

資 料

負圧水循環法による土壌水分制御とその応用

岩間秀矩・遅沢省子**・後田経雄*・久保田徹

Control of Soil Water Potential by the Negative Pressure Water Circulation Technique

Hidenori Iwama, Seiko Osozawa, Tuneo Ushiroda*, Toru Kubota

National Institute of Agro-Environmental Sciences, Tsukuba, Ibaraki, 305 Japan

*Nagasaki Prefectural Fruit Tree Experimental Station, Oomura, Nagasaki, 856-01 Japan

Key words : Control of soil water potential, negative pressure water, pump pressure, critical soil water potential for infection.

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn, 68, 69-76, 1993)

要 旨

減圧ポンプで負圧をかけた水を水流ポンプで循環させて土壌水分を制御する負圧水循環装置を開発した。装置は減圧調整系とホタンク・土壌ポット・配管よりなる循環系から構成された。循環系内の水圧は水タンクにかかる静圧に水流ポンプ揚水圧が加わるため、勾配が生じていた。この圧力勾配を利用して、連続的に数段階の水分制御を行うことができた。また、2個以上のポットを並列配置することにより等しい水分条件に制御できた。さらに、当装置を利用して、土壌の疎密とトウモロコシ根の吸水効率、ならびに、根こぶ病発生限界土壌水分の検討結果を紹介した。

1 はじめに

近年、わが国農業は集約度を高め、作物生育を量的のみならず質的にも最適化することを志向してきている(荒木1988,高辻1991)。他方、その予期せぬ帰結として、土壌に強いインパクトが加わり、各種の生理障害や土壌病害の発生、あるいは環境への負荷発生などの問題も生じてきている。こうした中で、土壌水分は作物生育、物質移動、ならびに根圏における根-微生物相互作用などを制御する基本的要因として重要であり、上記の目的および問題解決のために、より広い水分領域で精度良く

制御できる技術開発が強く求められている。

しかし、作物培地として土壌の水分を均等に精度よく調節する技術は相当に難しく、実用的なかんがい・排水技術における進歩に比べて殆ど前進が見られぬ分野となっている。20年以上前にKramer (1969)がその教科書に記載した方法の中で、Read et al. (1962)による"self-irrigator"は、わが国でも加藤・手島(1982)、谷川ら(1988)のグループにより検討されている素焼管を用いた負圧差かんがい法であるが、水分消費に応じて水分が毛管供給される原理であることから、培地水分を均一に保つ調整法として最も有望な方法と思われる。但し、この方法の問題点は、負圧下におかれた水は気泡を生じ易く、素焼管およびそれに連なるチューブ内に空気が溜まると水供給効率が著しく低下することである(谷川ら, 1988)。そこで、農業環境技術研究所土壌物理研究室では数年前より、ポンプで系内の水を強制循環させて気泡を排除する負圧水循環法の開発に取り組んできた(Lipic, et al. 1988, Iwama, et al. 1991)。その結果、負圧水循環法は負圧差かんがい法の持つ気泡集積の欠点を克服するのみではなく、広い範囲の土壌水分を制御可能とし、さらに、研究手法としても様々な応用場面が考えられることが明らかになった。ここでは当法の概要、原理およびいくつかの応用場面について紹介する。

