

第Ⅳ章 根腐病の生態的防除法の確立

第Ⅰ節 根腐病の発生軽減を目的とした窒素施肥法

前章において、根腐病は土壌中の無機成分とりわけ $\text{NO}_3\text{-N}$ が欠乏した場合に多発生することが明らかとなった。そこで、本節では露地栽培の夏どりハウレンソウにおける根腐病の発生を軽減することを目的とした窒素の肥培管理法について検討した。ハウレンソウは北海道では夏どり栽培以前に春から初夏にかけて1ないし2作栽培されるため、土壌中に $\text{NO}_3\text{-N}$ を主体とした窒素成分が相当量残存している。このことを考慮し、土壌の残存 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量に対応した窒素施肥量を策定した。

1. 土壌の残存 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量を異にする圃場における根腐病の発生に及ぼす窒素施肥量の影響
実験方法

1) 柰圃場における実験

1986, 1987年に北海道立中央農試圃場の土壌が充填されている 1 m^2 の農試木柰圃場で実験を実施した。木柰圃場の造成は1980年に行われており、土壌の理化学性はほぼ均一となっていた。

1986年には土壌の残存 $\text{NO}_3\text{-N}$ 3水準 (22.4, 42.3, 74.7 $\text{mg}/100\text{ g}$) $\times$ N施肥量3段階 (無施用, 7.5, 15.0 $\text{kg}/10\text{ a}$) の計9処理 (3反復) を、1987年には土壌の残存 $\text{NO}_3\text{-N}$ 3水準 (3.3, 10.4, 19.0 $\text{mg}/100\text{ g}$) $\times$ N施肥量3段階 (無施用, 7.5, 15.0 $\text{kg}/10\text{ a}$) の計9処理 (2反復) をそれぞれ設定した。両年とも、残存 $\text{NO}_3\text{-N}$ の水準は施肥前に硝酸カルシウムで造成した。なお、1986年は硫安、1987年は硝安の形態で窒素施肥を行った。標準窒素施肥量は $15.0\text{ kg N}/10\text{ a}$ である²⁴⁾。両年を通じ共通施肥として、 K_2O (硫加) : $10\text{ kg}/10\text{ a}$ 、 P_2O_5 (過石) : $10\text{ kg}/10\text{ a}$ 、炭カル : $200\text{ g}/\text{m}^2$ を全処理区に施用した。

1986年の7月13日にハウレンソウ種子を柰当り3畦 (畦間20 cm, 畦長1 m) に対して手播きし

た。覆土直前に *A. cochlioides* の含菌寒天を接種した。菌の培養および接種方法は次の通りであった。*A. cochlioides* を径9 cmのペトリ皿内のCM A培地 (Difco 社製) 上で26日間、室温で培養した。得られた1ペトリ皿分の含菌寒天を40 mlの殺菌水との懸濁液とし、これを1畦当りに接種した。種子の頭上から懸濁液を散布した。子葉期 (7月24日) と収穫期 (8月12日) に根腐病の発生状況を調査し、収穫期には収量調査も併せ行った。

1987年は前年と同じ木柰圃場で実験を行った。前年に接種による病土を造成したので、*A. cochlioides* の接種は行わなかった。7月29日に播種し、9月2日の収穫時に調査を行った。

2) 現地における実験

1987年に札幌市有明地区の農家1圃場 (褐色低地土, 中粒質) で実験を行った。根腐病が多発生する圃場である。1作日収穫後の7月4日に採取した土壌の残存無機態窒素含量は、 $\text{NO}_3\text{-N}$: 14.4 $\text{mg}/100\text{ g}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$: 1.3 $\text{mg}/100\text{ g}$ であった。土壌の化学性は、 pH : 5.5, $\text{Truog-P}_2\text{O}_5$: 140 $\text{mg}/100\text{ g}$ 、 $\text{ex-K}_2\text{O}$: 88 $\text{mg}/100\text{ g}$ 、 ex-CaO : 382 $\text{mg}/100\text{ g}$ 、 ex-MgO : 25 $\text{mg}/100\text{ g}$ 、塩基交換容量 18 $\text{me}/100\text{ g}$ であった。

処理区として、N施肥量3段階 (無施用, 7.5, 15.0 $\text{kg}/10\text{ a}$ 、1処理区 12 m^2) を2反復設定し、硝安を施用した。また、全処理区に K_2O (硫加) : $10\text{ kg}/10\text{ a}$ 、 P_2O_5 (過石) : $10\text{ kg}/10\text{ a}$ を施用した。7月13日にハウレンソウ (品種 : グローバル) を播種した。子葉期 (7月25日) と収穫期 (8月14日) に根腐病の発生状況を調査した。収穫時には収量調査も併せ行った。

結 果

1986年の柰圃場における実験結果 (Table 32) をみると、施肥前の土壌の残存 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量が概ね $40\text{ mg}/100\text{ g}$ 以上では、*A. cochlioides* の検出率が低く、根腐病の発生は少なかった。しかし、

Table 32. Effect of nitrogen application on severity of root rot and on the growth of spinach at various levels of remaining nitrate nitrogen in soil^{a)}

1) Incidence of root rot and growth of spinach

Content of NO ₃ -N remaining in soil before fertilizer application (mg/100g)	Rate of nitrogen application as ammonium sulfate (kgN/10a)	Cotyledonary stage (24 July)		Harvest time (12 Aug.)		
		Germination (no./m ²)	Damping-off (%)	Surviving plants (no./m ²)	Root rot (%)	Weight of 10 plants (g. healthy)
22.4	0	133	39.4	30	65.9	86
	7.5	124	33.4	44	13.0	166
	15.0	164	13.0	60	9.4	220
42.3	0	139	20.4	56	10.1	175
	7.5	150	18.8	76	8.3	164
	15.0	130	17.4	44	16.5	117
74.7	0	140	16.9	55	13.3	128
	7.5	128	16.4	27	2.3	194
	15.0	119	20.4	56	7.1	112

a) Experiment at frame field of 1m² in Hokkaido Central Agricultural Experiment Station (1986).
Suspension of mycelial mat of *A.cochlioides* grown on corn meal agar was inoculated to soil at the sowing time.

2) Detection of *A. cochlioides* from cotyledonary plant

NO ₃ -N remaining in soil before fertilizer application (mg/100g)	Rate of nitrogen application as ammonium sulfate (kgN/10a)	Cotyledonary stage (24 July)		
		% of detection of fungi ^{a)}		
		<i>A. cochlioides</i>	<i>Pythium</i>	<i>Rhizoctonia</i>
22.4	0	70.0	7.5	0
	7.5	50.0	0	0
	15.0	17.5	5.0	5.0
42.3	0	17.5	0	0
	7.5	15.0	22.5	7.5
	15.0	17.5	15.0	2.5
74.7	0	7.5	7.5	7.5
	7.5	0	2.5	12.5
	15.0	0	2.5	0

a) Fifteen plants were collected from each plot at random.
No. of root segments tested was 40.

このような高い窒素水準では窒素施肥に伴い生育は抑制される傾向にあった。一方、Table 33 から判るように施肥前の残存 NO₃-N 含量が 3.3 mg/100 g と低い水準では、15 kgN/10 a 区の根腐病の発生が窒素無施用区に比べて低下 (10.4%) したが、中および高窒素水準の 15 kgN/10 a 区 (5.5,

6.1%) に比べるとやや高い発病株率を示した。このことから、3.3 mg/100 g 程度の低窒素水準では、より高い発生抑制効果を得るためには、標準施肥量 (15 kgN/10 a) 以上の窒素施肥量が必要であることが示唆された。

1986, 1987 両年の枠圃場における結果を通じ

Table 33. Effect of nitrogen application on severity of root rot and on the growth of spinach at various levels of remaining nitrate nitrogen in soil^{a)} (1987)

NO ₃ -N remaining in soil before fertilizer application (mg/100g)	Rate of nitrogen application as ammonium nitrate (kgN/10a)	Harvest time (2 Sept.)		
		Surviving plants (no./m ²)	Root rot (%)	Weight of 10 plants (g, healthy)
3.3	0	63	33.6	65
	7.5	94	17.6	119
	15.0	92	10.4	131
10.4	0	70	22.3	125
	7.5	80	16.3	126
	15.0	136	5.5	130
19.0	0	95	9.5	122
	7.5	156	6.7	128
	15.0	123	6.1	133

a) Experiment at the same frame field as used in 1986.

