

ポット栽培コムギ消費水量の季節推移と 瀬戸内干拓地コムギ圃場における灌漑の要否

石川直幸・石岡巖・窪田潤・竹田博之

(近畿中国四国農業研究センター)

要旨：近年、暗渠排水と地下灌漑の機能を兼ね備えた地下水位制御システム (FOEAS) の田畑輪換圃場への導入が各地で進められているが、コムギ栽培に対する地下灌漑の効果は明らかになっていない。FAO のマニュアルによれば、コムギが良好に生育するためにはコムギ栽培期間中に 450~650 mm の水が必要とされている。瀬戸内地域 (山口県と広島県西部を除く) におけるコムギ栽培期間の降水量は 400~500 mm 程度と少ないが、コムギ栽培時に灌漑は行われていない。そこでポット栽培により、多収を得るのに必要なコムギの生育時期別の消費水量の推移を明らかにするとともに、瀬戸内干拓地のコムギ栽培圃場における灌漑の要否について考察した。ポット栽培における 1 日当たり消費水量は、播種から 2 月上旬までは約 1 mm で、その後増加して出穂期頃には約 8 mm に達した。登熟中期まで消費水量の多い状態が継続し、登熟後期に減少した。生育期間全体の消費水量は 612 mm、そのうち出穂後は 326 mm であった。本年 (2011 年 11 月~2012 年 6 月) の降水量は生育期間全体で 338 mm (平年より 77 mm 少ない)、そのうち出穂後が 72 mm (平年の半分以上) であった。供試圃場の地下水位は、無灌漑圃場では -40~-60 cm、地下灌漑圃場では -30~-50 cm 程度だった。無灌漑圃場と灌漑圃場の間には、コムギの生育や収量等に差が認められなかった。これは、灌漑しなくても地下から十分な量の水が供給されているためと考えられる。

キーワード：灌漑、コムギ、消費水量、地下水位、FOEAS。

近年、暗渠排水と地下灌漑の機能を兼ね備えた地下水位制御システム farm-oriented enhancing aquatic system (FOEAS, フォアス) が開発され (藤森 2007)、田畑輪換圃場への導入が各地で進められている (藤森・小野寺 2012)。FOEAS を導入した圃場 (以下、FOEAS 圃場と記す) でダイズを栽培する場合の地下灌漑の効果については Shimada ら (2012) が報告しているが、コムギ栽培に対しては排水効果は認められている (島田ら 2010) もの、地下灌漑の効果は明らかになっていない。FAO のマニュアルによれば、コムギが良好に生育するためにはコムギ栽培期間中に 450~650 mm の水が必要とされている (Brouwer and Heibloem 1986)。収量と蒸発散量の間には正の相関関係が認められており、例えばアメリカ合衆国テキサス州で行われた試験結果によれば、 500 g m^{-2} の収量を得るには約 620 mm の蒸発散量が必要とされる (Musick ら 1994)。瀬戸内地域においては、兵庫県、岡山県、広島県、山口県、香川県、愛媛県の 6 県のコムギ平均収量は約 280 g m^{-2} (農林水産省 2012)、同 6 県の奨励品種決定調査の 2008~2011 年産コムギ全供試品種系統平均収量は約 520 g m^{-2} (著者集計) である。瀬戸内地域 (山口県と広島県西部を除く) におけるコムギ栽培期間 (11 月下旬~5 月末) の降水量は 400~500 mm 程度と少なく、コムギ栽培時に灌漑は行われていないが、水不足のためにコムギの収量が低下したという事例はほとんど見られない。そこで地下水の影響を受けないポッ

ト栽培により、多収を得るために必要なコムギの生育時期別の消費水量の推移を明らかにするとともに、瀬戸内干拓地のコムギ栽培圃場における灌漑の要否について考察した。

材料と方法

1. ポット栽培試験

近畿中国四国農業研究センター (広島県福山市) において、 $1/5000 \text{ a}$ (0.02 m^2) の樹脂製畑作用ワグネルポット (排水口はゴム栓でふさいだ) 35 個にセンター内 FOEAS 圃場 (細粒灰色低地土の田畑輪換圃場) の土を充填し、2011 年 12 月 2 日にパン用コムギ品種「せときらら」の種子を 1 ポット当たり 7 粒播種した。土を採取した圃場は前作がダイズで、土を採取する半月前の 11 月 15 日に汚泥発酵肥料「醗酵牛ふん」を 1200 g m^{-2} 施用し、ロータリーで耕耘した。ポットに充填した土の pH (H_2O) は 6.5 であった。ポットの深さは 19.2 cm で、土の深さは 17.3 cm とした。播種後のポットは、屋根がガラスで側面が金網の網室 (軒丈 197 cm) 内に、3 月 2 日 (茎立期) までは 12 個 $\times$ 3 列 (予備のポット 1 個を含む。以下同様)、3 月 2 日以降は 18 個 $\times$ 2 列に、互いに接するように配置した。3 月中旬までは毎月 1 回、3 月下旬以降は毎週 1 回、生育の均一化を図るためポット位置をローテーションさせた。コムギ出芽後 (12 月 26 日) に間引いて 1 ポット当たり 2 個体とした。

施肥量は次のとおりである。基肥は、ポット用土を採取する半月前の11月15日に圃場で施用した汚泥発酵肥料「醗酵牛ふん」 1200 g m^{-2} 以外には施用しなかった。追肥は1ポット当たり、2月29日（茎立始期）に $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}=60\text{-}0\text{-}56\text{ mg}$ 、3月17日に $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}=40\text{-}40\text{-}40\text{ mg}$ 、4月9日（出穂期）にNのみ 140 mg 、4月25日（開花5日後）にNのみ 40 mg を施用した。4月25日の追肥は尿素水溶液（ 5.1 g L^{-1} ）の葉面散布とした。