農業環境技術研究所 〒305つくば市観音台3-1-1

**現四国農業試験場〒765普通寺市仙遊町

*長崎県果樹試験場〒856-01大村市鬼橋

キーワード：土壌水分制御，負圧水，ポンプ揚水圧，根吸水効率，根こぶ病発生限界水分

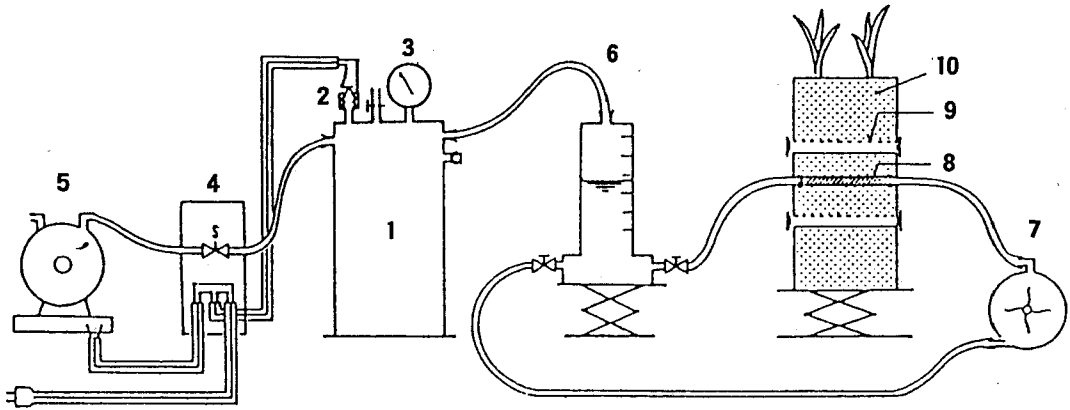


図-1 負圧水循環装置模式図 (Lipiec, et al., 1988)

- 1. 減圧タンク (硬質塩ビ製, 4 ℓ) 2. 圧力スイッチ (1~40cmHg, 感度±10mmHg)
- 3. 圧力計 4. 電磁弁 5. 真空ポンプ 6. 水タンク 7. 水流ポンプ
- 8. 素焼管 9. ポロプロピレンネット 10. 土壌

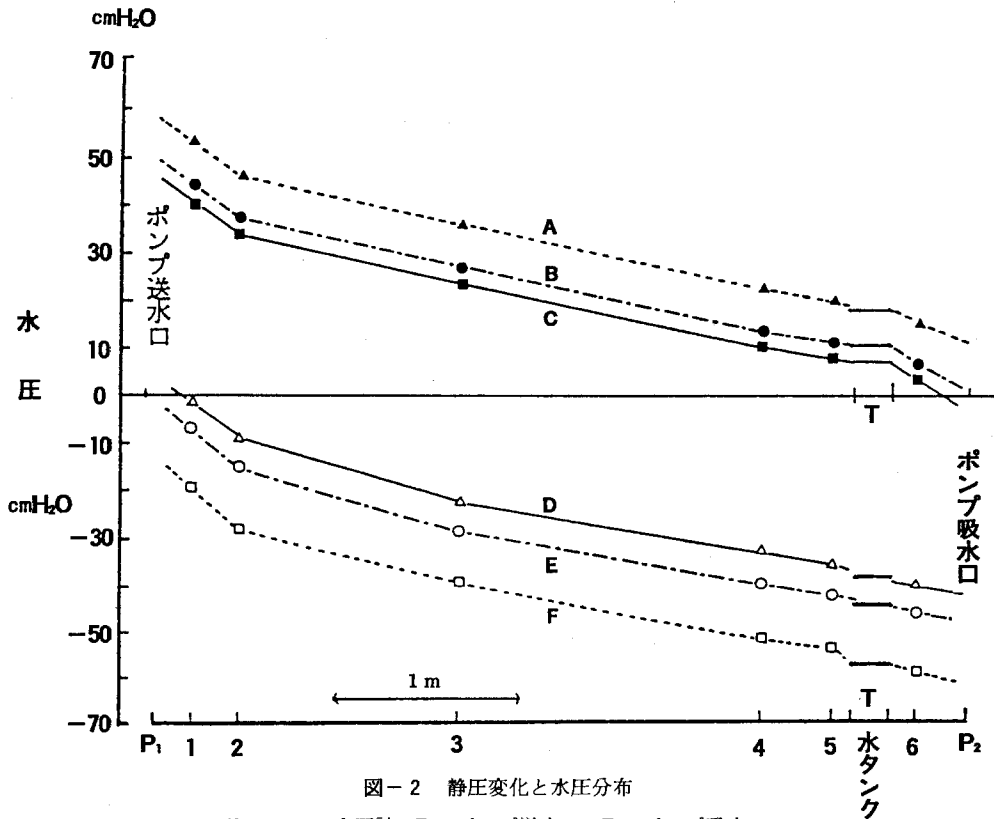


図-2 静圧変化と水圧分布

No.1~6 水圧計 P₁:ポンプ送水口 P₂:ポンプ吸水口

A,B,C: 大気圧下で、水タンク内の水位を変えた場合の循環系内の水圧分布を示す。ここでは、水タンクにおける静圧は水位に等しい。
 D,E,F: 水位をほぼ一定にして、水タンク上部の空気圧を減圧した場合の水圧分布を示す。水タンクにおける静圧は減圧値と水位の和となる。例えば、Fでは水位+19cmH₂O、減圧-74cmH₂Oであったので、静圧は-55cmH₂Oとなる。