A. cochlidioides was not inoculated in 1987, because infested soil was made in the preceding year.

Table 34. Effect of nitrogen application on severity of root rot and on the growth of spinach at open field in Sapporo city^{a)}

1) Incidence of root rot and growth of spinach

Rate of nitrogen application as ammonium nitrate (kgN/10a)	Cotyledonary stage (25 July)		Harvest time (14 Aug.)			
	Germination (no./row)	Damping-off (%)	Surviving plants (no./row)	Root rot (%)	Healthy plant	
					Height (cm)	Leaves (no.)
0	65	41.5	35	29.7	19.8	10.9
7.5	68	23.6	38	10.6	22.9	12.3
15.0	92	12.3	41	13.2	23.6	12.4

a) Field experiment at a field in Ariake area (1987).

Content of nitrate nitrogen remaining in soil before fertilizer application was 14.4 (mg/100g).

Plants in 3 m per row were investigated.

2) Content of inorganic nitrogen in soil and detection of *Aphanomyces* sp. from spinach

Rate of nitrogen application as ammonium nitrate (kgN/10a)	Cotyledonary stage (25 July)						
	pH	EC (mS/cm)	Inorganic nitrogen (mg/100g)		% of detection of fungi ^{a)}		
			NO ₃ -N	NH ₄ -N	<i>Aphanomyces</i>	<i>Pythium</i>	<i>Rhizoctonia</i>
0	5.9	0.19	4.4	1.6	70	10	0
7.5	5.7	0.24	6.3	1.4	65	0	0
15.0	5.6	0.33	12.3	1.7	30	5	0

a) Twenty plants were collected at random. No. of root segments tested was 20.

(Table 32, 33), 施肥前の残存 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量が 15 mg/100 g 前後では標準施用区 (15 kgN/10 a) で高い効果が認められた。すなわち, 同処理区では根腐病の発生が低下し, 生育も優れた (Plate VI-1, 2)。このことは, 現地試験においても実証された。すなわち, 土壌の残存 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量が 14.4 mg/100 g の場合, 窒素減肥区に比べて 15 kgN/10 a 区では, 立枯れ株率および根腐れ株率が低く, さらに発芽および生育が良好であった (Table 34)。なお, 子葉期株の根部からの糸状菌の検出状況からみて, 立枯れ株の主な原因は *Aphanomyces* 属菌による根腐病であると判断された。

2. ホウレンソウの生育に及ぼす施用窒素形態の影響

実験方法

1987 年に北海道立中央農試のホウレンソウ初作の圃場で実験を実施した。供試圃場の土壌の化学性は, pH: 6.5, EC: 0.03 mS/cm, Truog- P_2O_5 : 39 mg/100 g, ex- K_2O : 30 mg/100 g, ex- CaO : 215 mg/100 g, ex- MgO : 129 mg/100 g,

塩基交換容量 15 me/100 g であった。

処理区として, 施用 N 形態 4 種類 (硫酸, 塩安, 硝安, 硝酸石灰) $\times$ N 施肥量 3 段階 (10, 20, 40 kg/10 a) の計 12 処理 (2 反復, 1 処理区 12 m^2) を設定した。20 kgN/10 a 区を標準区とした。全処理区に対して, K_2O (硫加): 12 kg/10 a, P_2O_5 (過石): 10 kg/10 a を施用した。

5 月 28 日にホウレンソウ種子を播種した。畦幅は 30 cm であった。子葉期に間引きを行い, 株間を約 7 cm に調整した。6 月 24 日に生育調査を, 7 月 9 日に収量調査を行った。

結 果

6 月 24 日の生育中期の草丈は, いずれの窒素形態とも 10 kgN/10 a 区において優っており, 窒素施用量の増加に伴い漸次草丈が低下した (Table 35)。10 kgN/10 a 区で比較すると, 硝酸石灰 > 硝安 > 塩安 $\geq$ 硫酸の順に草丈が高く, 生育は旺盛であった。その後, 生育の進展に伴い 20 kgN/10 a 区では生育が顕著に回復し, 収穫時の結果ではいずれの窒素形態とも 20 kgN/10 a 区の生育が最も優った。20 kgN/10 a 区の 10 株重で比較する

Table 35. Effect of form of nitrogen fertilizer on growth of spinach^{a)}

Form of nitrogen fertilizer	Rate of nitrogen application (kgN/10a)	Middle growth stage (24 June)				Harvest time (9 July)			
		Soil pH	EC (mS/cm)	Inorganic nitrogen (mg/100g soil)		Plant height (cm)	Plant height (cm)	Leaves (no.)	Weight of 10 plants (g)
				$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$				
Ammonium sulfate	10	5.7	0.20	4.4	1.4	6.6	23.9	10.4	410
	20	5.5	0.35	7.9	3.5	5.8	27.2	10.8	613
	40	5.2	0.53	11.5	12.7	4.5	23.9	10.6	498
Ammonium chloride	10	5.9	0.20	3.7	1.2	7.0	26.7	10.2	471
	20	5.6	0.37	5.0	7.0	5.2	25.1	9.9	478
	40	5.5	0.55	5.0	17.5	4.0	17.2	9.4	213
Ammonium nitrate	10	5.9	0.15	6.1	0.5	7.7	27.9	10.8	507
	20	5.6	0.29	14.2	1.7	7.1	31.5	11.2	731
	40	5.4	0.43	22.5	7.0	6.1	29.8	10.2	627
Calcium nitrate	10	6.0	0.16	6.1	0.5	8.8	31.1	9.8	658
	20	5.8	0.35	18.8	0.7	7.5	33.5	10.0	702
	40	5.7	0.55	36.5	0.9	5.8	30.1	9.6	640

a) Field experiment at an open field in Hokkaido Central Agricultural Experiment Station (1987).

と、硝安>硝酸石灰>硫酸>塩安の順に生育は旺盛であった。これらのことから、 $\text{NO}_3\text{-N}$ を含有する窒素肥料がハウレンソウの生育にとって望ましく、その適正な窒素施用量は $20 \text{ kg}/10 \text{ a}$ 前後であることが示唆された。なお、 $\text{NO}_3\text{-N}$ を含む窒素質肥料施用系列では生育中期の土壤分析の結果、次のことが認められた (Table 35)。①硫酸系列に比べて、土壌 pH の低下が小さい。②塩安系列や硫酸系列に比べて、生育初期から、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が土壤中に十分存在していた。

考 察

Aphanomyces 病の発生を施肥により抑制しようとする試みは、特に *A. euteiches* によるエンドウの根腐病についてなされている^{16,19,90)}。本節ではハウレンソウ根腐病の発生軽減のための露地における窒素施肥法について枠圍場での接種実験と現地実験により検討した。その結果、根腐病の防除効果とハウレンソウの生育に対する影響の両側面を勘案すると、望ましい窒素施用量は次のようにとりまとめることができる。①土壌の残存 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量が $5 \text{ mg}/100 \text{ g}$ 以下の場合には防除効果からみて標準の窒素施用量 ($15 \text{ kgN}/10 \text{ a}$) よりもやや多めの $20\sim 25 \text{ kgN}/10 \text{ a}$ を施用する。②同 $15 \text{ mg}/100 \text{ g}$ 前後では防除効果および生育面からみて、 $15 \text{ kgN}/10 \text{ a}$ が妥当である。③同 $40 \text{ mg}/100 \text{ g}$ 以上では窒素過剰による生育抑制が起こるので窒素は無施用とする。

さらに、施用窒素形態としては $\text{NO}_3\text{-N}$ を含有する窒素肥料が次の理由から望ましいと結論される。① $\text{NH}_4\text{-N}$ に比べて $\text{NO}_3\text{-N}$ の根腐病発生軽減に対する効果は高い (第 III 章第 1 節の Table 24)。② $\text{NO}_3\text{-N}$ を含有する硝安、硝酸石灰施用区ではハウレンソウの生育が旺盛であった。また、これらの処理区では土壌 pH の低下が小さく、生育初期から土壌の $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量が多かった (Table 35)。

ハウレンソウ²⁶⁾、テンサイ⁸²⁾などのアカザ科植物は好硝酸性であることや、田中ら^{80,81)}が指摘しているようにハウレンソウは耐酸性が極めて弱いことを勘案すると、生育の面からみても $\text{NO}_3\text{-N}$ を含有する窒素肥料を施用することは妥当である

