

湿潤地帯の土地利用型作物に対する灌水技術の課題

竹内 晴信*

A Field Study of Irrigation Technics for Upland Crops in Humid Area

Harunobu TAKEUCHI*

* Hokkaido Central Agricultural Experiment Station, East 6 North 15, Naganuma,
 Hokkaido 069-1395, Japan

1. はじめに

我が国の畑地灌漑施設の整備済面積は2002年度までに約50万haに達し整備率は23%に上る。国内の畑地面積の44%を抱える北海道では、土地利用型畑作(草地酪農を含む)が多いため、整備率は低いものの2002年度末までに7.3万haの面積が末端整備済で、さらに10.2万haで工事中または計画段階にある。

このように施設整備が着々と進む中で、畑地灌漑用水が利用可能となる地域が増えているが、水を使った用水営農をどのように展開するかについてのノウハウを、地域の技術者や生産者自身が十分もっているとは言い難い。例えば北海道で行われた調査(北海道農政部畑かん検討中核委員会・道立中央農試:1997)では、末端施設整備の受益対象地区に含まれながら灌水施設を導入していない生産者が挙げる理由として、灌水効果が期待されないことや野菜の導入計画がないこと、多額の経済負担が生じることと共に灌水技術が確立されていないことを報じている。このことは、畑地灌漑の理論と技術の研究・開発が主として施設計画に対する寄与を中心に行われてきた影響ではないかと考えられる。このことは、山上(1988)が述べているように、北海道において一般畑作物を対象とした灌水技術の検討は十分なされておらず、体験圃場等における受益者の利用実績の解析や用水量の検討が主であった、ということと一致する。

従って、今後も施設整備が進む中で、水利用が可能となる生産者に対し、きめ細かな水利用技術や灌水効果の提示が必要になるものと考え、本稿では、特に土地利用型作物の生産現場で活用し得る灌水技術について、理論的かつ簡便な技術として組み立てていくために、これまでの研究事例を概観し、今後の課題について考察した。

2. 北海道における水利用の実態と効果

2.1 潜在的な生産制限要因としての水不足

北海道では、多くの畑作物生長期と重なる5~7月期においてペンマン蒸発散位が降水量を上回る地域が道央以北に広く分布する。佐久間(1994)は、気温と純放射分布から規定される可能生産力の最大値に対して、降水量の不足により推定される作物の可能生産力が、網走、上川、後志などの主要畑作地帯で相対的に大きく低下することを試算した(図-1)。また志賀(2003)は、秋まきコムギのポテンシャル収量が干ばつ年に10%以上減少する確率を作物モデル(WOFOST)を用いてシミュレートし、網走や空知地域の有効土層の浅い圃場で危険性が高いことを示した。

これらのことから、潜在的に生育期間中の水不足が畑作物の生産量を規制している畑作地帯が北海道に多いことが推測されるが、基幹的な土地利用型作物(コムギ、牧草、テンサイ、バレイショ、飼料用トウモロコシ、ショウズ、ダイズ;作付け面積順)に補給灌漑を行っている例は多くはない。

2.2 畑作物への灌水利用

梅田ら(1994)は、富良野地域において畑地灌漑受益農家(n=262)にアンケートを行い、毎年良く灌水する作物として、タマネギ(83%)、ニンジン(71%)の割合が高く、他にバレイショ、スイートコーン、カボチャ、テンサイにも灌水されているものの、その割合は低いことを報告している。このように、水不足が想定されとしても、コムギや豆類などの畑作物への灌水に結びついていないことが伺われる。土地利用型作物に対して灌水利用が少ないのは以下の理由が想定される。

第1の、そして最も重要な要因は、土地利用型作物の価格が相対的に安く、かつ下落傾向にあり、生産コスト

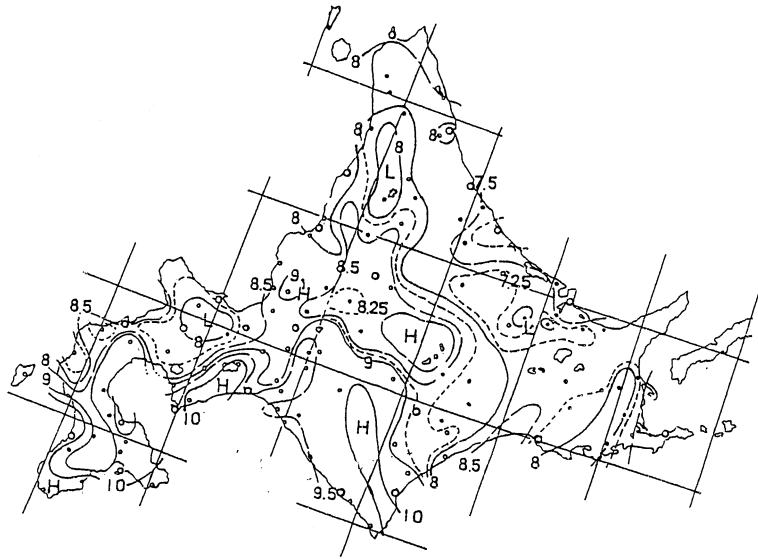


図-1 水収支から求めた可能乾物生産量の分布 (佐久間, 1994)
(H, L は、それぞれ周辺より高い、低いを示す。単位: Mg ha^{-1})