ポットの灌水量は、出穂期の2日後（4月11日）までは全ポット平年降水量と同量を基本とし、乾燥しすぎる（pFが2.7を越えるポットがある）場合は灌水直前のpFが約2.6を維持できるように灌水量を増やした。詳細は結果に記す。出穂3日後（4月12日）以降は乾燥区、標準区、湿潤区、地下水位 -13.5 cm 区、地下水位 -8.5 cm 区の5処理区を設け、それぞれ7ポットを供試した。地下水位区以外は栓をしたまま、1日1回土壌表面に灌水した。標準区においては過半数のポットがpF 2.6を越えたら灌水することとし、1日後のpFが約2.6になるように1回当たりの灌水量を調節した。乾燥区は標準区の半量を灌水した。湿潤区はポット下部に水がたまらない範囲でできるだけ多く（ただし標準区の2倍以内）の水を灌水した。結果的に、湿潤区の灌水量は標準区の約1.8倍となった。地下水位区は $62.0\text{ cm} \times 40.6\text{ cm}$ 、深さ 11.5 cm の水槽（黄色のプラスチックコンテナ）に栓を外したポットを入れ、一定の水位（ポットの地面より 13.5 cm 下および 8.5 cm 下）になるように1日2回水槽に水を足した。

播種から3月半ばまでは土壌水分が減少したため、体積含水率（ポット用土を採取した圃場の土壌のpF-水分曲線にポットのpF値を当てはめて推定）から求めた土壌水分減少量を灌水量に加えて消費水量とした。乾燥区と湿潤区の処理開始直後についても、体積含水率から求めた土壌水分減少量（湿潤区では負の値）を灌水量に加え、消費水量とした。地下水位区の消費水量については後述する。それ以外は土壌水分の変化量が無視できる程度に小さかったため、消費水量＝灌水量とした。

生育環境に関わる調査項目として、灌水量、蒸発量、土壌水分張力（pF値）を測定した。蒸発量は出穂後のみ、それ以外は全生育期間を通じて測定した。蒸発量は2種類の方法で測定した。一つは、地下水位処理に使用した水槽と同種の水槽に同数のポット（排水穴なし）を置き、水を約 10 cm の深さまで入れ、毎日2回水深を測定して減少しただけの水を補給した。補給水量を水面からの蒸発量とした。もう一つは、コムギ栽培のポットと同様に土を充填したポットに、標準区のポットと同様にpF値を基準に灌水し、地面からの蒸発量を測定した。蒸発量測定に用いた水槽およびポットは、肉眼観察により日陰を調節し、コムギを栽培している水槽の水面およびポットの地面における日当たりに近づくよう努めた。地下水位区の消費水量は、水槽への注水量から水槽水面蒸発量を差し引いて求めた。た

だし処理開始日とその翌日（4月12～13日）は、1日当たり消費水量がその後1週間（4月14～20日）の平均値と同じと見なした。土壌水分張力は、ポット用pFメータ（大起理化学工業株式会社、DIK-8343）を用い、長さ 5 cm のポラスカップの中心が地下 10 cm になるように、各ポットに1本ずつ挿して測定した。pF測定は灌水後20時間以上経過してから行い、灌水間隔が4日以上だった2月中旬までは1回の灌水から次の灌水までの間に2回、灌水間隔が4日以下となった2月下旬以降は灌水直前に1回測定した。

コムギの生育・収量等に関わる調査項目としては、出穂期、開花期、成熟期、穂数、遅穂数、地上部全重、子実収量、粒数、千粒重、子実タンパク質含有率を測定した。出穂期および開花期は、全茎の半数が出穂または開花した日とした。成熟期は、遅穂以外の穂の緑色が消失し黄白化した日とした。その時点における子実水分は測定しなかったが、従来の知見から20～25%程度と推測される。穂数には遅穂を含まない。遅穂は、“稈長が最長稈の半分以下”、“主要な穂が成熟した時に未成熟”、“稈長が最長稈の2/3以下かつ充実不良”のいずれかに該当する穂とした。遅穂は地上部全重を測定後、脱穀せずに廃棄した。タンパク質含有率は、全窒素からの換算係数を5.70とし、近赤外分析装置（FOSS Analytical AB, Infratec1241）を用いて測定した。地上部全重、子実重、千粒重、タンパク質含有率は水分12.5%に換算した。収穫物の調査はポット単位で行い、各区7ポット中で土壌水分張力（乾燥区、標準区、湿潤区）あるいは生育（地下水位区）が平均から最も離れている1ポットを除外し、6ポットの値を用いて解析した。

2. FOEAS 圃場栽培試験

近畿中国四国農業研究センター内のFOEASを導入した細粒灰色低地土の田畑輪換圃場2枚（17世紀の干拓地、1枚 500 m^2 ）でパン用コムギ品種「せときらら」を栽培した。各圃場は $10\text{ m} \times 50\text{ m}$ で、4辺に高さ 1 m の遮水シートが地下 90 cm 、地上 10 cm に埋設されている。前作は水稻で、基肥として汚泥発酵肥料「醗酵牛ふん」を 1200 g m^{-2} 施用した。2～3月の追肥は窒素加里化成肥料を1回施用する少追肥区（ $\text{N-K}_2\text{O}=2.5\text{-}2.3\text{ g m}^{-2}$ ）と2回施用する多追肥区（合計 $\text{N-K}_2\text{O}=5.0\text{-}4.6\text{ g m}^{-2}$ ）を設けた。タンパク質含有率向上のため、全区、開花期に窒素を 3.5 g m^{-2} 施用した。播種は2011年11月25日に条間 30 cm のトラクター牽引ドリル播種機で行い、播種量は、圃場条件が良好な場合の適正範囲（ $90\text{-}180\text{ 粒 m}^{-2}$ ）の下限と上限を目標に、少播区と多播区の2区を設けた。結果的に、 1 m^2 当たり播種粒数は少播区が89粒、多播区が188粒、 1 m^2 当たり出芽数は少播区が66本、多播区が129本となった。2枚の圃場のうち1枚は無灌漑とし、パイプ上端の深さが 50 cm 、下端の深さが 60 cm になるように埋設されているFOEAS管を排水に利用した。もう1枚はFOEASの設定水位を -30 cm とし、播種後から成熟期まで、降雨の多かった2月中

