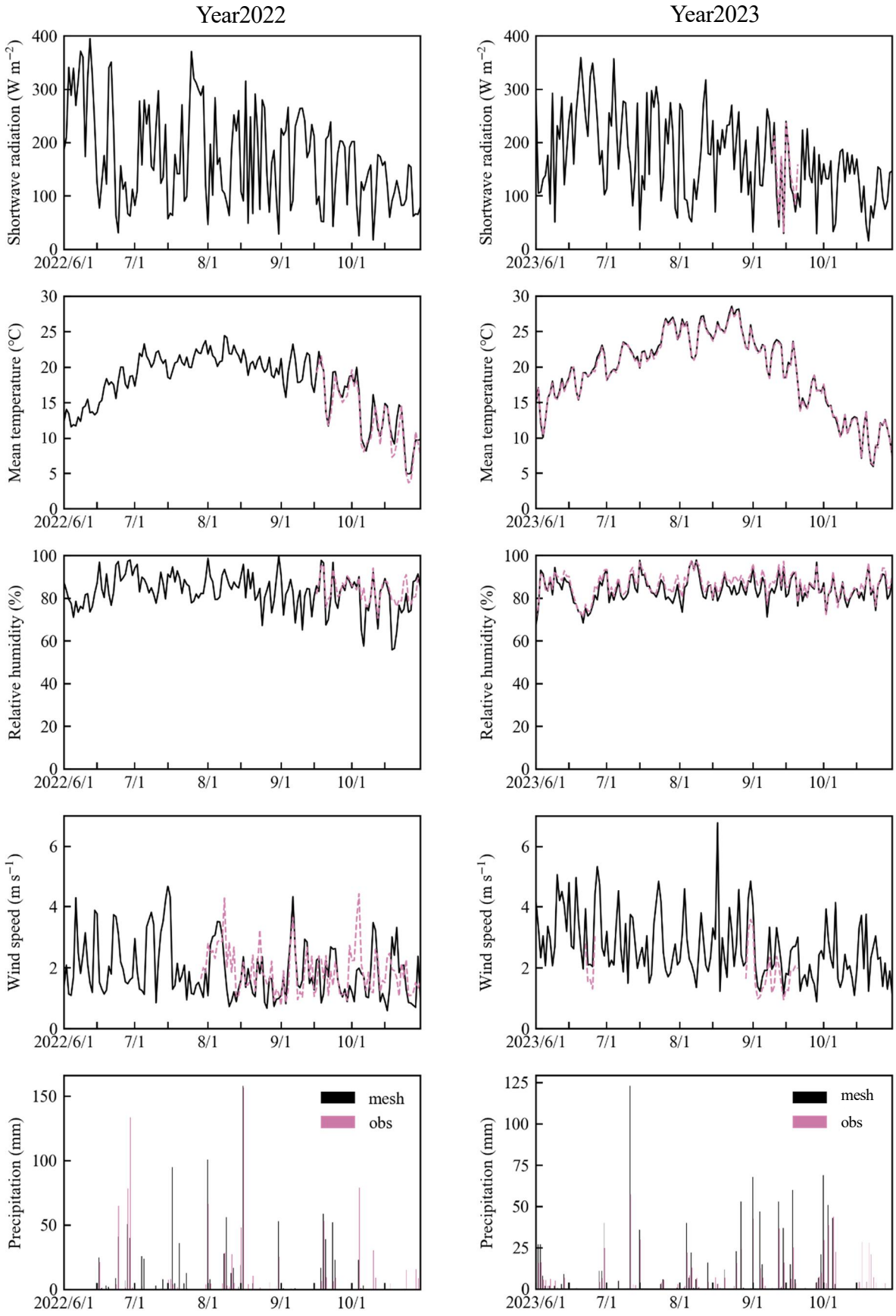
4．1　メッシュ農業気象データの精度

図－4に日射量（短波放射）、気温、湿度、風速、降雨量の日平均値の経時変化を示す。測定期間に表示がないデータは機器等のトラブルによる欠損値である。いずれの測定項目でもメッシュ農業気象データと実測値の増減傾向が一致した。降水量については、メッシュ農業気象データと実測で降雨の有無が一致しないこともあった。例えば、2022/7/17や2022/8/9では実測値は95、56 mmだったが、メッシュ農業気象データでは4、3 mmだった。降水量については日消費水量の計算に直接は関係しないが、連続干天期間を決定するためにも現地での測定が必要だと考えられる。