の低減が至上命題になっていることである。これに関連する第2の要因は、灌水による効果あまり大きく感じられていないことである。灌水によって得られる増収効果と品質改善効果が大きくなければ、灌水のコストをかける意味を見いだせない。そして第3の要因には、生産者の高齢化と経営面積の拡大が、全ての圃場に対してリールマシンの移動やスプリンクラーの設置などの労力をかけることを困難にしている。技術的には如何に灌水の手間を減らすか、ということが課題となる。第4の要因は、これらの作物に対する省力かつ効果的な灌水技術が十分に確立されていないことである。施設整備と利用計画が欧米の技術と理論を導入して進められてきた結果、多雨と気象変動の比較的大きな我が国で、手間がかからず効果的な灌水技術を生産者に提示することが遅れていると言わざるを得ない。特に近年は高品質指向(産地差別化)が求められる中で、灌水栽培すると良い品質のものが得られないのではないか、という危惧を生産者や指導者が持つ場合もある。

2.3 灌水による増収効果

このような背景から、生産者はまず灌水による増収効果についての情報を必要としていると考えられるので、北海道の作付けをベースに考えてみたい。

北海道内の末端灌水施設の整備地区において、灌水効果の確認実証と生産者に水利用技術を習得してもらう目的でモデル圃場が設定され、試験調査が行われてきた。14年間の試験の結果を集約した灌水実態と増収効果を

まとめたものが表-1である(竹内ら, 2004)。これによると、コムギ、バレイショ、ニンジン、アズキ、タマネギ、キャベツ、ハクサイの増収効果は比較的大きかったが、増収率は高くても10%程度であり、テンサイ、スイートコーン、ユリ(球根)では増収率が5%以下であった。この値は、従来の畑かん計画で示された10~30%の数値と比較すると低めの増収率となっている。また、本試験では延べ灌水回数、灌水量は必ずしも収量向上に反映していなかった。このことは、作物が水分ストレスを受けて本当に水を必要とする時には少量でも灌水を行うことで増収に結びつく、ということであり、多くの期間は蒸発散量を十分まかなうだけの土壌水分の供給があることを示している。また、水分ストレスの影響が大きいとされる生育前半の時期に灌水を必要とするような乾燥状態になっていたか否かが作物によって異なり、それぞれの増収効果に影響を及ぼしたものと考えられる。

岩田ら(2004)は、北海道内3カ所に設置した雨よけハウス内で代表的な畑作物を供試し、供給水量を変えた試験を行っている。その結果、少雨年に相当する 2mm d^{-1} 区で作物間に顕著な収量差が見られ、ダイズ、ニンジン、バレイショでは基準灌水量とした 3mm d^{-1} 区と比較して 2mm d^{-1} の水供給でも95%の収量を確保でき、以下、 $\text{テンサイ} \cdot \text{タマネギ} > \text{キャベツ} > \text{ハクサイ}$ 、の順に作物の水分ストレス耐性が小さくなることを報告している。このことから考えると、水分ストレス耐性が小さい作物ほど灌水による増収効果が期待できると言えよう。

3. 灌水技術の課題

3.1 灌水技術として必要なことは何か

鹿兒島県農試（1986）が作成した灌水マニュアルによると、灌水機材や施肥との関連についての記述が多い。また、千葉県（1992）のマニュアルでは圃場排水や灌漑水の水質にも言及している。作物別の灌水法としては、施設園芸作物や果樹で多くの成果が報告されており（湯村，1974；西出，1992などに集約），いずれも灌水開始点と灌水量を生育時期によって変えるような灌水技術を示

している。

北海道では道内の主要畑作物と露地園芸作物、果樹、飼料作物等を網羅した灌水マニュアル（畑地かんがい試験研究会，1997）をまとめ、灌水期間、灌水開始点、1回あたり灌水量が作物別に提示された。これに先立ち、竹内ら（1996）が、主要4作物（春まきコムギ、バレイショ、テンサイ、タマネギ）の土壌別灌水指針を、生育の良否と収量性に対する影響、それに土壌の保水性を基にした圃場試験により導いている（表-2）。

このように、生産現場に提示すべき灌水技術として

表-1 北海道の灌水技術実証圃場における灌水実態（竹内ら，2004）

作物	事例当平均		調査事例数	時期別灌水延べ回数									灌水区の収量比平均				
	延べ灌水量(mm)	灌水回数		5月			6月			7月				8月			9月
				中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	
コムギ	44	2.5	13	7	10	3	5	4	2	1							108
バレイショ	51	3.1	16	1	6	5	8	8	15	3	4	1					111
テンサイ	48	2.7	18	6	1	3	8	6	12	4	5	1	2	1			105
ニンジン	40	3.3	9	1	1	5	3	7	1	4	8						110
アズキ	38	2.1	12		1	1	1	5	4	4	7	2					110
ダイズ	13	1.0	1						1								101
タマネギ	37	2.6	17		4	13	9	11	4	4							109
キャベツ	67	3.8	28	1	0	8	22	10	12	18	19	4	5	2	2	1	108
ハクサイ	32	2.4	7			3	6	3	3	2							112
長ネギ	23	1.5	4								1	3	1				120
ユリ（球根）	60	3.9	7	2	7	3	4	7	1	0	3						100
アスパラガス	34	2.8	9	2	1	2	4	15	2	0	1	0	0	0	2		115
カリフラワー	35	2.7	3					1	2	2	3						134
ブロッコリ	41	4.3	3			2	5	3	2	1							106
シソ	120	6.0	1	1	1	1	0	1	1	0	1						113
スイートコーン	61	2.7	3		1	1	1	2	2	0	1						101
カボチャ	90	4.0	1		1	1	0	1	1								95
リンゴ	213	7.5	2	1	1	0	3	2	5	0	2	0	0	0	1		87