2 負圧水循環装置の概要

図1にLipiecらにより最初に組み立てられた装置を示す。主に二つのサブシステムから構成される。一つは図左側1～5の空気圧調節系であり、減圧タンク、圧力（調整）スイッチ、減圧ポンプなどからなる。図右半部6～10は、水タンク、水流ポンプ、それらと土壌ポットが配管された循環系である。水タンク上部の空気圧が減圧され、循環系の水に負圧（大気圧より低圧の意）が作用し、土壌ポット内の素焼管を介して土壌水分が制御される。ポットにおける水分消費あるいは排水量は水タンク内の水位変化より測定される。

負圧水循環法は負圧差かんがい法の持つ利点に加えて、さらに、大きな負圧を減圧ポンプを用いて作用させることにより、重力排水の限界（圃場容水量）を越えた排水と水分調整を可能にし、また、系内に発生した気泡を循環する水で運び、水タンクの開放水面から排除しようとするものである。

3 負圧水循環法による水分ポテンシャル制御法

図2は負圧水循環系内の水圧分布の測定例を示したものである。循環系配管の各所に、パイプ内壁に垂直に内径1mmの透明チューブを取付け、静止時とポンプ作動時の水位差を測定して水圧とした。図2から、水タンクにかかる静圧、すなわち、減圧していない場合はタンク内水位（正圧）に、減圧をかけた場合は水位と減圧（ $-cmH_2O$ ）の和に従って水圧分布は平行移動すること、および、水流ポンプの送・吸水圧差（揚水圧）は一定であることが認められた。これにより循環系内の水圧分布は、水流ポンプにより作り出される水圧差と水タンクにかかる静水圧の合成であることが明らかになったが、図3に示す結果から、水タンクと水流ポンプの位置関係もまた、循環系内の水圧分布に大きく影響することが認められた。図3は、図2-Aと同様の測定後に、ポンプ送水口と吸水口への配管を入れ換えて接続した場合の水圧分布を示したものである。それによれば、ポンプ送水口に近接して水タンクが配置された場合には、水タンクの静圧より低い水圧が広く分布し、水タンクがポンプ吸