メッシュ農業気象データと測定値を{切片}=0で直線回帰した時の回帰係数と決定係数を**表－2**に示す。回帰係数は、2022年の風速を除きかなり1に近く、高い相関があった。決定係数については、2022年の相対湿度と風速を除いて1に近かった。相対湿度と風速は傾きで説明できないばらつきが大きかったといえる。2022年度の相対湿度および風速のメッシュ農業気象

表－2　メッシュ農業気象データと実測値との回帰係数と決定係数

	回帰係数		決定係数	
	2022年	2023年	2022年	2023年
日射量	欠損	0.931	欠損	0.931
気温	1.06	1.02	0.942	0.999
相対湿度	0.940	0.990	0.529	0.911
風速	0.633	1.01	0.149	0.955

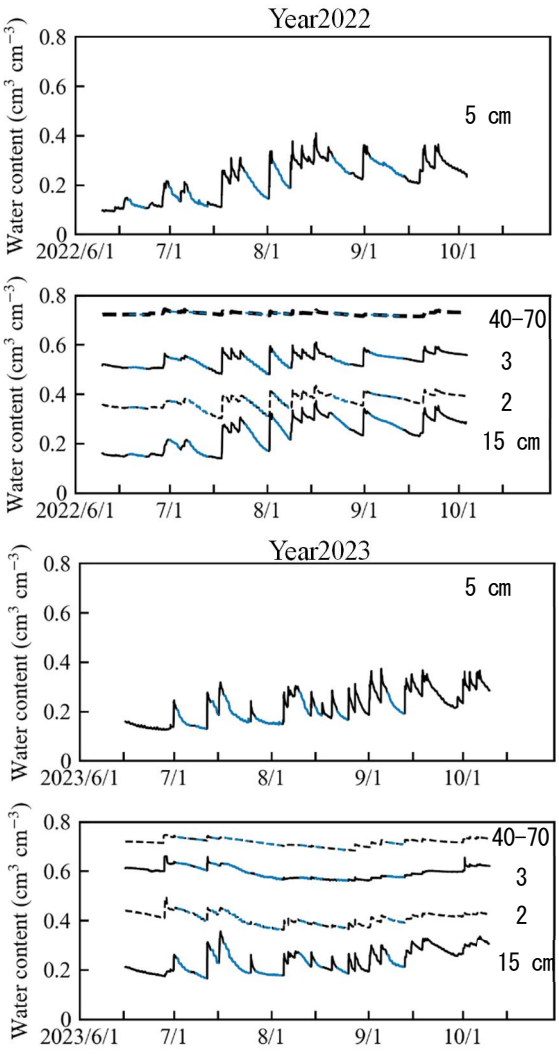


図－4　メッシュ農業気象データと気象観測値の継時変化

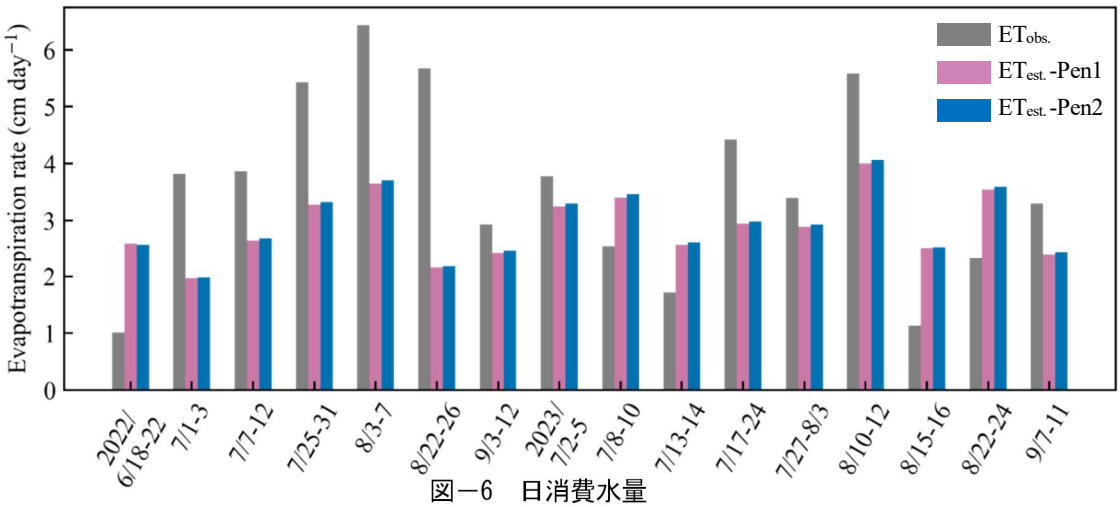
データと実測値との偏差の絶対値の最大値はそれぞれ 7.66 %、0.42 m s^{-1} だった。ここで、メッシュ農業気象データと実測値のズレがどの程度基準蒸発散量へ影響を及ぼすかを調べた。全天日射量を 15 MJ $m\,day^{-1}$、日平均気温を 25 ℃、日最高気温を 30 ℃、日最低気温を 20 ℃、相対湿度を 90 %、風速を 2 m s^{-1} の仮想の日を考える。