表-2 網走地域における灌水指針（竹内ら，1996）

作物	灌水適期間	灌水開始点 ¹⁾	1回あたり灌水量 ²⁾		
			大	中	小
春まきコムギ	分けつ始期～出穂期	2.5	20	15	10
バレイショ	萌芽期～培土	2.5	20	15	10
	培土～7月末	2.5	25	20	15
テンサイ	移植～茎葉繁茂期半ば（7月前半）	2.7	25	20	15
タマネギ	移植～外葉伸長期半ば（6月末）	2.3	20	15	10

¹⁾ 深さ0.10～0.15mにおける土壌水分ポテンシャル値（pF）。（バレイショの培土後は0.15～0.20m）

²⁾ 土壌水分供給能を3区分（大中小）した各々の圃場での最大灌水量（mm）

は、多目的利用を除いた補給灌漑では主として以下の項目にまとめられる。①灌水が必要な期間（あるいは不要な時期）、②灌水を開始するタイミング、③1回あたり灌水量、④どのように灌水を行うべきか（灌水強度、時間帯、方式、機材）、⑤灌水に伴う問題発生はないか（肥料流亡、地温低下、病害発生、品質低下、水質、灌水直後の降雨の影響など）。本章では、①～③を中心にその考え方を示し、必要に応じて④⑤にも言及する。

3.2 灌水を行うべき時期

従来の考え方では、灌水すべき期間についての検討は比較的少なかった。これは、畑地灌漑計画が作物の生育期間中（全期間）にわたって不足する水分を補給しようとする考え方に立脚しているため、どの生育時期であっても水不足と考えられる状態になれば灌水を行うとしているためである。

しかし、作物の生育期間全てにわたって平均的な消費水量を与え続けなければならないわけではない。むしろ生育時期によっては、病害の発生抑制や品質向上（糖やでんぶんの蓄積）のためにある程度の水分ストレスを与えた方がよい期間も存在する。鴨田（1982）は、収量を確保しつつ内部品質を向上させるためにはある程度の水分ストレスの付与が有効であると述べており、こうした考え方が、果樹や園芸作物の灌水技術では広く取り入れられている。生育期間の長い畑作物の場合も、生育後半の生殖生長の時期は灌水の効果が生育前半と比べて判然としないことが多く、例えば春まきコムギでは表-3に示す試験結果（Matsunaka *et al.*, 1992）により、出芽から出穂期までの水分供給が収量の確保に重要であると報告されている。従って、土地利用型作物に対しても積極的に灌水を行って水分補給につとめるべき時期と、極端な

水分ストレスで枯凋してしまわない程度に最低限の灌水を行う時期に分けて考える方が実用的であり、それらを作物種・作型別に明確に提示することが必要である。

3.3 灌水管理方式の比較

灌水を行うべき期間においてどの程度まで乾燥が進んだら灌水を始めるか、という灌水開始点（「灌水点」や「灌水タイミング」という語句も使われる）と、1回あたり灌水量の情報が必要となる。これについては、どのような灌水管理方式を用いるかでその考え方も異なると思われるため、黒田・中野（1992）の解説を参考に各方式毎の特徴を以下に整理する。

3.3.1 定時定量方式

灌水を行う上で最も単純な方式である。例えば7日に1回、10mm灌水、というやり方で、作物の安定的な蒸発散量の積算値を1回あたり灌水量とし、土壌の保水量の範囲内で間断間隔を設定する。しかし、間断期間中に降雨があつたり消費水量が変化しやすい場合は必要以上の水を与えてしまうことになる。施設園芸では主流となる方式であり、大規模圃場でも活着促進など、多目的利用を行う場合に活用される。

3.3.2 定時変量方式

定時定量方式の欠点を補うため、間断期間内に日々変動する蒸発散量を推定積算し、有効降水量を減じて1回あたり灌水量とする方式である。畑地灌漑計画で使用水量の推計に用いられる本方式は、灌水実施のタイミングに気を遣わずに済むと共に、灌水機材のローテーションを行う場合にスケジュール決定が容易で、蒸発散量の変化があつても灌水量の増減により対応しやすいとされている。しかし、実際に現場で活用する際には以下のような問題点が生じる。①気象条件の変動に伴う蒸発散量の

表-3 灌水時期が春まきコムギの穂数と子実収量に及ぼす影響
(Matsunaka *et al.*, 1992)

灌水処理区	灌水期間					子実重 (Mg ha ⁻¹)	有効穂数 (本 m ⁻²)
	出芽期	茎立期	出穂期	乳熟期	成熟期		
無灌水						3.68	407
前期のみ	←→					5.02	551
中期のみ		←→				4.87	511
後期のみ			←→			4.05	431
晩期のみ				←→		3.92	395
前～中期	←→					4.83	519
前～後期	←→					3.86	451
前～晩期	←→					5.00	544
中～晩期		←→				5.18	567
後～晩期			←→			5.06	573

変動を現場で予測することが困難。②作物係数は生育の良否や品種によって変動するので、一定の作物係数を個々の圃場に対して用いることは誤差の増大となり、間断間隔によって設定した灌水日になっても作物には水分ストレスを生じていない可能性がある。③地域内の土壤の水分供給力に差があると間断日数に差が生じる。④気象条件によっては、灌水機材のローテーションを行っても土壤が乾燥する日は接近（収束）してしまい、灌水したくても機材を使えない状況が発生してしまう。