旬から4月半ばまでを除き、地下灌漑した。収穫は、成熟期の1日前である2012年6月5日に行い、処理区ごとに3条(0.9m)×長さ4m=3.6m²を刈り取った。

参考のためオオムギ品種「トヨノカゼ」についても同様の試験を行った。オオムギは、供試圃場の前作がダイズであることと追肥を施用しなかったことを除けば、コムギと同一条件で栽培した。播種機の設定もコムギと同じとし、結果的に播種粒数は少播区が97粒、多播区が207粒、出芽数は少播区が79本、多播区が141本となった。収穫は、成熟期の1日前である5月28日に行い、コムギと同様に処理区ごとに刈り取った後、コンバインで全区混合収穫した。

FOEAS 圃場においてもポット栽培とほぼ同様の調査を行ったが、土壌水分張力測定には圃場用 pF メータ（大起理化学工業株式会社、DIK-8333）を用い、圃場1枚当たり3か所、FOEAS 管から1~4m離れた位置で、長さ6cmのポーラスカップの中心が地下10cmになるように埋設して pF 値を測定した。地下水位は、FOEAS 管から1.8m離れ、FOEAS 補助孔の直上ではない地点にオーガー（大起理化学工業株式会社、DIK-106B）を用いて直径4cm深さ54cm前後の縦穴を圃場1枚当たり2か所掘り、穴の中の水面の深さを測定して調べた。粘土に富む土壌のため穴はおおよそ3か月程度崩れずに残ったので、同じ穴で継続して地下水位を測定し、崩れたら掘り直した。FOEAS 管の給水側および排水側の水位を随時確認した。

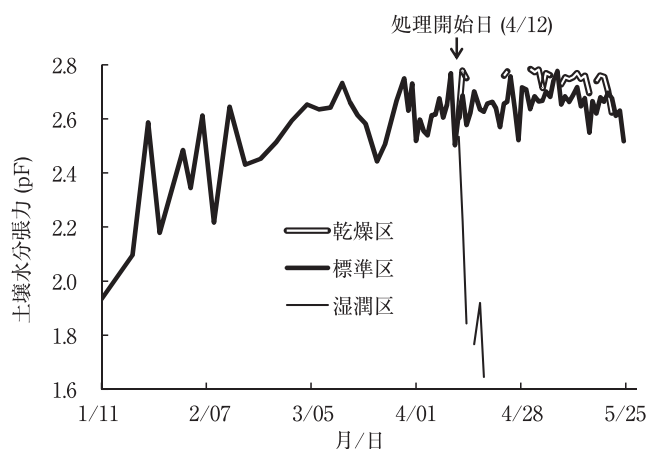
結 果

1. ポット栽培試験

(1) 各処理区の土壌水分張力と消費水量

出芽後は、1回の灌水量を1ポット当たり144mL（pFメータに補給する水も含む）とし、平年降水量と同量になるように灌水間隔を調節した。すなわち2月上旬までは7日に1回、2月中旬から3月第1半旬までは4日に1回灌水した。2月末までは pF が2.7を越えることはほとんどなかったが、3月初めからポットによっては pF が時々2.7を越えるようになり、生育が衰える兆しが見られたため、3月第2半旬以降は pF が2.6に達したら144mL灌水することとした。その結果、3月第2半旬は3日に1回、3月中旬は2日に1回、3月末からは毎日灌水した。土壌 pF は1月から3月にかけて徐々に高まり、3月以降は pF=2.6を中心として推移した（第1図）。

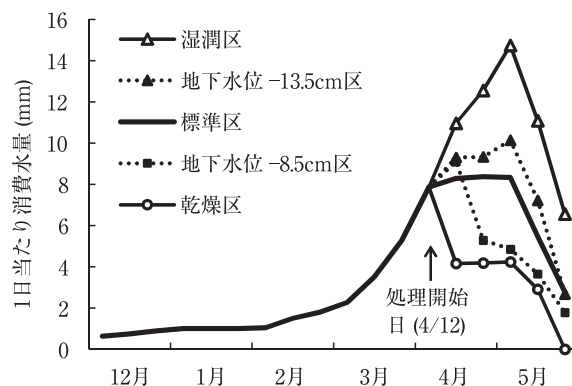
4月12日（出穂期の3日後）から5区（1区7ポット）に分け、水の供給条件を変えた。標準区は出穂前と同様に pF が2.6に達したら灌水することとし、1日1回の灌水で水分を維持できるように1回の灌水量を調節した。1ポット当たり1回の灌水量は、5月前半までは144~201mL、5月後半は74~94mLとなった。1日2回 pF 値を調べ、過半数のポットが pF 2.6を越えていれば灌水することとしたため、結果的には灌水直前の pF の平均値は2.6を越え



第1図 ポット土壌水分張力 (pF) の推移。

使用したポット用 pF メータの測定上限 2.8 を越えた時（乾燥区）と信頼下限 1.6 を下回った時（湿潤区）の値は示していない。

地下水位区は図示していないが、pF メータ指示値は常時 0 であった。



第2図 ポット栽培における1日当り消費水量の推移。

て2.66となった（第1図）。灌水量を標準区の半分にした乾燥区の pF 値は、ポット用 pF メータの信頼上限である2.7を越えた（第1図）。湿潤区は、標準区の2倍量灌水すると蒸発散量を超えてしまいポット下部に水がたまるのが予想されたので、水がたまらないように灌水量を調節した。pF 値は、使用した pF メータの信頼下限である1.6以下となった（第1図）。地下水位-13.5cm区と地下水位-8.5cm区は、pF メータの指示値が常時0となった。