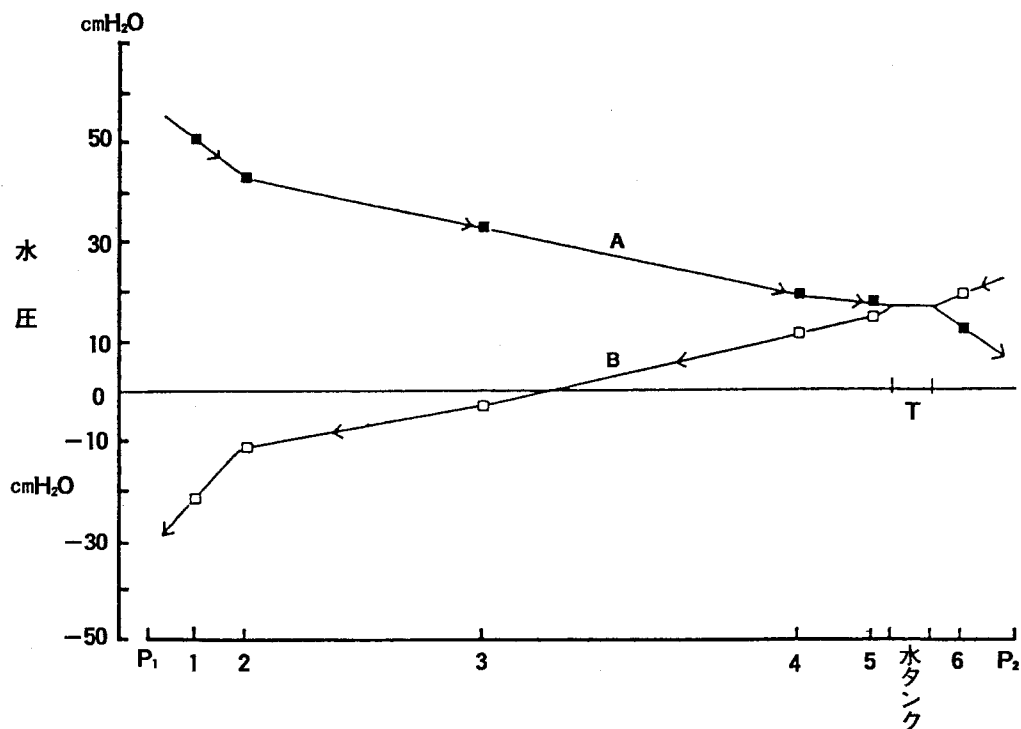


図-3 水タンクの配置と水圧分布

No.1～6 水圧計 P₁: ポンプ送水口 P₂: ポンプ吸水口

A: 大気圧下、水タンク水位18cmH₂Oにて、図2と同様の条件にて水循環させた場合の水圧分布。

B: Aの測定後、水流ポンプ送水口および吸水口への循環パイプの接続を入れ換えた場合の水圧分布。

表-1 チューブの径および長さによる水圧と流量の変化

チューブ 内径	長さ	水圧 (水頭)			流量 Q	Re数*	管摩擦** 係数(λ)	揚水圧*** mH ₂ O
		1 送水口	2 管末端	3 吸水口				
		mH ₂ O	mH ₂ O	mH ₂ O				
4	1.2	0.741	0.257	-0.070	10.8	3340	0.046	0.812
	2.4	0.850	0.198	-0.034	8.6	2728	0.046	0.884
	4.1	0.952	0.127	0.038	7.8	2508	0.041	0.990
5	1.3	0.510	0.180	-0.065	14.6	3690	0.045	0.575
	2.8	0.664	0.142	-0.047	12.6	3195	0.044	0.711
	4.4	0.775	0.137	-0.010	11.2	2840	0.045	0.785
	4.4 (ループ)	0.813	0.130	-0.010	10.4	2650		0.823

(タンク内水位はほぼ10cmとし、非減圧にて測定)

* Re数: レイノルズ数=vd/ν (v:流速, d:管径, ν:動粘性係数)

管摩擦係数(1式による) *揚水圧:水流ポンプ送・吸水圧差

表-2 循環系におけるポット配置が土壌水分吸引圧に及ぼす影響

配管	ポンプから の距離(cm)	空気減圧(水タンク)	
		-36cmH ₂ O	-122cmH ₂ O
直列	130	-40.5 cmH ₂ O	-109.3 cmH ₂ O
	180	-63.0	-121.8
並列	130	-43.0	-83.0
	130	-44.3	-84.3

と配管系の摩擦抵抗に関連しており、なめらかな円管における乱流条件では次式が適合する。

$$\text{水頭損失: } \Delta h = \lambda lv^2/2dg \quad (1)$$

ここで、λ:管摩擦係数, l:長さ, v:流速, d:内径, g:重力の加速度である。この式は経験式であるが、表1に示すように、チューブの内径と長さを変えて、水圧分布と流量を測定した結果から求めた樹脂チューブの管摩擦係数は0.045とほぼ一定であり、よく適合しているといえる。系内の圧力差はチューブが細く、また、長くなるほど増大することが判る。なお、表1における流量は、非減圧条件下で水タンクに流入するチューブを短時間はずし、チューブ出口を水タンク内水位と等しい高さにして、流出水量を10-20秒間測定して求めた。

表2は循環系において、直列に配置された二つのポットと並列に配置されたポットの土壌水分吸引圧値を示したものである。直列配置された2個のポットの水分吸引圧値は異なり、ポンプ送水口より離れたものほど水分吸引圧値は大きくなった。他方、並列配置では2連のポットの水分吸引圧はほぼ等しい値を示した。