この日に相対湿度を 50～100%の間で、風速が 0～5 m s^{-1} の間で変化させた時のET_0の平均変化率は、それぞれ-7.13×10^{-3} mm $\%^{-1}$、6.09×10^{-2} mm $(m\,s^{-1})^{-1}$ だった。このET_0の平均変化率に相対湿度および風速のメッシュ農業気象データと実測値との偏差を乗じて求まるET_0の誤差の範囲はおおよそ–0.05~～0.03 mm だと推定された。この誤差範囲は後述の日消費水量の 1% 程度であり、相対湿度および風速のメッシュ農業気象データと実測値とのズレによる日消費水量への影響は小さいと考えられた。以上から、メッシュ農業気象データの精度は FAO ペンマン・モンティース法による日消費水量の推定に用いるのに十分であると考えられる。

４．２　土壌水分量の経時変化

蒸発散、降水、地下水によって土壌水分量は推移した（**図－5**）。2022 年における 5 cm 深の土壌水分量の 6、7、8 月の平均値はそれぞれ 0.122、0.180、0.274 cm^3 cm^{-3} と増加傾向だった。大豆の成長に伴い地表面が被覆された影響だと考えられる。15 cm 深は 5 cm 深より 0.02 cm^3 cm^{-3} 程度値が小さく、5 cm 深と連動して変動した。25、35、40～70 cm 深の平均値は 0.370、0.540、0.727 cm^3 cm^{-3} だった。2023 年も同様の傾向が見られた。