標準区の1日当たり消費水量は、播種から2月上旬までは約1mmで、その後徐々に増加し、3月中旬から急増して出穂期頃（4月上旬）には約8mmに達した（第2図）。登熟中期（5月上旬）まで消費水量の多い状態が継続し、登熟後期に減少した。乾燥区は灌水量を標準区の半分としたため、1日当たり消費水量も標準区の半分となった（第2図）。湿潤区の1日当たりの消費水量は出穂後も直線的に増加し、登熟中期（5月上旬）には約15mmに達し、その

第1表 ポット栽培コムギの消費水量.

期間	消費水量 (mm)				
	乾燥区	標準区	湿潤区	地下水位 -13.5 cm 区	地下水位 -8.5 cm 区
出穂前 (4/9 まで)	286	286	286	286	286
出穂後 (4/10 以降)	168 (0.52)	326 (1.00)	552 (1.70)	389 (1.20)	244 (0.75)
全生育期間	454	612	838	675	530

() 内の数値は標準区に対する比.

第2表 ポット栽培の水分処理がコムギの生育・収量・タンパク質含有率に及ぼす影響.

処理区	出穂期 (月/日)	成熟期 (月/日)	ポット当たり 地上部全重 (g)	ポット 当たり 穂数	ポット 当たり 遅穂数	ポット 当たり 粒数	千粒重 (g)	ポット当たり 子実収量 (g)	同左対 標準比 (%)	タンパク質 含有率 (%)	ポット当たり タンパク質収量 (g)
乾燥区	4/09	5/21 c	37.1 c	10.3 b	0.2 c	506	36.6 b	18.5 b	81	13.3 a	2.47 a
標準区	4/09	5/24 b	47.1 b	10.5 b	1.8 bc	517	44.3 a	22.9 a	100	10.5 b	2.40 ab
湿潤区	4/10	5/28 a	53.8 a	13.2 a	6.3 a	566	42.0 a	23.7 a	104	8.9 c	2.12 b
地下水位 -13.5 cm 区	4/09	5/27 a	52.8 a	11.8 ab	4.8 ab	570	41.9 a	23.8 a	104	9.1 c	2.17 ab
地下水位 -8.5 cm 区	4/08	5/23 b	42.4 bc	10.2 b	1.0 c	483	38.3 b	18.5 b	81	11.2 b	2.08 b

1 ポットの面積は 0.02 m². 開花期は全区 4 月 20 日. 穂数には遅穂を含まない.

タンパク質収量はポットごとに子実収量 × タンパク質含有率 / 100 で求め, その値を平均した.

同一英文字を付した数値間には 5%水準で有意差なし (Tukey の多重検定).

出穂期と粒数は, 処理区間に 5%水準の有意差なし (Tukey の多重検定).

後減少に転じた (第2図). 地下水位 -13.5 cm 区の 1 日当たりの消費水量は標準区と湿潤区の間, 地下水位 -8.5 cm 区の 1 日当たりの消費水量は標準区と乾燥区の間値となった (第2図).

標準区の消費水量は出穂期までが 286 mm, 出穂後が 326 mm, 生育期間全体で 612 mm となった (第1表). 各処理区の出穂後の消費水量は, 乾燥区は標準区の半分, 湿潤区は標準区の 1.7 倍, 地下水位 -13.5 cm 区は標準区の 1.2 倍, 地下水位 -8.5 cm 区は標準区の 0.75 倍となった (第1表).

(2) 水分処理がコムギの生育・収量等に及ぼす影響

網室内の登熟期間中の平均気温は露地より約 2℃ 高く, ポット栽培の出穂期は圃場出穂期 (4 月 22 日) より約 13 日早い 4 月 9 日前後, ポット栽培標準区の成熟期は圃場成熟期 (6 月 6 日) より 13 日早い 5 月 24 日となった (第2表).

乾燥区は標準区と比べて成熟期が 3 日早まり, 地上部全重が減少し, 穂数と粒数には差がないが千粒重が小さくなったため, 子実収量が標準区の 81% となった (第2表). タンパク質含有率が高まり, 収量とタンパク質含有率の積であるタンパク質収量は標準区と有意差がなかった (第2表). 乾燥により葉の黄化が早まったが, 枯れ熟れ様登熟不良 (荒木ら 2011) と思われる症状は発生しなかった.

湿潤区は標準区と比べて成熟が 4 日遅れ, 地上部全重が増加し, 穂数は標準区より多かったもののポット当たり粒数と千粒重には有意差がなく, 収量にも有意差がなかつ

た (第2表). タンパク質含有率は低くなった (第2表). 遅穂が多量に発生し, 遅穂以外の穂の成熟も遅れたが, 害のような生育不良は発生しなかった.

地下水位 -13.5 cm 区の生育, 収量, タンパク質含有率は湿潤区と同程度だった (第2表). 地下水位 -8.5 cm 区は, 成熟期は標準区と有意差がないが, 乾燥区と同様に葉の黄化が早く, 千粒重が小さくなり, 収量は乾燥区と同じく標準区の 81% となった (第2表).

(3) 蒸発量

登熟期間中の, 標準区と同じ基準で灌水したポットの地面からの 1 日当たり蒸発量は 1.37~1.38 mm, 網室内水槽水面からの蒸発量は 4.08~4.70 mm となった (第3表). 蒸発量の測定に用いたポットの地下 10 cm の pF 値は標準区と同じだったが, 肉眼観察による地面の乾燥程度は標準区より乾いており, 乾燥区に近い状態となった. 湿潤区と地下水位区の地表面は常に黒く湿っていたが, 標準区と乾燥区の地表面は白く乾いている時間が長かった. 4~5 月における降水量と 3 種類の蒸発量の関係は, ポット地面からの蒸発量 < 降水量 < 気象観測露場のパン蒸発量 < 網室内の水面からの蒸発量, となった (第3表).