水口に近い場合には、タンクの静圧より高い水圧が広く分布していた。これは水タンクではその配置にかかわらず静圧だけが水圧を構成する一方、ポンプの送・吸水圧差は配管の太さや長さが同じであればほぼ一定であり、水タンク静圧の前後に、配管の長さの比に応じて配分されるものと考えられる。すなわち、水タンクはその静圧とともに循環系内の位置により水圧分布を制御している。

このように、負圧水循環系における水圧分布の特徴は、静圧に加えて水流ポンプによって作られる圧力勾配が生じることである。この圧力勾配はポンプの能力(仕事率)

表-3 トウモロコシ根の吸水効率と土壌密度

播種後日数	土層 cm	水消費量		根長 (cm/ポット220ml)		根吸水効率 (10 ⁻² g水/cm根・日)	
		疎充填	密充填	疎充填	密充填	疎充填	密充填
1-8	0.7-5	8.45	8.31	402	481	0.903	0.744
	5-10	8.24	10.16	394	315	1.046	1.612
	10-15	2.40	0.82	172	161	0.698	0.255
	0.7-15	19.09	19.29	968	957	0.986	1.007
8-13	0.7-5	1.46	0.52	509	538	0.197	0.067
	5-10	16.74	25.18	2056	1084	0.651	1.858
	10-15	1.84	2.28	788	1015	0.187	0.180
	0.7-15	20.04	27.98	3353	2637	0.478	0.840

誌) 供試土壌:細粒灰色低地土
疎充填: B. D. 1.0
密充填: B. D. 1.3

(Lipiec, et al, 1988.より作成)

表-4 水分吸引圧とねこぶ病の発生

系	水分吸引圧 cmH ₂ O	発病度 (株数) ¹⁾				発病指数 ²⁾	根重 g/4株
		0	1	2	3		
L ³⁾	低 1	30	0	0	0	4	2.7 ³⁾
	2	47	0	0	0	4	7.9
	庄 3	62	0	0	0	4	13.6
	4	77	0	0	0	3	1.7 ⁶⁾
	系 5	90	0	2	1	1	1.8
中	6	90	1	1	1	1	1.5
	7	97	0	2	0	2	2.0
	8	110	2	1	1	0	0.7
H ⁴⁾	庄 9	120	4	0	0	0	0.0
	10	135	4	0	0	0	0.0
	11	153	4	0	0	0	0.0
	系 12	162	4	0	0	0	0.0

(四季蒔きこかぶ, 播種 1988.9.14, 調査 10.18.)

- 注) 1) 播種後10日間平均値
 2) 発病指数 = Σ (発病度 × 株数) / (総株数)
 3) 水タンクにおける減圧 -39cmH₂O
 4) 水タンクにおける減圧 -127cmH₂O
 5) 湿害
 6) 他の土壌病害併発

以上の結果から、負圧水循環法における水分分布制御法の原則は次の通りである。

①系内に平準化した水圧分布を得るには、流速を低下させることが効果的である。流速の低下にはチューブ径を大きくする、ポンプ性能を落とす、並列配管により分流する等が考えられる。特に、二つ以上のポットを等しく水分制御しようとする場合には、並列配置が实际的で優れる。

②水タンク内の水位変動は、特に負圧が小さい領域では吸引圧の制御精度に影響するので、消費水量の測定精度の許す範囲で水位変動を小さくするようにする。

③系内の水圧勾配を利用して、連続的水圧分布を得ることができる。水圧分布範囲を大きくするには、揚水圧を大きくする必要があり、そのためは、高出力のポンプを用いる他に、チューブ径を細く、かつ、長くすることが効果的である。

④負圧水循環法では空気減圧値が直にはポット土壌水分吸引圧値とならない。水タンクにおける静圧値は空気減圧値と水位(タンクの水位とポット内素焼管の高低差)との差であり、加えて循環系内の水圧勾配による変化が加算される。したがって、特定の水分吸引圧値に土壌水分を精密に設定したい場合には、まず希望する吸引圧値に近い空気減圧値において循環装置を作動させ、平衡後、ポットの土壌水分吸引圧をテンシオメータで実測する。図1にて示したように、水タンクの静圧の変化にもなつて循環系の水圧は平行移動するので、実測吸引