本方式で組み立てられた灌水技術として、北海道農試（1993）が透排水性良好な十勝地域の浅れき地帯に限定して示した成績が挙げられる（表-4）。ここでは、生育期間中の供給水量をショウズ・コムギで 2 mm d^{-1} 、テンサイ・バレイショで 3 mm d^{-1} が妥当とし、7日間断で $14\sim 21\text{ mm}$ の水供給があれば標準収量が得られるとしている。この方式は期間中の降水量を積算して比較すれば良く、不足する分を灌水すれば良いので現場技術としても受け入れられやすい。

3.3.3 随時定量方式

気象条件の変動が大きく、また土壤条件の変化に対応して作物の水分消費量も日々変化することを前提に、決められた間断間隔を設定せず、作物が水分ストレスを生じ始める時点で灌水を開始する方式である。1回あたり灌水量は、この時点までに土壤中から消費された水分量であり、その値は総迅速易有効水分量（TRAM）として、制限土層の有効水分保持容量をその層の水分消費割合で除して算出する（農林水産省構造改善局，1982）。制限土層の水分消費割合は、土壤水分消費型（SMEP）で規定されるが、作物の根群域がほぼ決まった段階では、SMEPはほぼ一定になると仮定しているのので、これらの条件下でTRAMを一定の値として提示する。

作物の水分ストレス感受を推定する手法としては、作物体から情報を得る方法と土壤水分ポテンシャルの測定により間接的に知る方法がある。

前者では、体内水分ポテンシャルの低下を直接測定する方法、それに伴う気孔閉鎖で上昇する葉温を測定する

方法、細胞膨圧の低下による葉のしおれや茎の収縮等の外見的特徴変化から推定する方法、などが有効とされる（玉井，1971）。後者の土壤測定法は最も一般的な灌水開始点推定の手法であり、これまで多くの作物、地域でその指標値が検討され提示されている。両者とも作物や土壤のモニタリングを前提としており、現場での活用面ややや難がある。また、多くの影響要因がある中で、設定した灌水開始点がどのような場面で適用性を持つのか（作物のどの生育段階に適用するかや異なる気象条件の地域での適用性など）について十分留意することが必要である。

3.3.4 随時変量方式

水分ストレスの発生を測定または予測して灌水開始点を決め、土壌の水分供給能とその時点での空き保水容量に応じた適量を灌水する方式である。灌水量を決定するための考え方として、根の水吸収機能を考慮した水供給土層深を見極め、その時点で下層からの水分供給量推定値をTRAMから減じるなどして、最低限必要な灌水量を決定する。

具体的な灌水技術への応用は未だ検討されていないが、現場で利用するためには、簡便で精度の高い、土壤水分や作物体内水分ストレスの予測技術を開発し、「いつ」「どれだけ」をリアルタイムで提示することが前提となろう。

3.4 灌水開始点の決定

3.4.1 作物の水分ストレス

水分ストレスと収量・品質の関係は、作物別に未だ十分把握されているわけではない。石原（1997）は、水分ストレスによって光合成速度が低下する以前に、作物体内では様々な生理的な影響が生じ始め、またその発現点は様々でないことを解説している。このため、灌水技術への応用に際し、何に着目してどのような状態になった時に灌水開始と判断すべきかについては必ずしも統一的な見解がとられていない。

玉井（1971）は、柑橘を用いたOppenheimerの研究を紹介し、気孔開度による灌水開始管理の簡便性と妥当

表-4 十勝地域の浅れき地帯における畑作物の灌水による影響（北海道農試，1993）

作物	日平均灌水量処理による収量反応比較 (mm d^{-1})	影響の大きい生育時期	望ましい水供給量 (mm d^{-1})
秋まきコムギ	$1 < 2 \leq 3$	中期	2
バレイショ	$1 \leq 2 < 3$	中期	3
テンサイ	$1 < 2 \leq 3$	初期～中期	3
ショウズ	$1 \leq 2 \leq 3$	中期	2

性を示している。山下ら (1979) は、ミカンの体内水ポテンシャルの推移と果実の収量・品質の関連から夏季の葉内水ポテンシャルを低める管理を提言している (表-5)。

植物体内の水ポテンシャルを研究以外の場で日常的に測定することは困難であり、一般には「しおれ」を外見指標とすることが多い。しかし、しおれの始まるのは水分ストレスの進行した段階であること、蒸散速度の強弱でその発現点が異なり日較差も見られることなどから、本来はしおれの観察に頼らず、何らかの方法で水分ストレスを検知するような測定手法が開発されることが望まれる。和歌山県果樹試 (2004) では、ミカンの葉の水分ポテンシャル -1.0 MPaを灌水開始点とし、葉の形態 (巻き発生) と果実の硬さ (非破壊果実硬度計) によってこれを判断している。一方、畑作物では、日射量から葉温を推定し水分ストレスの程度を把握する手法の検討 (北海道開発局, 1991) や、赤外放射温度計を用いた灌漑時期の推定 (長ら, 1986) の検討も行われているが、現場への技術普及には至っていない。作物栄養診断における汁液分析に供する反射式光度計のような簡易な測定評価機器が実用化すれば現場で歓迎されるであろう。

3.4.2 土壌水分ポテンシャル

上で述べたように、作物体の水分ストレス測定が困難であるため、間接的な手法として土壌水分ポテンシャルの測定による灌水開始の判断が行われている。これは、土壌の乾燥に伴って根の吸水速度が低下し、作物体内の水分ポテンシャルも低下することを利用している。