2. FOEAS 圃場栽培試験

近畿中国四国農業研究センター (広島県福山市) における平年の降水量は, コムギ播種から出穂までが 264 mm, 出穂から成熟までが 151 mm, 生育期間全体で 415 mm で

第3表 1日当たり降水量と蒸発量.

時期	降水量 (mm d ⁻¹)		気象観測露場における パン蒸発量 (mm d ⁻¹)		網室内の 水面蒸発量 (mm d ⁻¹)	網室内の ポット地面蒸発量 (mm d ⁻¹)
	平年	本年	平年	本年	本年	本年
12月	0.97	0.78	1.74	1.54		
1月	1.03	0.21	2.03	1.74		
2月	1.68	2.51	2.06	2.50		
3月	2.57	3.15	2.45	2.24		
4月	2.95	2.40	3.49	2.52	4.08	1.37
5月	3.85	2.16	4.11	3.42	4.70	1.38
12～5月	2.18	1.85	2.64	2.32		

降水量とパン蒸発量（パンの直径は 120 cm）は、近畿中国四国農業研究センター圃場に設置されている気象観測露場における観測値。

降水量の平年は 1981～2010 年、パン蒸発量の平年は 2005 年 1 月～2012 年 6 月の平均。

本年は 2011 年 12 月～2012 年 5 月。

網室内蒸発量は 2012 年 4 月 18 日～5 月 27 日に測定した。

第4表 平年および本年の降水量.

期間	降水量 (mm)	
	平年	本年
出穂前 (11/26～4/22)	264	266
出穂後 (4/23～6/05)	151	72
全生育期間	415	338

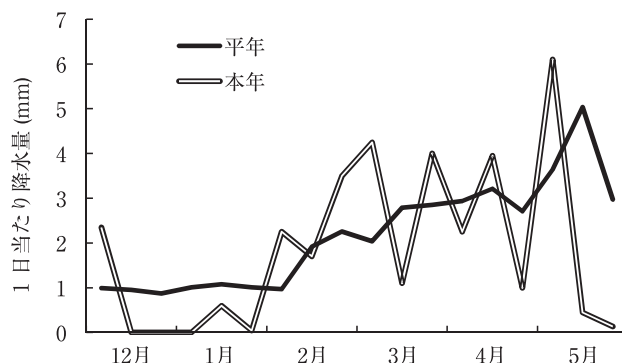
近畿中国四国農業研究センター圃場に設置されている気象観測露場における観測値。

平年は 1981～2010 年の平均。

本年は 2011 年 11 月～2012 年 6 月。

ある（第4表）。本年（2011 年 11 月～2012 年 6 月）の降水量は出穂までが 266 mm で平年とほぼ同じ、出穂後が 72 mm で平年の半分以下、生育期間全体では 338 mm で平年より 77 mm 少なかった（第4表）。平年の 1 日当たり降水量は、12～1 月が約 1 mm で、その後徐々に増加して 4 月には約 3 mm となり、5 月は変動が大きい平均すると 4 mm 程度である（第3図）。本年の 1 日当たり降水量は、5 月中下旬が 0.5 mm 以下と少なかったことが特徴的である（第3図）。

供試圃場は地下灌漑の有無にかかわらず排水が良好で、地表面の雨水はすみやかに排水された。4～5 月の地下水位は、コムギ栽培圃場オオムギ栽培圃場ともに、無灌漑圃場では概ね -40 cm 以下で（第4図）、給水孔・排水孔の観察によれば FOEAS 管下端の -60 cm より水位が下がることはほとんど無かった。地下水位を -30 cm に設定した灌漑圃場の地下水位は -30～-50 cm だった（第4図）。耕盤は地下 18 cm 以下に形成されているが、コムギの根は無灌漑圃場、灌漑圃場ともに地下 25 cm 程度まで分布していた。地下 10 cm の土壌 pH は、3 月までは無灌漑圃場で 2.6 以下、灌漑圃場で 2.3 以下と低く、4 月以降は無灌漑圃場、灌漑圃場ともに乾燥してしばしば 2.8 を越えたが、圃場用

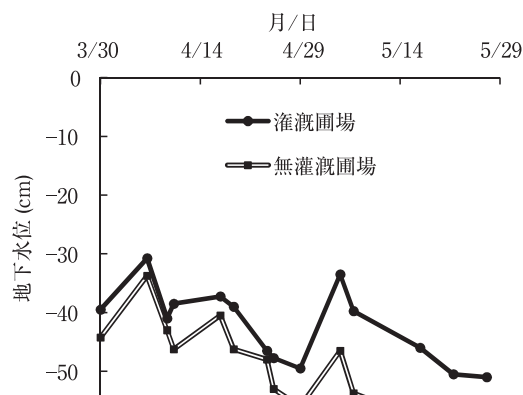


第3図 平年と本年の1日当たり降水量の推移.