と判断される。

第 2 節 ハウスにおける太陽熱利用による防除対策

ハウレンソウの土壤病害に対する防除の一環として、近年、西南暖地で普及を見ている太陽熱による土壤消毒^{3,27,42-45,73,93)}の導入が考えられる。現に、北海道でもキュウリのつる割病³⁰⁾やトマトの半身萎ちょう病⁸⁶⁾に対する処理効果の確認並びに処理法の確立がなされており、この処理法は道央、道南の現地ハウスを対象に浸透しつつある。したがって、雨よけハウス栽培のハウレンソウ(以後、雨よけハウレンソウ)の土壤病害に対する処理効果も期待できるものと予想される。ところが、地温上昇の点から見てやや不利な気象条件下にある北海道では、太陽熱による土壤消毒を実施する場合、地温を上昇させるための方策が必要となる。また、太陽熱処理は地温の上昇し易い夏期に限られるため、処理期間が長いと、夏どりハウレンソウの栽培期間と重なるので、営農上、処理期間は短くならざるを得ない。

そこで、本節では雨よけハウレンソウの根腐病はもとより、各種の土壤病害に対する短期処理を前提とした寒地向けの太陽熱による土壤消毒法を検討した。

1. ハウレンソウの病原糸状菌の死滅に必要な温度と加温時間

実験方法

ハウレンソウの主要病原糸状菌の死滅に必要な太陽熱処理時の地温を推定するため、病原糸状菌の死滅温度と加温時間をモデル実験により検討した。Table 36 に示した各供試菌株と殺菌水との懸だく液 4 ml の入った試験管 (3 反復) を、 $37, 40, 45, 50^\circ\text{C}$ に調節した恒温器内に入れ、2 週間加温した。この間、経時的に菌の生死を調査した。なお、加温方法として太陽熱処理時の地温変化を想定し、変温処理を行った。すなわち、1 日のうち 8 時間を上記の高温で、残りの 16 時間を 25°C で加温した。

次に、加温処理後の各懸だく液をピペットでペトリ皿内の寒天培地上に一滴づつ 4 箇所接種

Table 36. Pre-culture condition and organ formation of pathogens used in experiment of Table 37

Pathogen (isolates)	Mediums used for pre-culture	Days of incubation ^{a)}	Plates ^{b)} (no.)	Formation of organs
<i>Pythium</i> sp. (Py-1)	Schmitthenner's medium	7	5	Zoosporangia, Mycelia
<i>P. ultimum</i> (Py-11)	Schmitthenner's medium	7	5	Zoosporangia, Mycelia, Oospores
<i>R. solani</i> AG-4 (R-1)	PDA ^{c)} (Difco)	7	1	Mycelia
<i>A. cochlidioides</i> (A-K-1)	CMA ^{d)} (Difco)	40	3	Mycelia, Oospores
<i>F. oxysporum</i> f.sp. <i>spinaciae</i> (F-98)	PDA ^{e)}	70	1	Mycelia, Conidia Chlamydospores

a) Each pathogen was incubated at 25°C.

b) No. of Petri plates (9cm in diameter) containing pathogen used for preparing the pathogen suspension (with sterilized water) of 100ml.

Mycelia of *Pythium* spp. obtained by scraping up from the colony on the medium were used for the suspension, others were prepared from the agar medium containing each pathogen.

c) Potato dextrose agar.

d) Corn meal agar.

e) Amount of PDA in Petri plates was more because of long-term incubation.

し、25°Cで10日間培養した。すなわち、*A. cochlidioides* はCMA (Difco 社製) に、その他の糸状菌はPDA培地にそれぞれ接種した。培養後、菌叢の発現や生育が認められない場合には死滅したものと判断した。

結 果

ホウレンソウの主要な病原糸状菌の死滅温度は、概ね40°C以上であることが認められた (Table 37)。すなわち、*F. oxysporum* f.sp. *spinaciae* を除く4菌は40°Cで40時間以内で、一方 *F. oxysporum* f.sp. *spinaciae* は45°Cで40～48時間でそれぞれ死滅した。これらのことから、太陽熱処理時の病原糸状菌の死滅に有効な地温 (以後、有効地温) とその積算時間は40°C以上、50時間前後と推定された。

2. 太陽熱処理時の方法の違いが防除効果に及ぼす影響

実験方法

1) 太陽熱処理

太陽熱による土壤消毒は、土壤表面をマルチあるいはマルチ+トンネルにより被覆し、さらにハウス内を密閉して、地温を上昇させることによって土壤中の病原菌の死滅を図る方策である (Fig.10)。一般に被覆処理の時期は地温の上昇に有利な夏期に限られており、被覆期間は約1ヶ月である。通常、この被覆処理に先立ち、有機物や石灰窒素などの土壤改良資材の施用、小畝の造成および灌水処理が施される。土壤改良資材の施用量は有機物1～2トン/10a、石灰窒素100kg/10a前後が標準的である。石灰窒素の施用目的は有機物の分解促進と土壤殺菌にあると言われていいる。小畝の造成は地温の上昇を高めることを目的に行われる。灌水処理の目的はハウスの作土層に過剰蓄積した無機養分の除塩と殺菌効果の高い湿

Table 37. Temperature and time of heating required for killing pathogens of spinach

Pathogen (isolates)	Temp. of heating ^{a)} (°C)	No. of days of heating ^{b)}								
		1	2	3	4	5	6	7	8	14
<i>Pythium</i> sp. (Py-1)	37	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	40	○	○	○	●					
	45	●								
	50	●								
<i>P. ultimum</i> (Py-11)	37	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	40	○	○	○	●					
	45	●								
	50	●								
<i>R. solani</i> AG-4 (R-1)	37	○	○	○	○	○	○	○	○	●
	40	○	○	○	○	●				
	45	●								
	50	●								
<i>A. cothioides</i> (A-K-1)	37	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	40	○	●							
	45	●								
	50	●								
<i>F. oxysporum</i> f.sp <i>spinaciae</i> (F-98)	37	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	40	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	45	○	○	○	○	○	●			
	50	○	●							

a) Pathogens were heated for 8 hours per day at each temperature, and incubated for 16 hours per day at 25°C.

b) ● : Death, ○ : Surviving

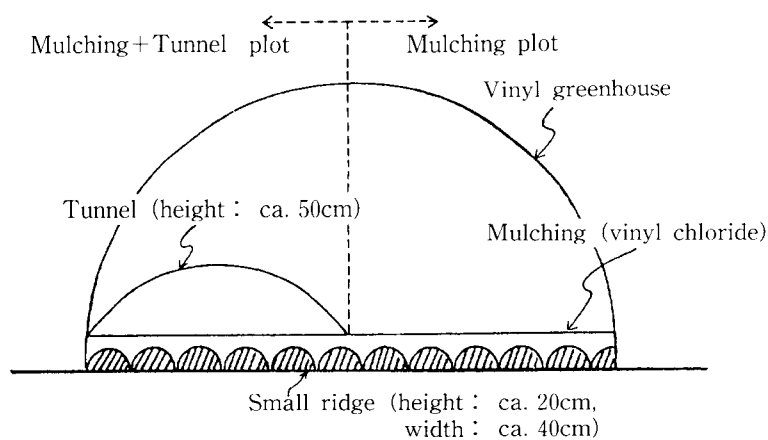


Fig. 10. Sectional drawing of vinyl greenhouse where soil solarization by mulching or by mulching plus tunnel is carried out.

Table 38. Treatment and term of soil solarization at vinyl greenhouses of spinach in Sapporo city

Covering	Soil solarization ^{a)}			Treatment ^{c)} and term of solarization at farmer's greenhouse			
	Material for covering (vinyl film)	Ridging	Soil conditioner application ^{b)}	in 1986	in 1987		
				Murashige 22 July – 4 Aug.	Matsumoto 29 June – 14 July	Murashige 13 July – 30 July	Katsuzaki 20 July – 5 Aug.
Control			—	●	●	●	●
Mulching	Used	Small	+			●	●
	Transparent do.	Small do.	+			●	●
	Transparent	Level	+				●
	Semitransparent do.	Small do.	+		●	●	●
Mulching + Tunnel	Used	Small	+			●	●
	Transparent	Small	+			●	●
Tunnel	Semitransparent do.	Small do.	+	●	●	●	●
			—	●			

a) Each plot was made in the same greenhouse, the area per plot was 16.2–18.9 m².

b) One ton of manure and 50 kg of calcium cyanamide per 10 a were applied.

c) Treatments were marked with ●.