多くの研究事例では、野菜類における灌水開始点を作土の水分ポテンシャルが $-3 \sim -20$ kPa (pF 1.5~2.3) になった時としており、圃場含水量に近い比較的多水分の状態でも水分ストレスの影響が生じ始めると判断してい

る (湯村, 1974)。これは、小さな根域に対する水供給が作土だけでまかなわれ、かつ僅かな水分ストレスであっても収量や品質に及ぼす影響が大きいとされるためである。このような灌水管理を行おうとすると、少ない灌水量で頻繁な灌水回数が必要となり、土地利用型作物では省力化に逆行する。このため畑作物では、より乾燥側の $-20 \sim -50$ kPa (pF 2.3~2.7) に灌水開始点を設定している (宮下・千葉, 1986; 竹内ら, 1996)。さらに、果樹や飼料作物では -100 kPa 以下 (pF 3.0 以上) のかなり乾燥側に灌水開始点をおく例もある。これらは、収量性に対する影響が少ないとする試験結果から導かれたものであるが、単に短期的な水分ストレスの影響程度だけでなく、生育期間の長短 (水分ストレスからの回復性) や根域の浅深が大きく影響していることが予想される。鴨田 (1982) が述べているように、灌水開始点は土壌水分補給量や気象条件によって変動するものであり、一概に決めることができないという側面もある。従って、これまで提示された灌水開始点を絶対視することなく、与えられた生育条件下で、灌水開始点を表す、より適切な土壌水分ポテンシャルの評価法の検討を続けていく必要がある。

3.4.3 土壌水分ポテンシャルの測定と推定

土壌水分ポテンシャルをテンシオメータで測定しようとする場合、毎日のチェックや水補給などのメンテナンスが必要である。このため、生産現場で土壌水分ポテンシャルをどのように省力的に測定するかが技術的な課題である。TDR等によって測定した水分率から土壌水分ポテンシャルに換算する方式は誤差が大きく現場利用に適していない。

一方、土壌水分ポテンシャルを気象条件等から推定する試みは、例えば宮下ら (1988) が岩手県の畑地を対象

表-5 みかんの生育時期による水分供給重要度の変化と灌水開始点 (山下ら, 1979 を基に作成)

生育期	時期 (注)	灌水点 (pF)	土壌水分の影響
発芽・開花期 結実・果実肥大期	4月~7月下旬 (4月~8月上旬)	3.0	干天が続くと初期生長や幼果の肥大が阻害
果実肥大最盛期	8月上旬~9月中旬 (8月中旬~9月下旬)	3.5	多水分では果実肥大が旺盛になるが糖度低下
果実成熟期	9月下旬~収穫前 (10月下旬~収穫前)	3.8	多水分では浮皮現象が著しくなり果汁糖度低下
生長休止期	収穫後~3月	3.0	長期の干ばつが続くと落葉被害増加

(注) 「早生温州」の生育時期を示す。かっこ内は「普通温州」の時期を示す。

に行っているが、条件の異なる圃場で応用、普及するものにはなっていない。精度良い蒸発散量と毛管補給水分量の推定値から土壤中の水収支を行い、有効土層中の有効水分量と土壤水分ポテンシャルを予測する手法が一般化できれば、土地利用型作物の灌水開始判断に際して有力な手段となろう。

3.4.4 下層からの毛管補給の影響

有効土層が乾いてきた場合に、水分の多い下層から有効土層に向けて上向きの水移動（毛管補給）がおきる。露地における毛管補給速度の測定例として、丸山（1990）がいくつかの研究事例を紹介し、蒸発散量と消費水量の差と土層内水分含量から推定する方法で $1.3\sim 2.4\text{ mm d}^{-1}$ になるとしている。また千家（1990）は、カラムでのヒエを供試したモデル試験により、深さ 0.6 m で $2\sim 12\text{ mm d}^{-1}$ の高い値を報告している。同様に、竹内・長谷川（1995）はダイズを用い $0.6\sim 4.3\text{ mm d}^{-1}$ の値を得ており、共に土壤間差のあることが示されている。圃場での動水勾配と不飽和透水係数の測定値から評価した値の報告は少ない。筆者が北海道北見のキャベツ畑で観測した例では、7月下旬に 0.6 m 深で $1\sim 2\text{ mm d}^{-1}$ の上向きフラックスが推測された。Hasegawa and Eguchi（2002）は、筑波の火山性土畑圃場において3カ年の水分動態を測定し、深さ 1 m での上向きフラックスは概ね 1 mm d^{-1} であり、最大でも 1.5 mm d^{-1} であったことを報告している。

このように、圃場では概ね $1\sim 2\text{ mm d}^{-1}$ の毛管補給が見込まれ、蒸発散量に比較した割合は $10\sim 80\%$ と幅はあるが、その寄与割合は低いものではないことがわかる。また、これらの試験では有効土層の乾燥が進んで下層との動水勾配が非常に大きくなっており、有効土層が浅く根域が小さいゆえに有効土層の乾燥が早く進む条件では、それだけ作物の水吸収に対する毛管補給の寄与が大きくなることを予想させる。この段階では、動水勾配の増加が乾燥に伴う透水係数の低下と反比例するため、毛管補給速度はあまり低下しないと考えられる。また、Hasegawa and Eguchi（2002）が示したように、雨の多い我が国では下層の水分変動が少なく、不飽和透水係数の変化も小さいと予想される。これらにより、毛管補給速度は主として土壤条件に大きく影響されると考えられる。