図－5　土壌水分量の経時変化
青色は日消費水量の計算期間である



図－6　日消費水量

$ET_{obs.}$ は実測値であり、$ET_{est.}$-Pen1，2 はそれぞれ上向き補給水量にかかわる土性区分 1，2 を用いた推定値

４．３　メッシュ農業気象データを用いた日消費水量の推定値の精度

土壌水分減少法で求めた日消費水量の実測値とFAOペンマン・モンティース法で求めた日消費水量の推定値を図－6に示す。2022年では6/18～22を除き推定値が実測値を過小評価しており、最大3.5 mmの差があった。2023年では推定値が実測値を過大評価した期間、過小評価した期間の両方あった。2023年の実測値と推定値との偏差は–1.58～1.37の範囲だった。実測値と土性1と2の推定値に対してシャピロ・ウィルクの検定を行ったところ、いずれも正規分布に従うことが確認された。そこで、日消費水量の実測値と推定値が等しいかどうかを確かめるために、同等性マージンを 1 mm に設定して正規分布を仮定した同等性検定（信頼区間法）を行った。実測値と推定値の偏差の95%信頼区間を**表－3**に示す。全期間の結果を見ると、95%信頼区間は–1～1 mmの間に収まっておらず、実測値と推定値が同等とは言えない。1年ごとに分けて見ると、2022年では実測値と推定値が同等とは言えないが、2023年では等しいという結果になった。

４．４　メッシュ農業気象データを用いた日消費水量の推定誤差の要因

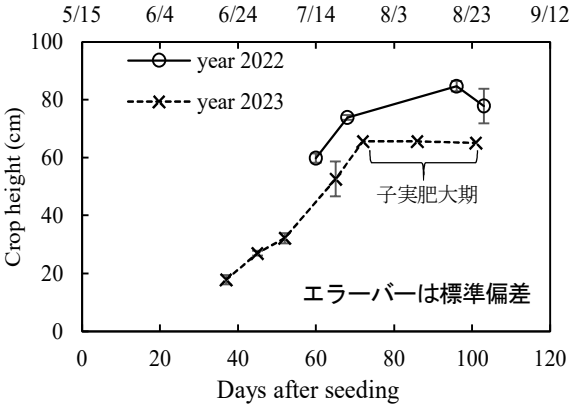
以下では2022年の推定値が実測値を過小評価した原因について考察する。一つ目に考えられる理由は、作物係数（**図－3**）が現実に即していなかったことである。播種日からの経過日数における2022年と2023年の大豆の草高を比較すると、10 cmほど2022年の方が大きかった。さらに、2022年では子実肥大期に相当し作物係数が一定値で与えられる期間においても草高が増加した（**図－7**）。また、2023年の子実肥大期を除き、日消費水量の実測値と草高との間には強い正の相関が、日消費水量の推定値と実測値との偏差と草高との間には強い負の相関があった（**図－8**）。このことから、蒸発散量の年次内変動および年次間変動に対する大豆のバイオマス量の影響が示唆された。メッシュ農業気象データによる日消費水量算定に当たっては、良好な生育条件下での実測値をもとにした作物係数の補正を行うことで、推定精度が向上すると考えられる。

二つ目は上向き補給水量の推定値が実際よりも大きかったことである。日消費水量計算期間における地下水位の平均値は、2022、2023年でそれぞれ82、80 cm深だった。2 cmの差が地下水位からの水分供給に影響を与えたとは考えにくいため、二つ目の説は棄却とした。