熱殺菌を行うことにある。

1986年と1987年の夏期に、札幌市有明地区の農家ハウス計4棟に対して各種の太陽熱処理を行った(Table 38)。すなわち、夏から初秋どり栽培における土壌病害の発生に対する太陽熱処理の防除効果を太陽熱処理の時期、被覆方法、被覆資材の種類、畝立て方法、および土壌改良資材の施用の面から検討した。処理期間を従来の方法^{3,27,30,86)}の半分に相当する約2週間とし、その後のハウレンソウ栽培期間を約5週間として、各栽培型に対する処理開始時期を次のように設定した。6月下旬：8月中旬どり、7月中旬：8月下旬～9月上旬どり、7月下旬：9月中旬どり。

処理行程は次の通りであった。①土壌改良資材の施用：処理期間が従来の方法に比べて短いことから、有機物、石灰窒素は標準の半量とし、有機

物は完熟のものを使用した。牛糞堆肥またはバク堆肥を1トン/10a、石灰窒素を50kg/10a施用した。②耕起および資材の土壌混和：ロータリーで地中深約15cmまで耕起した。③畝立て：高さ約20cm、畝幅40cmの小畝をバレイショの培土機で造成した。④灌水処理：ハウス天井に装着されている灌水チューブにより、灌水を1～2時間行い、その後作土層(0～20cm)に水が十分に浸透していることを確認した。⑤フィルムによる被覆：塩化ビニール製のフィルムを用いてマルチおよびマルチ+トンネル被覆を行った(Fig.10, Plate VI-3)。⑥処理後の肥培管理：太陽熱処理後2～3日以内に浅めに耕起し、ハウレンソウを播種した。施肥および栽培法は農家慣行によった。

調査項目とその方法は次の通りである。処理期間中の気象条件および地温：気象情報は、試験地

最寄りの農水省北海道農業試験場の気象データを参考にした。自記地温計を用い、地中深 10 cm の位置の地温を測定した。処理に伴う土壤微生物相の変化：希釈平板法¹²⁾で太陽熱処理後の土壤の菌数を定量した。*Fusarium* 属菌は駒田培地⁵³⁾で、一般糸状菌はローズベンガル培地¹²⁾で、細菌・放線菌はエッグアルブミン培地¹²⁾でそれぞれ検出した。なお、以後の実験では、記載の無い限り上記の方法に従い土壤微生物相を調査した。

処理後 1 作目の土壤病害の発生状況：子葉期と収穫期の 2 回調査し、収穫期には収量調査も併せ行った。なお、村重試験地では 1986 年の 9 月 10 日と 1987 年の 9 月 2 日に、松本試験地では 1987 年の 8 月 18 日に、勝崎試験地では 1987 年の 9 月 7 日にそれぞれ収穫期の調査を行った。

結 果

各試験ハウスの太陽熱処理期間中の 40°C 以上の有効地温の積算時間と処理後の土壤の糸状菌数を Table 39 に示した。地温上昇を図るうえでやや不利な初夏（6 月 29 日～7 月 14 日）に処理を行った松本試験地の有効地温の積算時間は 19 時間と少なかったが、盛夏に行った他 3 試験地では

いずれも 50 時間前後であった。このように各試験地とも有効地温が得られたため、土壤中の病原糸状菌を含む全糸状菌および *F. oxysporum* の菌数は著しく減少しており、病原糸状菌に対する処理の殺菌効果が認められた。とりわけ、地温が上昇し易い地表面に近い土層でこの効果は顕著であった (Plate VI-4)。いずれの試験地においても、病原糸状菌数が減少した太陽熱処理系列では土壤病害の発生が低下した (Table 40)。

すなわち、有効地温の積算時間が 50 時間前後得られた村重 (1986, 1987 年) および勝崎試験地はもとより、積算時間の少なかった松本試験地でも処理による土壤病害の発生低下が認められた。4 試験地の平均値でみると (Table 41)、マルチ系列の発病株率は無処理区の約 1/2 であった。これに対し、マルチ+トンネル系列では、高い昇温効果 (Table 42) に基づく病原糸状菌数の著しい減少 (Table 43) により、土壤病害の発生が約 1/4 にまで低下した (Plate VI-5)。さらに、太陽熱処理は主に *Pythium* 属菌による立枯病や *Aphanomyces* 属菌による根腐病に対して有効であることが根部からの糸状菌分離状況からうかが

Table 39. Integrated time of soil temperature effective for killing fungi during soil solarization, and the number of fungi in soil after solarization at vinyl greenhouses in Sapporo city

Name of greenhouse examined	Covering method ^{a)}	At a soil depth of 10cm during solarization		No. of fungi at a soil layer of 0-10cm after solarization ^{c)} ($\times 10^3$ /g dry soil)	
		Maximal temp. (°C)	Integrated time ^{b)} (hour)	Fungi	<i>F. oxysporum</i>
Murashige (1986)	Mulching + Tunnel	48	67	4 (247)	0 (2)
Matsumoto (1987)	Mulching	45	19	3 (91)	0 (8)
Murashige (1987)	Mulching	46	45	0 (88)	0 (2)
Katsuzaki (1987)	Mulching	47	43	2 (37)	0 (3)

a) Each plot was covered with semitransparent vinyl film after soil conditioner application, ridging and irrigation.

b) The integrated time of the soil temperature more than 40°C that is effective for killing pathogens of spinach.

c) The number of fungi and *F. oxysporum* were counted by dilution plate method using Martin and Johnson's medium, Komada's medium, respectively.
The values in parentheses were results of control.

Table 40. Effect of various methods of soil solarization in vinyl greenhouses on incidence of soil-borne diseases of spinach as the first crop after solarization^{a)}

Name of greenhouse examined	Soil solarization ^{b)}	Cotyledonary stage		Harvest time		
		Germination (no./row)	Damping-off ^{c)} (%)	Surviving plants (no./row)	Wilt ^{d)} (%)	Weight of 10 healthy plants (g)
Murashige (1986)	Control	153	8.3	62	30.3	167
	Mulching + Tunnel	258	0.5	82	3.2	221
Matsumoto (1987)	Control	150	10.5	90	21.0	280
	Mulching	247	3.3	107	9.0	393
	Mulching + Tunnel	245	2.7	132	6.1	430
Murashige (1987)	Control	169	9.3	51	12.7	203
	Mulching	237	3.1	74	3.4	276
	Mulching + Tunnel	237	0.7	79	1.6	439
Katsuzaki (1987)	Control	124	6.3	35	41.4	131
	Mulching	171	1.9	75	10.0	381
	Mulching + Tunnel	218	0.5	85	6.5	413

a) The area investigated was 6–7 m per row (3 replicates).

b) Each plot but control was covered with semitransparent vinyl film after soil conditioner application, ridging and irrigation.

c) Observed the incidence of *Pythium* damping-off and *Aphanomyces* root rot.d) Observed the incidence of *Fusarium* wilt and *Aphanomyces* root rot**Table 41.** Effect of various methods of soil solarization in vinyl greenhouses on incidence of soil-borne diseases and on the growth of spinach (summary)

Soil solarization		Cotyledonary stage		Harvest time		Note
		Germination (no./6–7m row)	Damping-off (%)	Wilt (%)	Weight of 10 healthy plants (g)	
Covering	Control	149	8.7	24.7	195	Average of each plot in 4 greenhouses
	Mulching	201	3.6	10.9	291	
	Mulching + Tunnel	239	1.2	4.9	341	
Film	Used	211	2.6	9.0	343	Average of the mulching and the mulching + tunnel plots at Katsuzaki and Murashige in 1987
	Transparent	214	2.9	4.5	342	
	Semitransparent	216	1.6	5.4	377	
Ridge	Small	175	3.3	16.5	288	Real values of the mulching plots at Katsuzaki in 1987
	Level	147	7.3	17.9	200	
Soil conditioner application	Treated	206	3.2	9.5	282	Average of the mulching plots at Katsuzaki and Murashige in 1987.
	Untreated	204	3.7	13.2	224	

Table 42. Effect of various coverings in vinyl greenhouse on raising maximal soil temperature during soil solarization

Covering ^{a)}	Maximal temp. at a depth of 10cm (°C)				
	31 July	1 Aug.	2 Aug.	3 Aug.	4 Aug.
Mulching	32	38	39	31	32
Mulching + Tunnel	35	41	42	35	35

a) Greenhouse study at Katsuzaki farm in Sapporo (1987).

Each plot was covered with vinyl film after soil conditioner application, ridging and irrigation.