毛管補給速度が大きい場合、作物が強い水分ストレスを受ける場面が少なくなり、灌水開始が多少遅れても作物には大きなダメージを与えにくくなることが予想される。このような条件では、灌水開始点の乾燥側へのシフトや1回あたり灌水量の削減を行うのが妥当である。また、毛管補給速度の大小によって、当該土壤の畑地灌漑

必要度が変わることも考えられる。

長谷川（1994）は、蒸散量が低下し始めるまでは作土の -100 kPa までの水分量をもって土壤水分供給能として考えても良いが、その先の段階では下層土の水供給の役割が増すと述べている。また、中辻（1995）も述べているように、毛管補給速度を土壤毎に評価し、根域の広がりやどの程度許容できるかという土壤条件と組み合わせ、土壤水分供給能を定量的に評価することが望まれる（図-2）。これによって、例えば灌水が重要ではないが品質向上に水供給制御を行った方が良いような（枯死しない程度に水分ストレスを与え糖の蓄積を図るといった）生育期間において、灌水を行うべきか否かの一つの判断材料を提供することが可能となる。

3.5 灌水量と灌水強度

1回あたり灌水量は、灌水開始時点において土壤が貯留し得る有効水分量を基本としている。この量を評価する際の影響要因は、土壤（各土層）の保水容量、土層中の有効水残存量、対象土層深である。灌水開始点を乾燥側にするほど1回あたり灌水量の許容量は増える。しかし、この許容量を一杯灌水することは、仮に干天が続くことが明らかであれば次回の灌水を遅らせるのに有効だが、以下の理由から避けるべきと考える。

第1に、灌水後の予期せぬ降水を有効利用するためである。安養寺（1988）は、この観点から空きTRAMを設定し圃場容水量まで戻さないように1回の灌水量を減らすことを提唱し、灌水施設整備のコスト低減につなげている。

第2に、灌水後も有効土層の気相率を高めておく（酸素拡散が行われやすい条件を維持する）ことにより、根の伸張や吸水機能を高く維持できるようにするためである。これにより、有効土層内に残存する有効水分や、毛管補給水分をより効果的に利用できるような根系形成が期待される。また、特に透水性の小さな土壤では、灌水後の湿害発生のリスクを軽減する効果もある。

第3に、圃場容水量まで灌水すると灌水時間が延びて灌水機材利用効率の低下を招いたり、灌水後の圃場地耐力の低下による機械作業性の回復に時間がかかるなどの問題を回避するためである。

土地利用型畑作物の作付けの多い台地土では、排水不良や堅密など土壤物理性の劣悪な条件も多く、余裕を残した灌水量の設定が有効と考えられる。

河野・山田（1984）は、畑地における水利用実態から見て、好適土壤水分条件における消費水量を用水量に結びつけるのは妥当でなく、作物の耐干性を考慮することで用水量削減が可能となるとしている。

なお、通常、1回あたり灌水量として示される量（5～

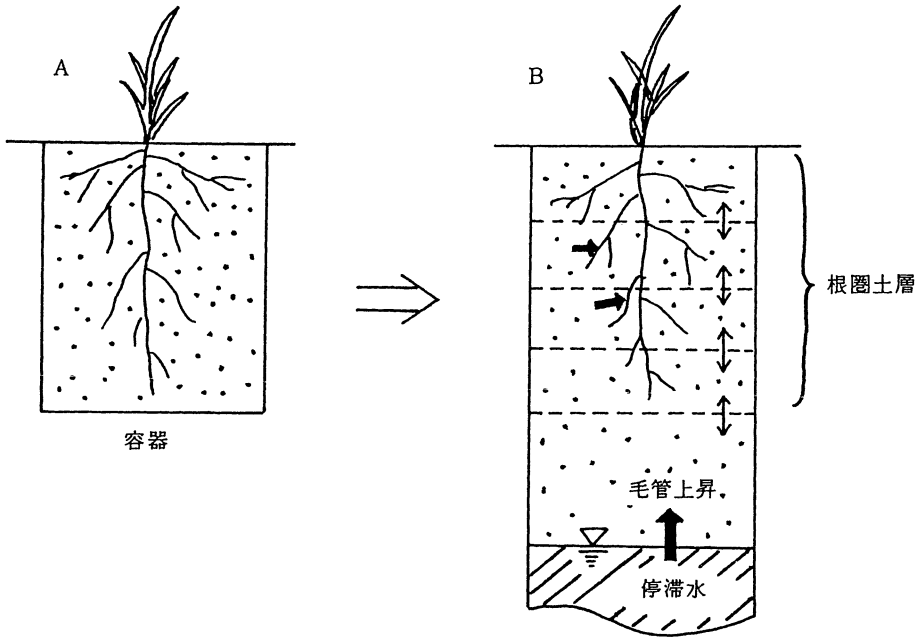


図-2 根域と毛管補給を考慮した土壌水分供給域の概念 (中辻, 1995)

25 mm) を、降雨に較べてかなり強い強度で灌水する (普通畑用スプリンクラーやレインガンでは概ね 10 mm h^{-1} 以上) ことは、土壌の浸入速度が高くない場合には表面流去を引き起こす可能性もある。また、大きな雨滴ではねた泥が茎葉に付着すると病害発生原因となりかねない。このため、できるだけ低い強度で灌水を行うべきであるが、単位時間あたり灌水面積が減少する問題もあり、灌水量そのものを減じる対策も考慮する必要がある。