近畿中国四国農業研究センター圃場に設置されている気象観測露場における観測値。

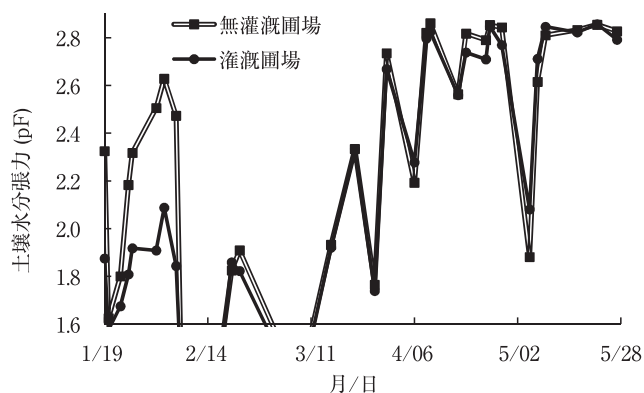
旬当りの降水量を旬の日数で除して、1 日当たり降水量とした。

平年は 1981 年～2010 年の平均。本年は 2011 年 12 月～2012 年 5 月。



第4図 FOEAS 圃場の地下水位の推移.

コムギ栽培圃場とオオムギ栽培圃場の平均。
測定範囲は 0～54 cm。



第5図 FOEAS 圃場の土壌水分張力 (pF) の推移。
コムギ栽培圃場とオオムギ栽培圃場の平均。
pF 1.6 以下は信頼度が劣るため表示していない。

pF メータの上限 2.9 を越えることはなかった (第5図)。地下 10 cm の土壌 pF が 2.8 を越えた時も、地下 20 cm の土壌は湿っており (目視観察)、コムギやオオムギが水不足の症状を示すことはなかった。

無灌漑圃場と灌漑圃場の間には、コムギの生育、収量、その他いずれの項目についてもほとんど差が無く、コムギ収量は無灌漑圃場で 794 g m^{-2} 、灌漑圃場で 737 g m^{-2} となった (第5表)。オオムギについても同様に、無灌漑圃場と灌漑圃場の間に生育や収量等の差がほとんど無く、オオムギ収量は無灌漑圃場で 772 g m^{-2} 、灌漑圃場で 742 g m^{-2} となった (第6表)。したがって、灌漑による増収効果は認められなかった。

考 察

乾燥地ではコムギの収量を増加させるために灌漑が必要

第5表 FOEAS 圃場における地下灌漑がコムギの生育・収量・タンパク質含有率に及ぼす影響。

地下灌漑	播種量	追肥量	出穂期 (月/日)	開花期 (月/日)	成熟期 (月/日)	地上部全重 (g m^{-2})	穂数 (m^{-2})	千粒重 (g)	子実収量 (g m^{-2})	タンパク質 含有率 (%)	タンパク質 収量 (g m^{-2})
無	少	少	4/22	4/30	6/07	2005	541	40.9	893	9.1	81
	多	少	4/22	4/29	6/05	1817	569	42.0	753	10.4	78
	少	多	4/22	4/30	6/07	1714	451	42.1	736	8.6	64
	多	多	4/22	4/30	6/06	1880	610	42.1	794	9.8	77
有	少	少	4/22	4/30	6/06	1471	385	43.9	636	9.5	61
	多	少	4/22	4/30	6/05	1750	599	40.2	719	8.2	59
	少	多	4/22	4/30	6/07	1704	439	42.7	770	9.2	71
	多	多	4/22	4/30	6/06	1909	568	41.1	824	8.7	72
無	平均		4/22	4/30	6/06	1854	543	41.8	794	9.5	75
有	平均		4/22	4/30	6/06	1709	498	42.0	737	8.9	66

前作は水稻。コムギ供試品種は「せときらら」。反復なし。収穫は6月5日。

地下灌漑の設定水位は -30 cm。

タンパク質収量は子実収量 × タンパク質含有率 / 100 で求めた。

反復がないため正式な統計処理ができないが、播種量と追肥量の処理区を反復と見なせば、調査した全ての項目について、灌漑の有無による有意差は無いと考えられる。

第6表 FOEAS 圃場における地下灌漑がオオムギの生育・収量・タンパク質含有率に及ぼす影響。

地下 灌漑	播種量	出穂期 (月 / 日)	開花期 (月 / 日)	成熟期 (月 / 日)	地上部全重 (g m ²)	穂数 (m ²)	千粒重 (g)	子実収量 (g m ²)	タンパク質 含有率 (%)	タンパク質 収量 (g m ²)
無	少	4/17	4/23	5/29	1726	565	32.4	796	8.6	68
	多	4/17	4/23	5/28	1671	606	30.7	749	8.2	61
有	少	4/17	4/23	5/29	1606	511	31.5	721	8.3	60
	多	4/16	4/23	5/29	1708	633	31.0	762	8.0	61
無	平均	4/17	4/23	5/29	1699	585	31.5	772	8.4	65
有	平均	4/17	4/23	5/29	1657	572	31.2	742	8.2	61

前作はダイズ。オオムギ供試品種は「トヨノカゼ」。反復なし。収穫は5月28日。

地下灌漑の設定水位は -30 cm。

タンパク質収量は子実収量 × タンパク質含有率 / 100 で求めた。

反復がないため正式な統計処理ができないが、播種量の処理区を反復と見なせば、調査した全ての項目について、灌漑の有無による有意差は無いと考えられる。

コンバイン全刈り収量 (全区混合、水分 12.5% 換算) は 745 g m^{-2} 。

とされていることから、蒸発散量と収量の関係を調べた報告が数多くある (Steiner ら 1985, Aggarwal ら 1986, Musick ら 1994, Stone and Schlegel 2006)。そのような地域においては地下水位が極めて深いため、地下水の影響は考慮する必要がなく、多くの場合は「蒸発散量 = 降水量 + 灌漑水量 + 土壌保水量の減少量」で求められている。Musick ら (1994) はアメリカ合衆国テキサス州で行った試験から、次の回帰式 (収量のレンジは 0~700 g m⁻²) を得ている。

$$\text{収量 (g m}^{-2}\text{)} = -252 + 1.22 \times \text{蒸発散量 (mm)}$$

この式によれば、500 g m⁻² の収量を得るには約 620 mm の蒸発散量が必要となる。また Stone ら (2006) はアメリカ合衆国カンザス州で行った試験から、次の回帰式 (収量のレンジは 50~500 g m⁻²) を得ている。

$$\text{収量 (g m}^{-2}\text{)} = 19.5 + 0.001168 \times (\text{生育期間の降水量 (mm)} + \text{出芽時の土壌保水量 (mm)})^2$$