Table 43. Effect of soil solarization in vinyl greenhouse on soil microflora

Covering	Soil solarization ^{a)}			No. of microorganisms at various soil layers (/g dry soil)					
	Material for covering (vinyl film)	ridging	Soil conditioner application ^{b)}	Fungi ($\times 10^3$)		<i>F. oxysporum</i> ($\times 10^3$)		Actinomycetes + Bacteria ($\times 10^6$)	
				0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20 ^(cm)
Control	—	—	—	37	104	3	5	45	91
	Used	Small	+	6	30	0	1	13	33
	Semitransparent	Small	+	2	11	0	0	15	58
	Transparent	Level	+	9	21	3	3	48	121
	Transparent	Small	+	0	17	0	0	17	69
Mulching	Transparent	Small	—	6	14	0	1	17	52
	Used	Small	+	1	0	0	0	7	8
	Semitransparent	Small	+	1	5	0	0	5	23
	Transparent	Small	+	0	5	0	0	5	12
	Tunnel	Transparent	Small	+	0	5	0	5	12

a) Greenhouse study at Katsuzaki farm in Sapporo (1987).

b) See legend b) of Table 38.

われた (Table 44)。すなわち、処理区の正常株では *Fusarium* 属菌以外の糸状菌はほとんど分離されなかった。

また、次のようなハウレンソウの生育や土壌微生物相に対する効果も太陽熱処理区では認められた。①発芽数が多く (Table 41)、発芽揃いも良い。②生育が促進され (Table 40 の 10 株重)、収穫期が早まる。③土壌中の病原糸状菌はほとんど死滅するのに対し、細菌、放線菌は減少する程度で死滅しない (Table 43)。換言すれば、太陽熱による土壌消毒は薬剤とは異なり、選択的である。④雑草の発生が少なくなる (観察による)。

次に、被覆資材別に土壌病害の発生状況をみる

と (Table 41)、透明、不透明ビニールの違いに基づく発生の差は認められなかったが、古ビニール被覆系列では土壌病害の発生がやや多い傾向にあった。これは古ビニール被覆系列では新しいビニール資材で被覆した処理系列に比べて、光線透過率の低下により地温が 1～2℃低く推移したことと起因するものと推察された (Table 45)。太陽熱処理時に小畝の造成を行わなかった平畝区の地温は、小畝区に比べ 2℃ほど低く推移したため (Table 45)、土壌中の糸状菌生存数は平畝区で多かった (Table 43)。このことを反映して平畝区では子葉期の土壌病害がやや多く発生した (Table 41)。土壌病害の発生抑制に及ぼす土壌改良資材の

Table 44. Detection of pathogens from spinach as the first crop after soil solarization in vinyl greenhouse

Soil treatment ^{a)}	Plant tested ^{b)}	% of detection of fungi from cotyledonary plant ^{c)}			
		<i>Pythium</i>	<i>Rhizoctonia</i>	<i>Aphanomyces</i>	<i>Fusarium</i>
Nonsolarized (neighboring greenhouse)	Healthy	17.5	0	10.5	40.0
	Diseased	12.5	0	5.0	67.5
Nonsolarized	Healthy	20.0	0	0	45.0
	Diseased	25.0	0	7.5	62.5
Solarized ^{d)}	Healthy	2.5	0	0	25.0

a) Greenhouse study at Murashige farm in Sapporo (1986).

Mulching plus tunnel plot was covered with semitransparent vinyl film after soil conditioner application, ridging and irrigation.

b) Healthy : seedlings that looked healthy at a glance, Diseased : seedlings with symptoms of damping-off.

c) Twenty plants, healthy and diseased, respectively were collected.

The number of root segments tested was 40, respectively.

d) Mulching plus tunnel.

Table 45. Effect of covering materials and ridgings on maximal soil temperature during soil solarization in vinyl greenhouse

Covering	Ridging	Soil solarization ^{a)}		Maximal temp. at a soil depth of 10cm (°C)				
		Material of covering (vinyl film)	Thickness of film (mm)	25 July	26 July	27 July	28 July	29 July
Mulching	Small ^{b)}	Used	0.10	40	42	42	44	41
		Semitransparent	0.05	42	44	43	46	42
		Transparent	0.05	41	45	43	47	43
Mulching	Level	Transparent	0.05	39	43	41	45	42

a) Greenhouse study at Katsuzaki farm in Sapporo (1987).

b) Ridges, height of ca. 20 cm, width of ca. 40 cm were made.

影響は判然としなかったが、資材施用系列では無施用系列に比べて生育が優った (Table 41)。すなわち、施用系列の収穫時の 10 株重は 282 g であったのに対し、無施用系列では低下し、224 g であった。

これらのことから、土壤病害の防除および生育に対して最も効果の高いハウスにおける太陽熱処理法は、土壤改良資材の施用-小畝造成-灌水処理-新しいフィルムを使用したマルチ+トンネルに

よる二重被覆処理であることが示された。

3. 土壌の種類と地温上昇の難易

実験方法

前述したように太陽熱処理の成否は地温上昇に負うところが大きい。そこで、土壌の違いに基づく地温上昇の難易を知る目的から、地温上昇に対する土壌間の差をモデル実験により検討した。泥炭土 (岩見沢)、淡色黒ボク土 (粗粒質、千歳) および褐色低地土 (中粒質、北海道立中央農試圃場)

の3種類の土壌を供試した。

太陽熱処理時を想定して、マルチ被覆処理による地温上昇の推移を乾燥および多湿の2条件下で調査した。すなわち、ポット当り13リットルの風乾した各供試土壌を2個の1/2,000 aのワグナーポットに詰め、うち1個のポットに対してポットの底の排水口から注水を行い多湿条件（圃場容水量）とし、一方注水を行わないものを乾燥条件（含水比5%）とした。なお、注水は次の方法により行った。水を張ったポリコンテナの中にポットを沈め注水口から水を浸透させ、その後、コンテナから出し、1日放置し重力水を流去させた。

水分条件を設定後、地中深10 cmの位置に自記地温計のセンサーを埋没させ、ポット表面を透明の塩化ビニールで被覆し、地温の推移を測定した。実験は1987年の9月15日から23日までの9日間、温室内で行った。また、土壌水分吸引圧を砂柱法でpF 1.5に調整した後、各土壌の三相分布を常法²²⁾により測定した。

なお、マンセル方式の標準土色帖により実験開始時の土壌表面の土色を調査した結果、各土壌の土色は次の通りであった。泥炭土：10 YR 4/2（乾

燥）、7.5 YR 3/1（多湿）。淡色黒ボク土：2.5 Y 5/2, 10 YR 3/1。褐色低地土：2.5 Y 6/3, 2.5 Y 4/2。

結 果

乾燥および多湿条件を通じ、褐色低地土壌の地温は他土壌に比べて低く推移した（Table 46）。これに対し、淡色黒ボク土壌はいずれの条件下においても高く推移した。とりわけ、これらの傾向は乾燥条件で顕著であった。すなわち、褐色低地土壌の最高地温の平均値は29.0°Cであったのに対し、淡色黒ボク土壌は31.1°Cと高かった。褐色低地土壌で地温が低く推移した原因として次のことが推察された。①褐色低地土壌の土色の明度が供試土壌中最も高いために同土壌では光線が多く反射され、光線の吸収量が少なかったこと。②両土壌の比熱に差が無いと仮定するならば、固相率が42.1%と最も高い褐色低地土では熱容量が大きかったこと。

一方、泥炭土壌では多湿条件で地温が上昇しにくく、また最高、最低地温の差が小さかった。泥炭土壌の液相率は供試土壌中最も高いことから、同土壌では比熱の高い水が土壌孔隙内に多く存在し、そのため多湿条件で地温が上昇しにくいもの

Table 46. Effect of soil types on soil temperature in pot test^{a)}

Soil type	Three phases distribution (%, pF=1.5)			Integrated values of max. and mini. soil temp. at a depth of 10cm ^{b)} (°C)					
	Air	Solid	Liquid	Dry soil ^{c)}			Wet soil ^{d)}		
				Max.	Min.	Diff.	Max.	Min.	Diff.
Peat soil	25.1	30.4	44.5	271 (30.1)	145 (16.1)	126 (14.0)	251 (27.9)	147 (16.3)	104 (11.6)
Light-colored andosol	28.5	34.6	36.9	280 (31.1)	143 (15.9)	137 (15.2)	260 (28.9)	151 (16.8)	109 (12.1)
Brown lowland soil	18.8	42.1	39.1	261 (29.0)	138 (15.3)	123 (13.7)	252 (28.0)	142 (15.8)	110 (12.2)

a) Greenhouse study at Hokkaido Central Agricultural Experiment Station in 1987.

The surface of soil in Wagner pot of 1/2000 a was covered with vinyl film.

b) The integrated values between 15 Sept. and 23 Sept. (9 days).

The values in parentheses indicate averages per day.

c) Soil moisture weight percentage=5.

d) Field water capacity.