3.6 根域の影響

根がどの深さからどれだけの水を吸収利用しているかについては、土壌水分が十分ある条件では、根域を深さ方向に4等分した場合に表層1/4の深さから全消費水量の40%の水分を吸収利用するとされる (Israelsen and Hansen, 1962)。このため、作土を制限土層と見なし、この部分の土壌水分ポテンシャルを灌水開始評価の基準層位としている。しかし乾燥が進行し土壌水分が不均一となるような条件では、かなり変動の大きいことが指摘されている (湯村, 1982)。平沢 (1995) は、生育期間中の降水量が多い我が国 (特に梅雨のある地域) では、乾燥地域に比べて根系の発達に貧弱となり、水分消費量の多くなる時期に土壌表層の乾燥に見舞われた場合に、たとえ下層に有効水分が残されていたとしても、低い水分ストレスで作物の生育収量を規制してしまう例が多いと述

べている。

根の吸水機能は、根系の深さ、長さと分布、通導抵抗の3つに規定されている (根の事典編集委員会, 1998)。このため、下層に深く根を伸ばし根量を発達させることが可能な条件では、作物は水分ストレスを生じるリスクが低下すると想定される。従って灌水開始点を決定する際には、根域の大小・深浅の条件付けを伴わなければならないと考える。その上で、根域のどの部分 (深さ) を指標にすれば作物体の水分ストレスを精度良く推定できるかを明らかにすべきであろう。

北海道では本州以南に比較して夏季の気温こそ低いものの、湿度が低いため蒸散量が多くなることが予想される。葉面積指数の比較的高いテンサイやコムギでは水分消費量も多く蒸散強度が大きいと予想される (北村・今, 1970; 竹内・宮脇, 1994) ので、土壌の有効水分が十分にある段階でも、根系の発達が貧弱であれば水分ストレスを生じ生育量を規制する場面が多くなるであろう。しかし、このような条件で灌水開始点を多水分側に設定すると、灌水回数が増えるだけでなく、根域を浅層に固定してしまいかねない。むしろある程度の水分ストレスを許容し、灌水開始点を乾燥側に設定して、根域の発達を促す方が収量性で有利になるかもしれない。

丹羽 (1999) は、耕盤層の発達は根張りを大きく規制し、水分ストレスを招きやすくしている実態を示してい

る。こうした圃場においては、灌水で対処するより、土層改良等によって根域が深く伸張可能となるような対応が必要であろう。従って、灌水労力を省力化しつつ乾燥時の灌水効果を高めるには、土壌条件の改善を行って根域を拡大し、土壌の水分供給力を高めておくことが有利であると考えられる。

4. おわりに

以上をまとめると、求められる灌水技術の考え方は、「根系に対して土壌がどれだけ水を供給しているのかを評価し、根系がどこからどのように水を吸収しているかを明らかにして、高品質のものをより多く得るために、水供給が重要な生育時期において、作物が水を必要とする時点を見極め、最低限必要な量を導出して、省力的に灌水する」というフローを具体化したものになろう。特に、未だ十分に解明されていない根系と土壌の動的な相互関係を水供給（吸収）の面から明らかにしていくことが、今後の合理的かつ節水的な灌水技術の発展につながるものと考えている。

引用文献

- 安養寺久男・小川茂男・福本昌人（1988）：降雨データから見た畑地かんがいの必要性和計画用水量軽減の可能性。北海道農試研究資料，**37**：103-141。
- 千葉県農林部・北総四大用水地域営農対策協議会編（1992）：畑地かんがいの手引き。pp. 1-192。
- 長 智男・矢野友久・中野芳輔（1986）：赤外放射温度計を用いた灌漑時期判定の試み。農土論集，**125**：37-44。
- 長谷川周一（1994）：作物の水・酸素要求に対する土壌の供給力。土壌の物理性，**69**：55-66。
- Hasegawa, S. and Eguchi, S. (2002) : Soil water conditions and flow Characteristics in the subsoil of a volcanic ash soil : Findings from field monitoring from 1997 to 1999. Soil Sci. Plant Nutr., **48** : 227-236。
- 畑地かんがい試験研究会（1997）：北海道における畑地かんがいの手引き—わかりやすい水のかけ方—。北海道農政部。pp. 101-155。
- 平沢 正（1995）：水環境が作物の生理・生態に及ぼす影響。土壌の物理性，**72**：39-46。
- 北海道開発局（1991）：葉面温度の遠隔測定によるかん水時期判定に関する検討調査報告書。
- 北海道農政部畑地かんがい検討中核委員会・北海道立中央農試経営部（1997）：畑地かんがい技術の経営・経済的評価。p. 50。
- 北海道農試（1993）：十勝地方の浅礫土地帯における主要畑作物の必要水供給量の推定。研究成果情報 北海道農業。北海道農業試験研究推進会議・農水省北海道農試。pp. 30-31。
- Israelsen, O.W. and Hansen, V.E. (1962) : Irrigation principles and practices, John Wiley & Sons, Inc.
- 石原 邦（1997）：水環境に対する植物の反応について。土壌の物理性，**76**：23-30。
- 岩田幸良・中野 寛・奥野林太郎（2004）：灌水量を減少させたときの畑作物収量の評価。農土論集，**231**：25-30。
- 鹿児島県農業試験場（1986）：畑かん栽培農家は問う～ここが知りたい～水利用技術に関する一問一答集。pp. 1-411。
- 鴨田福也（1982）：園芸作物における水分消費特性。土壌の物理性，**45**：19-26。
- 北村 亨・今 友親（1970）：主要畑作物の蒸散量と蒸発散量。道立農試集報，**20**。pp. 80-94。
- 河野 広・山田 盾（1984）：畑作物の水分反応の実態—畑地の水使用実態に関する研究（I）—。農土論集，**109**：1-7。
- 黒田正治・中野芳輔（1992）：第5章 灌漑スケジューリングと用水量。畑地灌漑の新展開。畑地農業振興会編。pp. 184-214。畑地農業振興会。東京。
- 丸山利輔・千家正照・木原康孝・西出 勤（1990）：土壌水の動態と下層からの毛管補給。農土誌，**58**(11)：1087-1091。
- Matsunaka, T., Takeuchi, H. and Miyawaki, T. (1992) : Optimum irrigation period for grain production for spring wheat. Soil Sci. Plant Nutr., **38** : 269-279。
- 宮下慶一郎・千葉行雄（1986）：寒冷地黒ボク土地帯における畑地灌がい栽培のための灌水基準。土肥誌，**57** (1) : 87-91。
- 宮下慶一郎・斉藤博之・千葉行雄（1988）：気象データに基づく土壌水分張力の推定。土肥講演要旨集，**34** : p. 7。
- 中辻敏朗（1995）：草地の水収支・乾物生産モデルを構築するために解決すべき問題点。土壌の物理性，**72**：47-54。
- 根の事典編集委員会編（1998）：6.1 土壌の物理性と根の生育。根の事典。pp. 228-229。朝倉書店。東京。
- 西出 勤（1992）：畑地の水利用実態と用水計画。畑地灌漑の新展開。畑地農業振興会編。pp. 75-81。畑地農業振興会。東京。
- 丹羽勝久・辻 修・大淵清志・菊地晃二（1999）：細粒