この式によれば、500 g m⁻² の収量を得るには約 640 mm の水 (降水量 + 土壌保水量) が必要となる。さらに、Steiner ら (1985) はオーストラリア国ニューサウスウェールズ州で行った試験から、次の回帰式 (収量のレンジは 180~880 g m⁻²) を得ている。

$$\text{収量 (g m}^{-2}\text{)} = -201 + 1.6 \times \text{蒸発散量 (mm)}$$

この式によれば、500 g m⁻² の収量を得るには約 440 mm の蒸発散量が必要となる。また Aggarwal ら (1986) はインド国ニューデリーで行った試験により、コムギ生育期間を開花前と開花後に分けて蒸発散量と収量の関係を調べ、約 500 g m⁻² の収量を得るには開花前に約 220 mm、開花後に約 220 mm の蒸発散量が必要という結果を報告している。このように、500 g m⁻² の収量を得るのに必要な蒸発散量は 440~640 mm と開きがある。地域によって土壌、気温、日射量、品種、施肥量などが異なることが関係していると思われる。

本実験においては、ポットや水槽から水が流れ出すことはなく、降雨も遮断しているので、ポットへの灌漑水量 (地下水位区は水槽水面蒸発量を差し引いた注水量) に土壌水分減少量を加えた消費水量は、蒸発散量と等しい。蒸発散量は蒸発量と蒸散量に分けられるが、蒸散は作物の物質生産に不可欠であるのに対し、蒸発は作物にとって必要がない。したがって多収を得るには蒸散量は減らせないが、蒸発量は減らしても支障がなく、被度を高めるとか地表面を浅耕して毛管連絡を切断するなどの手段で蒸発量を減らすことができる。目視観察によるとポット標準区の地表面は蒸発量測定用ポットの地表面よりやや湿っていたので、ポット標準区の地表面からの 1 日当たり蒸発量は、蒸発量測定用ポット地面からの蒸発量 1.4 mm よりやや多く、水面からの蒸発量約 4 mm よりかなり少ないと考えられる。したがってポット標準区においては、蒸発散量が最も多くなる出穂期から登熟中期の 1 日当たり蒸発散量約 8 mm に占める蒸発量の割合は大きくないと考えられ、被度を高めても蒸発散量が大きく減少することはないと思われる。

瀬戸内沿岸 (山口県と広島県西部を除く) の 12~5 月の平年降水量は 383~515 mm であり (気象庁 2011)、近畿中国四国農業研究センター (広島県福山市) におけるコムギ生育期間中の平年降水量は 415 mm、出穂後の降水量は 151 mm である。本年 (2011 年 11 月~2012 年 6 月) のコムギ生育期間全体の降水量は 338 mm、出穂後の降水量は 72 mm しかなかったが、無灌漑でも 794 g m⁻² の収量が得られた。ポットと圃場では環境条件や収量水準が異なるため単純な比較はできないが、ポット標準区の生育期間全体の消費水量は 612 mm、出穂後の消費水量は 326 mm であった。また 500 g m⁻² の収量を得るには 440~640 mm の蒸発散量が必要と報告されていることも考え合わせると、圃場におけるコムギの生育に必要な水は生育期間中の雨だけでは補えないと考えられる。

近畿中国四国農業研究センター内 FOEAS 圃場においては、無灌漑圃場でも地下水位が地下 40~60 cm と高いので、地下水によりコムギの生育に必要な水が補われていると考えられる。このように地下水位の高い圃場は広島県福山市だけでなく、岡山県岡山市、笠岡市、山口県山口市名田島など、いずれも 17 世紀以降の干拓地であるが、瀬戸内沿岸の麦作地帯に広範囲に存在する。したがって、これらの地下水位が高い地域においては、地下灌漑は効果がないと考えられる。一方地下水位が低い地域においては、コムギの消費水量が増大する出穂期頃から登熟中期にかけて地下灌漑をすることにより、収量が増加することが期待される。

標準区は pF が 2.6 に達したら灌水することとし、結果的に登熟期の灌水直前の pF 平均値は 2.66 となった。登熟期の灌水直前の pF 平均値が 2.7 を越えた乾燥区では、早い時期から葉が黄化して千粒重が低下したため収量が減少したが、タンパク質含有率は高くなり、タンパク質収量は標準区と有意差がなかった。毛管連絡切断含水量 (pF 2.7~3.0) より水分が減ると生育阻害を受ける (寺沢 1984) といわれていることから、pF 値が 2.7 を越えていれば生育阻害を受けると考えられる。ただし pF 2.7 以下であれば生育阻害を受けないかどうかは明らかではない。一方、登熟期の供給水量が多い湿潤区は、収量は標準区と有意差がないもののタンパク質含有率が低くなり、タンパク質収量は乾燥区と比べて有意に少なくなった。湿潤区におけるタンパク質含有率とタンパク質収量の低下は、遅穂の多発により窒素が遅穂にも分配され、子実分配到れる窒素が減少したことが原因の一つと思われる。本実験では脱穀前に遅穂を除去したため未熟粒の混入はなかったが、通常は遅穂が多発すれば未熟粒の混入によりコムギ品質が低下する。湿潤区は成熟が遅れ、タンパク質含有率が低下し、未熟粒の混入により品質が低下することから、コムギ生産にとって過湿な水分条件であると考えられる。

パン用コムギはタンパク質含有率が高いことが求められており、13.5% (水分 13.5%換算時) が最適とされているので、過湿で遅穂が発生しタンパク質含有率が低下する