圧と希望吸引圧の差に等しい値を空気減圧値から増減する。

⑤当装置による水分吸引圧制御の精度はおよそ±数cmH₂Oである。

4 負圧水循環装置による土壌水分制御の応用例

4-1) 密度の異なる土壌中におけるトウモロコシ根の吸水効率の測定

目的：土壌密度・根分布が根の吸水効率に及ぼす影響を明らかにする。

方法：実験装置は図1に示したが、土壌ポットは内径7.5cm高さ5cmの円筒を、上下の土層間の水毛管移動が生じないように、5mmの間隔をおいて三段に重ね、中層に素焼管を通し、負圧水を供給した。土壌は細粒灰色低地土を用い、中層の充填密度をB.D.1.0および1.3Mg/m³とし、水分吸引圧はpF2.4とした。トウモロコシを播種後2週間栽培し、各土層別に水分と根量(長さ)を調査した(表3)。

結果の概要：①中層では負圧水循環系から水分が供給され、栽培期間中水分はほぼ一定に維持され、水消費量も最も多くなった。

②密充填土層では根量は少ないが、水消費量は多く、したがって、根の吸水効率が高くなった。これは、供試した細粒灰色低地土(4mm>)は強粘性で径2-5mmの塊状を呈し、充填度が増すことにより、不飽和透水性が向

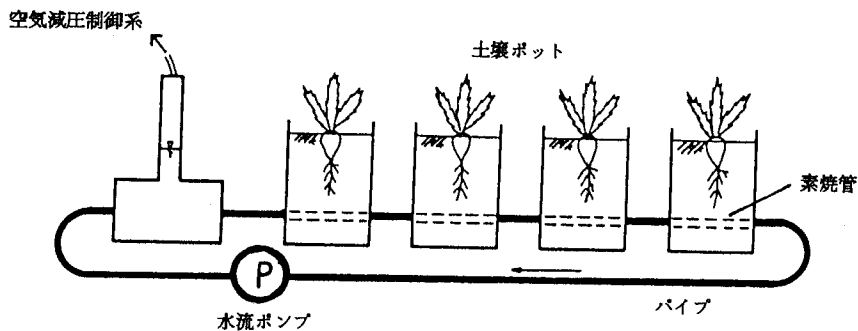
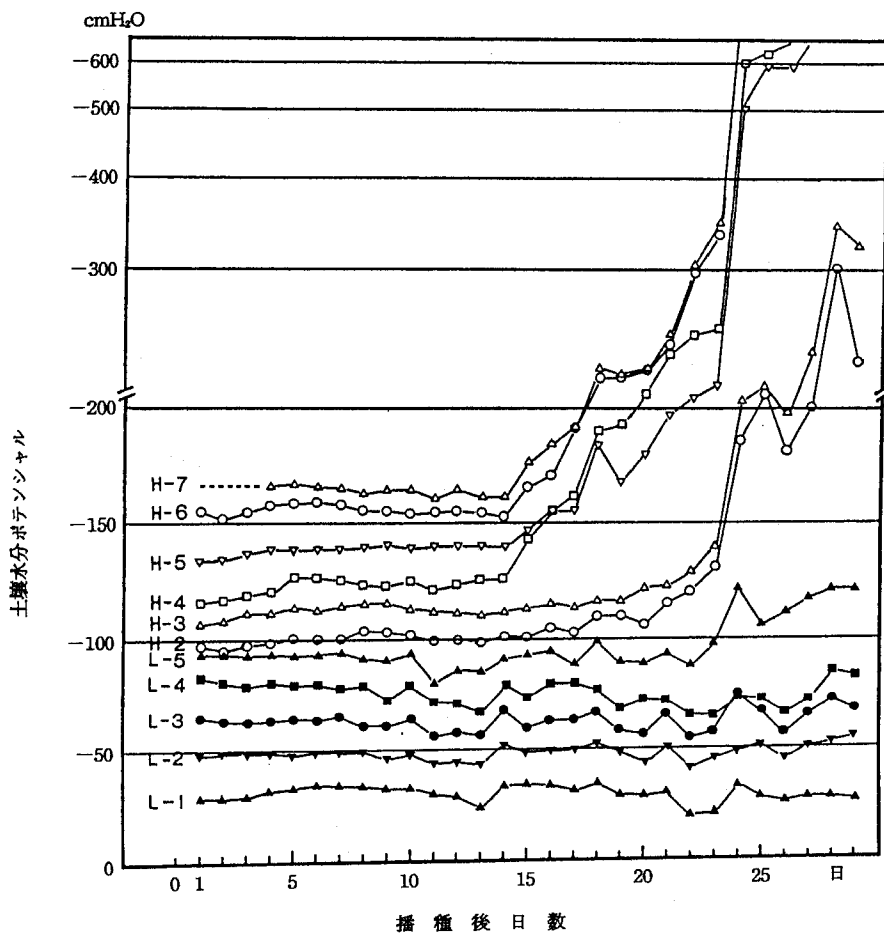