と考えられた。

これらのことから、光線を反射し易い土壌、熱容量の大きい土壌および泥炭土壌のような土壌孔隙内に多くの水を含む土壌は、太陽熱処理を行うに当り、地温上昇の点でやや不利と思われた。

考 察

土壌病害の防除を目的とした太陽熱による土壌消毒は安全であり、かつ効果も期待できるため、西南暖地ではハウスはもとより、露地野菜の土壌病害⁹³⁾にまでその処理対象は及んでいる。このような趨勢に至った背景には、志賀ら⁷³⁾、Katanら³⁹⁾および小玉ら⁴²⁾の先駆的な研究やその後の適用病害拡大に向けての試み^{27,43)}が大きく寄与していることを見逃せない。翻って、寒冷地であるがゆえに太陽熱による土壌消毒は不利とされていた北海道でも五十嵐³⁰⁾による研究をはじめとして、適用病害が次第に広がりつつある⁸⁶⁾。さらに本実験においてもハウレンソウの土壌病害に対する太陽熱による土壌消毒の防除効果が実証された。

モデル実験および現地試験を通じ、ハウレンソウの病原糸状菌の死滅に有効な地温、すなわち有

効地温とその積算時間は40°C以上、50時間前後(地中深10cm)と推定された(Table 37, 39)。ハウレンソウの病原糸状菌のうち、最も耐熱性の強い *F. oxysporum* f.sp. *spinaciae* の死滅に必要な温度とその積算時間は、45°C、40~48時間であることがモデル実験で認められたことや(Table 37)、同菌は42°Cで48~72時間で死滅する事例⁹³⁾などを勘案すると、この推定は概ね妥当であると考えられる。なお、イチゴ萎黄病の病原である *F. oxysporum* f.sp. *fragariae* は42°C、192~264時間で、キュウリつる割病の病原である *F. oxysporum* f.sp. *cucumerinum* は42°C、72~96時間でそれぞれ死滅することが報告されている⁹³⁾。

さらに、この有効地温と気象条件との関係を明らかにすることにより、太陽熱処理の効果の予測や処理適期・日数に関する情報が得られる。地温上昇に関与する気象要因として、日射量と気温が考えられるが、現地農家で入手可能な情報は気温である。Fig. 11は各測定日の最高外気温と1日当りの有効地温の積算時間との関係を示したものであり、この結果から、50時間前後の有効地温の積

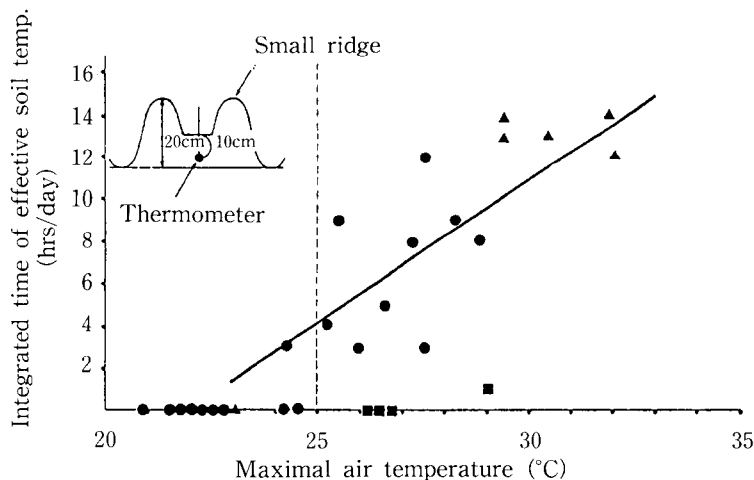


Fig. 11. Relationship between maximal air temperature and integrated time of effective soil temperature of more than 40°C per day at a depth of 10 cm at soil solarization in vinyl greenhouses (in Sapporo). The line drawn represents the linear regression $Y = 1.42X - 31.10$; correlation coefficient = 0.789 ($p < 0.01$), $n = 15$ (fine days when the effective soil temperature was obtained). ▲: mulching+tunnel (Murashige, 1986), ●: mulching (Murashige and Matsumoto, 1987), ■: the days when solarization was set in or cloudy days.

算時間を確保するためには、処理期間内に 25°C を超え、かつ晴の日が 7 日前後必要であることを読み取ることができる。北海道では極端な低温年を除くと、最高気温が常時 25°C を超えるのは 7 月下旬から 8 月上旬にかけての時期であることから、同時期に太陽熱処理期間を組み入れることが昇温効果の面から望ましい。試みに、処理日数を 2 週間に設定し、7 月下旬から 8 月上旬の高温期に太陽熱処理期間の一部ないし全てを組み入れるならば、安定した防除効果の得られる処理適期は 7 月中旬から 8 月中旬にかけてのほぼ 40 日間となる。

次に、約 2 週間の短期処理の妥当性について営農および効果の面から考察する。現地ハウスにおいて、前作収穫から次作播種までのハウスが空く期間は通常約 1 週間である。そこで、この間に約 2 週間の太陽熱処理を行うならば、次作の播種は 1 週間ほど遅れ、そのため収穫期も遅れるが、処理後の栽培では旺盛な生育に基づく早期収穫が可能

となるので、処理に伴う営農上の負担は小さい。したがって、営農上望ましい処理日数は約 2 週間と判断される。ただし、約 2 週間の短期処理は従来の方法における処理期間の 1/2 であるため、効果の面で劣ることが懸念される。しかし、本実験において、とりわけマルチ+トンネルによる二重被覆処理で十分な防除効果が得られたことを考えると、短期処理でも処理適期に効果の高い二重被覆を行えば、かなりの防除効果をあげ得るものと結論される。

なお、ハウレンソウの土壌病害に対して短期処理でも効果が認められた原因として、次のことが考えられる。①根の罹病部位が概ね地際下 10 cm 以内にあり、この土層域では下層に比べて地温が上昇し易いため、病原糸状菌は容易に死滅する。②ハウレンソウの生育日数が 35 日前後と他の野菜に比べて短いことに加えて、太陽熱処理に伴う生育促進により、病徴が発現する前に収穫が可能

Table 47. Short-term soil solarization at vinyl greenhouse for the control of soil-borne diseases, especially *Aphanomyces* root rot of spinach grown in summer and early autumn

Soil solarization				Indispensable climatic condition
Optimum time	Term	Method		
July (middle) -Aug. (middle)	About 2 weeks	①	Soil conditioner application ^{a)}	About 7 fine days with air temp. more than 25°C are needed during the period of solarization to obtain the soil temp. (more than 40°C for ca. 50 hours at a soil depth of 10cm) effective for killing pathogens of spinach.
		②	Ridging ^{b)}	
		③	Irrigation ^{c)}	
		④	Covering with vinyl film ^{d)}	
			Severe disease outbreak: Mulching plus Tunnel	
			Rare disease outbreak: Mulching	

- a) The recommended rate of soil conditioner application is 1 ton of half-matured or matured manure and 50 kg of calcium cyanamide per 10 a. These are to be mixed well with soil.
- b) Ridging is suitable for raising soil temperature.
- c) Irrigation is to be done, because the solarization is more effective in wet soil. Sprinkler irrigation before mulching is to be done about 2 hours until plow layer becomes wet. Water penetrates well into soil by intermittent irrigation. In a greenhouse with furrow irrigation (drip irrigation) equipment, it is possible to irrigate after covering with film.
- d) The covering with a new vinyl film is suitable, because it has a high ability to raise soil temperature. Shallower plowing than usual at the first cropping after solarization is suitable for preventing re-contamination by pathogens in the subsoil.