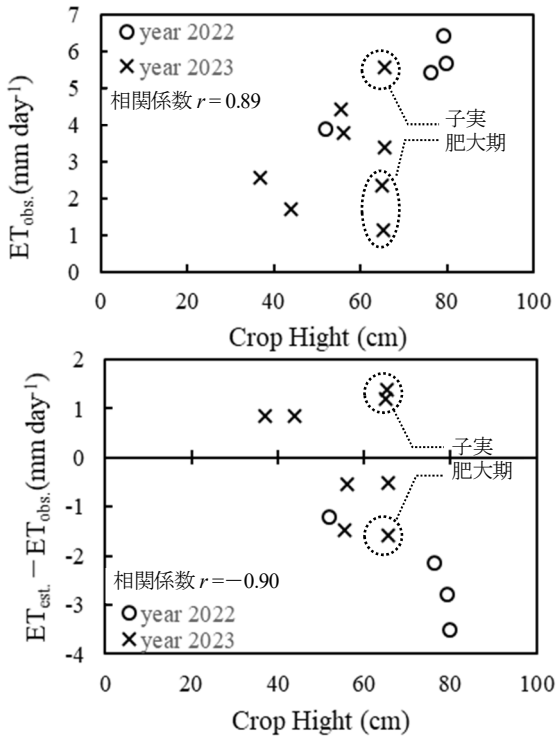
三つ目はアルベドを過大評価した可能性である。今

表－3　日消費水量の推定値と実測値との偏差の95%信頼区間

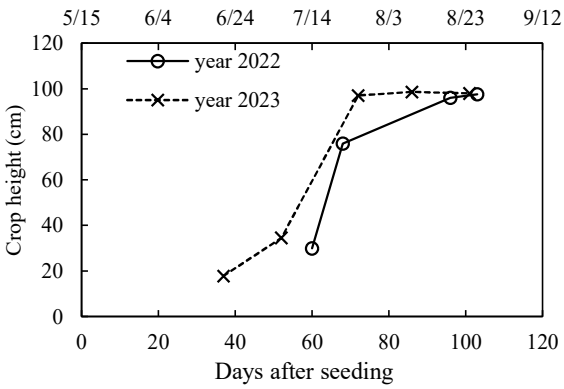
		下限	平均	上限
土性１	全期間	−0.123	0.694	1.51
	2022年	0.149	1.49	2.83
	2023年	−0.747	0.0774	0.901
土性２	全期間	−0.123	0.660	1.51
	2022年	0.149	1.49	2.83
	2023年	−0.747	0.0774	0.901



図－7　大豆の草高



図－8 大豆の草高と(a)日蒸発散量の実測値($ET_{obs.}$)および(b)　日蒸発散量の推定値と実測値との差($ET_{est.}-ET_{obs.}$)との関係
蒸発散量計算期間の草高は、草高の実測値から線形補間した値である。相関係数は2022年の子実肥大期をのぞいた期間での値である。



図－9　地表面被覆率

回大豆は畝を立てて栽培が行われ、大豆の表面被覆率は完全に成長した後も 100%ではなかった（**図－9**）。土壌のアルベドは植物よりも小さいため、圃場の平均のアルベドは 0.23 よりも小さかった可能性が考えられた。

５．まとめ

メッシュ農業気象データを用いて算出した日消費水量の畑地灌漑用水計画への適用可能性の検討を目的として、新篠津村の大豆栽培圃場において、気象観測と日消費水量の実測を 2022 年～2023 年に行った。また、同地点におけるメッシュ農業気象データの値をダウンロードした。日蒸発散量算出に使用する気象要素は、実測値とメッシュ農業気象データとでおおむね一致し、メッシュ農業気象データは FAO ペンマン・モンティース法による日消費水量の推定に用いるのに十分な精度を持つことが確認された。また、メッシュ農業気象データを FAO ペンマン・モンティース式に代入して推定した日消費水量と、土壌水分減少法により求めた日消費水量との誤差の要因として、FAO ペンマン・モンティース式で使用する作物係数やアルベドのデフォルト値が、現場の条件を反映できていない場合がある可能性が考えられた。メッシュ農業気象データによる日消費水量算定に当たっては、良好な生育条件下での実測値をもとにした作物係数やアルベドの補正を行うことで、推定精度が向上すると考えられる。

謝辞：本研究の実施にあたり、北海道新篠津村の関係農家にご協力を賜った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1) 大野宏之、佐々木華織、大原源二、中園：実況値と数値予報、平年値を組み合わせたメッシュ気温・降水量データの作成、生物と気象、16、pp.71-79、2016.
2) 佐々木華織、西森基貴、根本　学：メッシュ農業気象データ利用マニュアル Ver.5. 農研機構、2022.
3) Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration, Guide-lines for computing crop water requirements. In: FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy, 300.
4) 農林水産省：8. 計画日消費水量等の算定、土地改良事業設計基準　計画「農業用水（畑）」技術書、176－196、2015.