図-4 土壌ポットを直列配置した負圧水循環装置



L-1～5：低減圧（ $-39\text{cmH}_2\text{O}$ ）負圧水循環系のポット
 H-2～7：やや高減圧（ $-127\text{cmH}_2\text{O}$ ）負圧水循環系のポット
 （H-1はL-5と重複したため省略）

図-5 土壌水分のコカブ栽培期間における推移（播種1988年9月14日）

上したことによると推定された (Lipiec, et al. 1988)。

4-2) 根こぶ病発病限界土壌水分の解明

目的：アブラナ科野菜の根こぶ病は、変形菌の一種による難防除性の土壌病害であるが、その発生は土壌の排水状態に強く関連している (内記1987)。根こぶ病菌遊走子の移動性は土壌水分によって規制され、乾燥水分域では感染が起こらず、その限界水分はおよそ $-150\text{cmH}_2\text{O}$ 付近であるとされている (Dobson, et al. 1982)。しかし、この値は土壌水分が $-50\text{cmH}_2\text{O}$ 以上の間隔で調節された実験から得られたものであり、より詳細な検討が必要である。

方法：直径7.5cm高さ10cmの塩ビ円筒 (400ml容) に素焼管 (直径0.8cm,長さ6.0cm) を通した小ポットに、根こぶ病菌孢子接種土 (黒ボク土畑表土, 孢子濃度 $10^6/\text{cm}^3$) を380ml充填した。この小ポットを図5-aに示すように、数個直列に連結して負圧水を循環させることにより (装置を2基使用)、 $-30\sim-162\text{cmH}_2\text{O}$ の範囲で十数段階の水分制御を行った。コカブをポット当たり4株、1カ月間栽培後、根部を水洗し病徴を観察した。

結果の概要：①栽培期間中ポット土壌水分は、根こぶ病感染に重要とされる発芽初期を含む播種後15日付近まではほぼ所定の吸引圧値を維持した。15日以後、コカブの成長にともない水消費量が 5mm/day 以上に急増し、 $-100\text{cmH}_2\text{O}$ 以下に設定されたポットでは供給が追いつかない状態となった。消費水量 5mm は供試黒ボク土の $\text{pF}1.8\sim 2.3$ 域における保水量 (5vol.%, ポットあたり20ml) にほぼ等しく、また、素焼管表面 (表面積約 13cm^2) から土壌への毛管伝導量 $1.5\text{ml}/\text{cm}^2/\text{day}$ は、黒ボク土の $\text{pF}2$ 付近における不飽和透水性に相当するものと考えられる。②また、 $-80\text{cmH}_2\text{O}$ 以上に設定されたポットにおいても、やはり後半、設定吸引圧の変動が大きくなった。これは水タンクの容量不足から、水消費の増大にともない一日に3、4回水を補給しても、水位の日変動が 20cm 以上にもなった影響を受けたと推定された。③根こぶ病は $-100\text{cmH}_2\text{O}$ 以上の多水分状態ではほぼ100%発病し、他方、 $-120\text{cmH}_2\text{O}$ 以下の水分では全く発病がみられず、発病限界水分値は $-115\text{cmH}_2\text{O}$ 付近であることが認められた (表4, Iwama, et al. 投稿中)。