である。

また、地温の上昇しにくい下層土では病原糸状菌が生存している可能性もあるので、短期処理を成功させるためには太陽熱処理後の耕起を浅めに行い、下層からの病原糸状菌による再汚染を防ぐことが肝要である。特に耐熱性の強い *F. oxysporum* f.sp. *spinaciae* による萎ちょう病の発生圃場では二重被覆処理を行い、処理後浅めに耕起することが望まれる。

以上のことから、雨よけハウレンソウの夏～初秋どり栽培に多発生する根腐病をはじめとした土壌病害の防除を目的とした短期の太陽熱処理法を Table 47 のようにとりまとめることができる。なお、昇温効果の安定性を重視したため、処理時期を7月中旬から8月中旬に限定したが、次の理由から、8月中旬どりを目標とした6月下旬からの処理も可能と思われる。①6月下旬から7月中旬に処理を行った松本試験地で効果が認められた (Table 40)。②北海道は梅雨の影響が少ないので、6月から処理に適した気象条件が得られることがある⁴²⁾。

一般に糸状菌は多湿条件下で死滅し易いことから、太陽熱処理時の灌水は必須の処理となっている。雨よけハウスには、通常灌水設備が備え付けられており、灌水処理が可能であるが、水はけの悪いハウスや重粘質土壌では灌水処理に伴う過湿あるいは土壌構造の悪変により、処理後直ちに耕起出来ないことも想定される。したがって、このようなハウス土壌は太陽熱処理にとって不向きと言える。また、光線を反射し易い土壌、熱容量の大きい土壌および泥炭土のような土壌孔隙内に比熱の高い水を多く含む土壌は、地温上昇の点でやや不利であることから (Table 46)、このような土壌では気象条件の良い時期に太陽熱処理を行うことが望まれる。

第3節 露地における太陽熱利用による防除対策

本節では露地栽培ハウレンソウの夏～初秋どりにおいて多発生する土壌病害の防除を目的とした寒地向けの短期の太陽熱土壌消毒法を検討した。

なお、北海道の露地では灌水設備が無いことが多いので、灌水により土壌を多湿状態に保つことができず、圃場により処理時の土壌の水分状態はそれぞれ異なることが想定される。土壌水分は地温上昇および湿熱殺菌効果と密接に関連しているので、ここでは土壌の水分含量に着目して実験を行った。

1. 糸状菌の死滅に及ぼす土壌水分および温度の影響

実験方法

札幌市有明地区の村重圃場の初夏どりハウレンソウ収穫後の跡地土壌を供試した。圃場は露地であり、土壌は中粒質の褐色低地土である。加温温度3水準(30, 40, 50℃)×含水比3処理(5, 35, 65%)の計9処理を3反復で設定した。全処理区に対してパーク堆肥と石灰窒素を添加した。

100 ml 容のポリビンに含水比5%の風乾細土10.5 gを加えた後、石灰窒素5 mgとパーク堆肥を原物で100 mg添加した。なお、土壌水分の調整が必要な含水比35%および65%区では、石灰窒素5 mgを蒸留水に懸だくして加え、併せて水分調整も行った。石灰窒素とパーク堆肥の量は、仮比重1.0、土層0～10 cmとした時の10 a当りの土壌量100トンに対して石灰窒素50 kg/10 a、パーク堆肥1トン/10 aを施用した太陽熱処理時を想定して算出した。

次に、各処理区のポリビンの口をポリ塩化ビニリデンフィルムで密閉し、30, 40, 50℃に調節した恒温器内に入れ、太陽熱処理時の地温変化を想定し、7日間にわたって変温処理を行った。すなわち、1日のうち8時間を上記の高温で、残りの16時間を25℃で加温した。各高温条件下の積算時間は56時間であった。恒温器内で上記の変温処理を行った後、直ちに土壌中の糸状菌の菌数を希釈平板法により定量した。

結 果

加温温度の上昇に伴い、糸状菌の菌数は減少した (Table 48)。30, 40℃の低、中温域では糸状菌の死滅に及ぼす土壌水分の影響が認められなかった。一方、高温域の50℃では、土壌水分の影響が認められ、低水分条件下において糸状菌は死滅し

Table 48. Effect of heating and water treatments on numbers of fungi in soil (model experiment of soil solarization, *in vitro*)

Soil treatment		No. of fungi ^{b)} ($\times 10^3$ /g dry soil)	
Heating ^{a)} (°C)	Soil moisture weight (%)	Fungi	<i>F. oxysporum</i>
30	5	29	4
	35	33	4
	65	33	2
40	5	20	2
	35	16	1
	65	15	3
50	5	11	0
	35	1	0
	65	1	0

a) Each plot was heated for 8 hours per day at each temp., and incubated for 16 hours per day at 25°C. The integrated time of heating was 56 hours.

b) See legend c) of Table 39.

にくかった。すなわち、含水比 35, 65%区の中、高水分域の糸状菌数はいずれも 10^3 個/g 乾土であり、糸状菌の死滅に及ぼす土壤水分の影響が認められなかったのに対し、低水分域の含水比 5 %区の糸状菌数の中、高水分域の約 10 倍の 11×10^3 個/g 乾土であり、多くの糸状菌が生存していた (Plate VII-1)。

これらのことから、土壤が乾燥している条件下では糸状菌に対する熱殺菌の効果は劣るが、土壤の含水比が概ね 35%以上では、土壤水分含量の違いに基づく湿熱殺菌の効果の差は小さいことが示された。

2. 太陽熱処理時の方法の違いが防除効果に及ぼす影響

実験方法

1987 年と 1988 年に、札幌市有明地区の現地露地の計 4 圃場に対して太陽熱処理を行った (Table 49)。すなわち、夏～初秋どり栽培における土壤病害の発生に対する太陽熱処理の防除効果を処理の時期、被覆および畝立て方法の面から検討した。太陽熱処理期間を前節の実験と同様に約

Table 49. Treatment and term of soil solarization at open fields for spinach cropping in Sapporo city

Soil solarization ^{a)}				Treatment ^{c)} and term of solarization at farmer's open field			
				in 1987		in 1988	
				Matsumoto 15 July- 30 July	Yanase 29 June- 10 July	Murashige 13 July 26 July	Matsumoto 1 Aug.- 14 Aug.
Covering	Soil conditioner application ^{b)}	Ridging	Plowing after solarization				
Control			Plow	●	●	●	●
Mulching	Treated	Small	Plow	●	●	●	●
	Treated	Level	Plowless				●
	Untreated	Small	Plow			●	
Mulching + Tunnel	Treated	Small	Plow	●	●	●	
	Untreated	Small	Plow			●	

a) Each plot was made in the same field. The area per plot was 7.5m² at Matsumoto (1987, 1988). 60m² at Yanase and 20m² at Murashige.

Each plot was covered with a new vinyl film (semitransparent) of 0.05mm in thickness.

Each plot was not irrigated, because each field has no equipment of irrigation.

b) See legend b) of Table 38.

c) See legend c) of Table 38.

2週間とし、その後のハウレンソウの栽培期間を約5週間として、各栽培型に対する処理開始時期を次のように設定した。6月下旬：8月中旬どり、7月中旬：8月下旬どり、8月上旬：9月中旬どり。

松本試験地（1988）の太陽熱処理後不耕起栽培区では太陽熱処理開始時に、同耕起栽培区は処理終了時にそれぞれ、N（硝安）：15 kg/10 a, K₂O（硫加）：10 kg/10 a, P₂O₅（過石）：10 kg/10 a を施肥した。なお、不耕起栽培区では太陽熱処理後耕起せずに直ちに播種できるように太陽熱処理時の畝立て方法は平畝とした。一方、耕起栽培区では太陽熱処理時の畝立て方法は高さ約20 cm、幅約40 cmの小畝とした。太陽熱処理後、村重試験地を除く3試験地ではハウレンソウの栽培を農家慣行で行った。子葉期には土壤病害の発生を、収穫期には土壤病害の発生と生育状況を調査した。各試験圃場における調査日は次の通りであった。松本試験地：1987年8月14日（子葉期）、1988年8月25日（子葉期）、9月19日（収穫期）。柳瀬試験地：1988年7月20日（子葉期）、8月12日（収穫期）。なお、1987年の松本試験地では8月26

日に121.5 mmの集中豪雨に見舞われ、圃場の滞水によりハウレンソウに被害が認められたので収穫期の調査は行わなかった。

太陽熱処理の手順および調査は前節と同様の方法で行った。

結 果

1) 太陽熱処理期間中の地温と有効地温積算時間

各試験地の地温上昇および40°C以上の有効地温とその積算時間に対して、被覆方法、畦立て方法、日射量および土壌水分の影響が認められた（Table 50）。松本（1988）を除く3試験地のマルチ+トンネル区では、最高地温の平均値がマルチ区に比べて6～13°C高く、マルチ+トンネル被覆により高い昇温効果が得られた。そのため、マルチ+トンネル区の有効地温の積算時間はマルチ区に比べていずれの試験地においても多かった。中でも、日射量の最も多かった村重試験地のマルチ+トンネル区では120時間の有効地温の積算時間が得られた。一方、松本試験地（1987）では日射量が少なかったため、62時間にとどまった。松

Table 50. Climatic condition and integrated time of effective soil temperature during soil solarization in open fields in Sapporo city

Name of field tested	Soil solarization			Climatic condition		At a soil depth of 10cm		
	Term	Covering ^{a)}	soil moisture weight ^{b)} (%)	Average max. air temp. (°C)	Integrated solar rad. (MJ)	Average max. soil temp. (°C)	Integrated time of effective soil temp. ^{c)} (hrs)	No. of days obtained effective soil temp.
Matsumoto (1987)	15 July–	Mulching	48	24.5	237	32	0	0
	30 July	Mulching+Tunnel	50		(14.5) ^{d)}	39	62	8
Yanase (1988)	29 June–	Mulching	28	22.2	222	39	23	4
	10 July	Mulching+Tunnel	29		(18.5)	45	89	9
Murashige (1988)	13 July–	Mulching	47	22.4	296	34	4	2
	26 July	Mulching+Tunnel	41		(21.1)	47	120	12
Matsumoto (1988)	1 Aug.–	Mulching (small ridge)	36	26.3	223	39	42	7
	14 Aug.	Mulching (level ridge)	39		(15.9)	32	0	0

a) Each plot was covered with vinyl film after soil conditioner application and ridging (without irrigation).

b) Average of the soil moisture weight percentage at a soil layer of 5–10 cm in before and after the solarization.

c) More than 40 °C.

d) Average solar radiation per day.