- 質褐色低地土に生成した耕盤層が土壌水分動態およびテンサイ根系発達に及ぼす影響. ペドロジスト, **43** (1): 7-14.
- 農林水産省構造改善局 (1982): 土地改良事業計画設計基準 計画 畑地かんがい, p. 35.
- 佐久間敏雄 (1994): 農耕地の土地評価における土壌物理性および物理的手法の重要性. 土壌の物理性, **69**: 49-54.
- 千家正照・木原康孝・西村直正・西出 勤・丸山利輔 (1990): 土壌水の動態と毛管補給量の実験的研究—下層からの毛管補給に関する研究 (I)—. 農土論集, **155**: 53-59.
- 志賀弘行 (2003): 作物モデルを活用した秋まき小麦の収量変動評価・予測法. 土肥誌, **74** (6): 835-838.
- 竹内晴信・松中照夫・市川信雄・宮脇 忠 (1996): 網走地域における主要畑作物に対するかん水指針. 土肥誌, **67** (4): 430-434.
- 竹内晴信・宮脇 忠 (1994): 有底枠における数種畑作物の水分消費特性. 土壌の物理性, **70**: 3-14.
- 竹内晴信・長谷川周一 (1995): カラム試験による毛管補給水分量の土壌間比較. 土肥講演要旨集, **41**: p. 3.
- 竹内晴信・小林英徳・吉江勝彦 (2004): 畑地かんがい実証モデル試験における作物増収効果. 第53回農
- 土学会北海道支部研究発表会講演集. pp. 186-191.
- 玉井虎太郎 (1971): 植物用水管理の理論と技術. 農業および園芸, **46** (9). pp. 1367-1370. および **46** (10). pp. 1507-1510. 養賢堂. 東京.
- 梅田安治・山上重吉・南部雄二 (1994): 富良野地域における畑地灌漑の圃場技術. 農土誌, **62** (5): 409-414.
- 和歌山県農林水産技術総合センター果樹試験場 (2004): ミカンかん水指標は葉の形態と果実の硬さ. 果樹試平成の成果集. <http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/070100/070/101/seika/kajusi/3-8.htm>
- 山上重吉 (1988): 北海道における畑地灌漑圃場技術の体系化に関する研究. 専修大北海道短大紀要 (自然), **21**: pp. 1-88.
- 山下重良・北野欣信・和田年裕・山村文三 (1979): ウンシュミカンの夏季干ばつ時における経済的かん水法とかん水指標に関する研究. 和歌山県果樹園芸試臨時報告. 2, pp. 1-21.
- 湯村義男 (1974): ハウス栽培と水(龍野得三編) pp. 22-32. 日本イリゲーションクラブ. 東京.
- 湯村義男 (1982): 6.3 土層別水分消費. 土壌物理性測定法. 土壌物理性測定法測定委員会編. pp. 235-241. 養賢堂. 東京.

要 旨

畑地灌漑施設の整備が進展し、露地作物への水利用場面が増えている。中でも検討が不十分と思われた土地利用型作物に対する灌水技術について、これまでの研究事例を概観し今後の技術開発に向けた課題を整理した。北海道では潜在的に水不足が生育を規制するが、大規模畑作での灌水利用は少なく増収効果も10%前後である。現場に必要な灌水技術として、灌水時期、灌水開始点、1回あたり灌水量、灌水に伴う問題の回避が挙げられる。特に収量品質を高めるためには、生育時期毎の灌水の必要性明示と灌水開始点の変設定が必要である。灌水開始判断のためには作物水分ストレスや土壌水分ポテンシャルを現場で迅速かつ簡便に測定評価し得るの手法の開発が必要である。また、根域を拡大し、毛管補給を含めた土壌の水分供給力を総合的に評価することで、灌水量や灌水労力の低減を図ることが重要である。

受稿年月日: 2005年4月26日
受理年月日: 2005年6月6日