5 負圧水循環法の活用と問題点

以上紹介してきたように、負圧水循環方式による土壌水分制御法は、比較的簡単な装置で精度よく水分を制御し、消費水量や排水量の計測が出来るものである。今後、研究面のみならず実用的にも活用されることが期待でき

る。ここで、当方法の想定される活用場面とその限界、問題点についてまとめておく。

負圧水循環法の利点は、調節可能な水分吸引圧の範囲が広く、また、設定値の切り換えが随時可能なことである。応用例2では、使用した土壌ポットが小さかったために、栽培後期には、作物による消費水量の増大に供給が不足し、設定吸引圧値が維持できなくなる状態を生じたが、大容量 (7L) のポットを用いた栽培例では、 $\text{pF}2.2$ に設定されたポットでも、45日間の栽培中、精度よく設定水分値を維持できたことが確認されている。しかし、水分供給装置としては、土壌の不飽和透水係数が急減する $\text{pF}2.4, 5$ 付近が限界と思われる。他方、品質向上等のために作物への水分ストレスを望む場合には、 $\text{pF}2.5$ 以上の高吸引圧により排水を促進することが有効となろう。

当法では設定水分状態の切り換えが空気減圧度の調節だけで可能であり、作物の生育時期別の pF 制御や、上記、土壌病害発生解析などの実験手法として優れている。

また、消費水量の計測法としての利用には、例えば重量法では計測困難な大型容器による栽培試験などが考えられる。

当方法の問題点は、上記の原理的な限界の他には、資材や施設的なものがある。素焼管に代わる丈夫な多孔質チューブの開発、給・排水量計測の自動化、ならびに水の補給の自動化が必要である。

引用文献

- 1) 荒木陽一 (1988) : 低温期における施設野菜の生育異常と水管理, 土壌の物理性, 57, 2-7.
- 2) Dobson, R.L., Gabrielson, R.L., and Baker, A. S. (1982) : Soil water matric potential requirements for root-hair and cortical infection of chinese cabbage by *Plasmodiophora brassicae*. *Phytopathology*, 72, 1598-1600.
- 3) Iwama, H., Kubota, T., Ushiroda, T., Osozawa, S., and Katou, H. (1991) : Control of soil water potential using negative pressure water circulation technique. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 37, 7-14.
- 4) Iwama, H., Osozawa, S., Ushiroda, T., and Kubota, T. (1993) : Analysis of soil water matric potential requirement for infection of turnip with *Plasmodiophora brassicae* using negative pressure water circulation technique. *Soil Sci. Plant Nutr.*, (印刷中)

- 5) 加藤善二・手島三二 (1982) : 負圧差灌漑の原理と基礎的検討, 農土論集, 101, 46-54.
- 6) Kramer, P. J. (1969) : Plant and soil water relationships. p. 89-97, McGraw Hill. New York.
- 7) Lipiec, J., Kubota, T., Iwama, H., and Hirose, J. (1988) : Measurement of plant water use under controlled soil moisture conditions by the negative pressure water circulation technique. Soil Sci. Plant Nutr., 34, 417-428.
- 8) 内記 隆 (1987) : アブラナ科野菜根こぶ病菌の生活環からみた防除視点, 土と微生物, 29, 25-39
- 9) Read, D. W. L., Fleck, S. V., and Pelton, W. L. (1962) : Self-irrigating green-house pots. Agron. J., 54, 467-468.
- 10) 高辻豊二 (1991) : 温州ミカンの水分制御による糖度向上技術, 農業技術, 46, 398-402.
- 11) 谷川寅彦・矢部勝彦・手島三二 (1988) : 土壌別管内負圧の設定法と気泡排除対策-地下灌漑に関する実験的研究 (VI) - , 農土論集, 137, 17-23.

(受稿年月日 1993年8月11日)