より, どちらかといえば乾燥ぎみで遅穂が発生しないように管理した方が好ましいと考えられる。Yang ら (2001) は, 登熟期に土壌を乾燥 ($pF=2.8$) させると湿潤 ($pF=2.3$) 条件より老化が早まり茎葉から子実への転流が増え, 多肥条件下では収量が増加すると報告している。そしてそれはアブシジン酸が誘導していると述べている。これらのことから, 登熟後期に土壌水分を低下させることで, 転流を増加させるとともに成熟を早められる可能性がある。圃場の土壌をポット栽培のように乾燥させることは容易ではないが, FOEAS が持つ高い排水機能の活用も含め, 土壌を乾燥させる技術を開発することは今後の課題である。

謝辞: 本稿のとりまとめに当たり, 近畿中国四国農業研究センターの望月秀俊博士に pF -水分曲線の提供と助言をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表します。

引用文献

- Aggarwal, P.K., A.K. Singh, G.S. Chaturvedi and S.K. Sinha 1986. Performance of wheat and triticale cultivars in a variable soil – water environment II. Evapotranspiration, water use efficiency, harvest index and grain yield. *Field Crops Res.* 13 : 301-315.
- 荒木英樹・高橋肇・張立・中司祐典・木村晃司・蔵重宏史・平田俊昭・有吉真知子・Md. A. Hossain 2011. 山口市名田島地区におけるコムギの枯れ熟れ様登熟不良の発症実態と粒重ならびに茎葉の糖含有率との関係. *日作紀* 80 : 284-291.
- Brouwer, C. and M. Heibloem 1986. Irrigation water management : Irrigation water needs. FAO training manual no.3. <http://www.fao.org/docrep/S2022E/s2022e02.htm#2.4> Determination of crop water needs (2013/03/26 閲覧).
- 藤森新作 2007. 転換作物の安定多収をめざす地下水位調節システム – 水田リフォーム技術の開発 –. *農業および園芸* 82 : 570-576.
- 藤森新作・小野寺恒雄 (編著) 2012. 水田農業自由自在 地下水位制御システムFOEAS – 導入と活用のポイント. 農山漁村文化協会, 東京. 1-115.
- 気象庁 2011. 気象統計情報>過去の気象データ検索>各地の気温, 降水量, 風など. http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=&block_no=&year=&month=&day=&view= (2013/03/26 閲覧).
- Musick, J.T., O.R. Jones, B.A. Stewart and D.A. Dusek 1994. Water-yield relationships for irrigated and dryland wheat in the U. S. southern Plains. *Agron. J.* 86 : 980-986.
- 農林水産省 2012. 統計表 (平成 23 年産) (2012 年 9 月 14 日公表) 麦類 (子実用) の収穫量 (全国農業地域別・都道府県別) – 小麦.
- 島田信二・渡邊好昭・浜口秀生・藤森新作 2010. コムギに対する地下水位制御システム (FOEAS) の効果. *日作紀* 79 (別 2) : 302-303.
- Shimada, S., H. Hamaguchi, Y. Kim, K. Matsuura, M. Kato, T. Kokuryu, J. Tazawa and S. Fujimori 2012. Effects of water table control by farm-oriented enhancing aquatic system on photosynthesis, nodule nitrogen fixation, and yield of soybeans. *Plant Prod. Sci.* 15 : 132-143.
- Steiner, J.L., R.C.G. Smith, W.S. Meyer and J.A. Adeney 1985. Water use, foliage temperature and yield of irrigated wheat in south-eastern Australia. *Aust. J. Agric. Res.* 36 : 1-11.
- Stone, L.R. and A.J. Schlegel 2006. Yield–water supply relationships of grain sorghum and winter wheat. *Agron. J.* 98 : 1359-1366.
- 寺沢四郎 1984. 毛管連絡切断含水量. *植物栄養土壌肥料大事典*. 養賢堂, 東京. 383-384.
- Yang, J., J. Zhang, Z. Wang, O. Zhu and L. Liu 2001. Water deficit-induced senescence and its relationship to the remobilization of pre-stored carbon in wheat during grain filling. *Agron. J.* 93 : 196-206.

Seasonal Water Needs in Potted Wheat and Irrigation Necessity for Wheat Fields in Seto Inland Sea Coast Polder : Naoyuki ISHIKAWA, Gen ISHIOKA, Jun KUBOTA and Hiroyuki TAKEDA (*Western Region Agricultural Research Center, Fukuyama, Hiroshima 721-8514 Japan*)

Abstract : Recently, the water table controlling system called farm-oriented enhancing aquatic system (FOEAS) has been introduced into paddy-upland rotation fields in various areas. However, the effects of underground irrigation by FOEAS for wheat have not been elucidated. According to the FAO manual, 450 to 650 mm of water is needed during the growing period of wheat. In Seto Inland Sea coast area, normal rainfall during wheat growing period is about 400 to 500 mm and irrigation is not practiced for wheat production. We studied the seasonal water needs of wheat by pot culture and necessity of irrigation in Seto Inland Sea coast polder. In potted wheat, water consumption per day was about 1 mm from sowing to early February and it increased to 8 mm in heading stage, and declined after the middle of ripening stage. The amount of water consumed during the total growing period and after the heading stage was 612 mm and 326 mm, respectively. In the experimental field, rainfall during the wheat growing period and after the heading stage was 338 mm (77 mm less than normal) and 72 mm (half of normal), respectively. Water table depth was 40 to 60 cm in non-irrigated fields and 30 to 50 cm in fields irrigated by FOEAS. There was no difference in wheat growth or yield between non-irrigated and irrigated fields. This is probably because water table was high enough to fulfill the water needs of wheat even in non-irrigated fields.

Key words : FOEAS, Irrigation, Underground water, Water needs, Water table, Wheat.