本試験地（1988）のマルチ被覆小畝区では同平畝区に比べて最高地温の平均値が7℃ほど高く推移しており、小畝処理が高い昇温効果を有することが認められた。小畝区の有効地温の積算時間は42時間であったのに対し、平畝区では0であった。

次に処理期間中の積算日射量および最高外気温がほぼ同じであった柳瀬、松本（1987年）両試験地の有効地温の積算時間を比較すると、土壌の含水比が28%であった柳瀬試験地のマルチ区では23時間の有効地温の積算時間が得られたのに対し、含水比が48%と高かった松本試験地では0であった。さらに、含水比が47%であった村重試験地では積算日射量が柳瀬試験地に比べて多かったにもかかわらず、マルチ区の有効地温の積算時間が柳瀬試験地に比べて少なかった。これらのことから、3試験地のマルチ区における有効地温の積算時間の違いは、土壌水分含量の多少に起因するものと判断された。

2) 土壌病害の発生に及ぼす被覆方法と土壌水分含量の影響

太陽熱処理系列では土壌中の糸状菌（病原糸状菌を含む）数の減少が認められた。特に、昇温効果の高いマルチ+トンネル区では糸状菌数は顕著に減少した（Table 51）。松本（1987）と柳瀬両試験地の処理後1作目の土壌病害の発生状況

（Table 52）みると、いずれの試験地とも殺菌効果の高かったマルチ+トンネル区では立枯れ株率は3%以下に抑えられ、また収穫時の萎ちょう黄化株率も2%弱にとどまった（柳瀬試験地）。含水比が48%と高いために地温の上昇が抑えられ、そのため有効地温の得られなかった松本（1987）試験地のマルチ区では立枯れ株率が7.5%（無処理区9.7%）と高く、処理効果は低かった。これに対し、気象条件はほぼ松本試験地と同様であったが、含水比が28%と低く、そのため地温の上昇し易かった柳瀬試験地のマルチ区では23時間の有効地温の積算時間が得られ、子葉期および収穫期の土壌病害の発生は抑えられた（Plate VII-2）。

これらのことから、昇温効果の低いマルチ被覆では、土壌水分が多い場合、気象条件によっては有効地温が得られず、防除効果が劣ることも想定されるので、処理時の含水比はあまり高くないことが望ましいと判断された。

3) 土壌病害の発生に及ぼす処理後の耕起法の影響

小畝区の地中深10 cmの最高地温は、曇天であった8月12、13日を除くと平畝区に比べて6～12℃ほど高く推移しており、小畝区は平畝区に比べて高い昇温効果を示した（Table 53）。一方、地中深5 cmでは平畝区でも40℃以上の有効地温

Table 51. Effect of various coverings for soil solarization at open fields on numbers of fungi in soil

Covering ^{a)}	Soil layer (cm)	No. of fungi at various soil layers ^{b)} ($\times 10^3$ /g dry soil)					
		Fungi			<i>F. oxysporum</i>		
		Murashige (1988)	Matsumoto (1987)	Yanase (1988)	Murashige (1988)	Matsumoto (1987)	Yanase (1988)
Control	0-10	32	62	125	5	7	7
	10-20	75	69	133	5	7	5
Mulching	0-10	5	28	47	2	2	0
	10-20	14	33	80	1	3	2
Mulching + Tunnel	0-10	2	5	4	0	0	0
	10-20	5	20	16	0	3	1

a) See legend a) of Table 50.

b) See legend c) of Table 39.

Table 52. Effect of various coverings for soil solarization at open fields on incidence of soil-borne diseases of spinach as the first crop after solarization

Covering ^{c)}	Cotyledonary stage ^{a)}				At harvest time in Yanase's field ^{b)} (1988)			
	Germination (no.)		Damping-off (%)		Surviving plants (no./row)	Wilt (%)	Healthy plant	
	Matsumoto (1987)	Yanase (1988)	Matsumoto (1987)	Yanase (1988)			Height (cm)	Weight of 10 plants (g)
Control	191	131	9.7	2.3	37	12.7	16.7	267
Mulching	218	141	7.5	1.1	51	3.9	26.1	547
Mulching + Tunnel	255	149	2.9	0	58	1.7	28.7	637

a) The area investigated was 5 m per row (4 replicates) at Matsumoto, 6 m per row (3 replicates) at Yanase.

b) The area investigated was 6 m per row (3 replicates).

c) See legend a) of Table 50.

Table 53. Variation of maximal soil temperature at various ridgings during soil solarization by mulching in open field

Ridging	Soil depth (cm)	Maximal soil temperature ^{a)} (°C, in August, 1988)											
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Small	10	41	46	45	38	39	43	49	49	48	33	26	25
Level	10	35	39	38	29	28	32	37	39	38	27	24	24
	5	—	—	—	—	—	41	48	49	48	33	26	27

a) Field experiment at Matsumoto farm in Sapporo.

が得られた。マルチ処理により平畝，小畝を問わず糸状菌数が減少し，中でも *F. oxysporum* は小畝区で多く減少する傾向にあった (Table 54)。処理後1作目の立枯れ株率は，小畝区 (処理後耕起栽培)，平畝区 (処理後不耕起栽培) とともに，2%以下に抑えられ，両処理間の差は判然としなかった (Table 55)。収穫期の萎ちょう黄化株率は平畝区においてやや高かった。

次に，子葉期における根部からの糸状菌の検出状況 (Table 56) をみると，根部褐変率の高かった無処理区において *Pythium* および *Aphanomyces* 属菌が検出されたのに対し，根部褐変率が5%以下と低かった処理系列では耕起法を問わず，これらの糸状菌はほとんど検出されなかった。ただし，昇温効果の低い平畝区で *Fusarium* 属菌が小畝区に比べてやや多く検出された。

宿主の生育時期が子葉期であった8月25日から5日間，1988年の松本試験地では降雨に見舞われ，根腐病と立枯病が多発生した。そのため，収穫時の株数は著しく減少したが，不耕起栽培区では畦4.5m当り45株残っており，耕起栽培区の27株や無処理の16株に比べて残存株数は多かった (Table 55)。雑草の発生は不耕起区で少なく，耕起区で多い傾向にあった (Table 57)。ハコベについてみると，不耕起区の発生株数は5株であったのに対し，耕起区では36株であった。これは，下層土にあった死滅していない雑草の種子が耕起に伴い上層へと移行したために生じた現象と考えられた。

Table 54. Effect of various ridgings for soil solarization by mulching at open field on numbers of fungi in soil^{a)}

Soil treatment	Ridging	Soil conditioner application ^{b)}	Soil layer (cm)	No. of fungi ^{c)} ($\times 10^3$ /g dry soil)	
				Fungi	<i>F. oxysporum</i>
Nonsolarized	Level	Untreated	0-5	133	7
			5-10	95	8
			10-15	118	18
			15-20	126	8
Solarized	Level	Treated	0-5	31	0
			5-10	11	2
			10-15	11	2
			15-20	16	2
Solarized	Small	Treated	0-5	8	0
			5-10	31	0
			10-15	11	3
			15-20	12	0

a) Field experiment at Matsumoto farm in Sapporo (1988).

b) See legend b) of Table 38. c) See legend c) of Table 39.

Table 55. Effect of various plowings at the first cropping after soil solarization by mulching on incidence of soil-borne diseases of spinach^{a)}

Soil treatment	Plowing after solarization	Ridging of solarization	Cotyledonary stage (25 Aug.)		Harvest time (19 Sept.)			
			Germination (no.)	Damping off (%)	Surviving plants (no./row)	Wilt (%)	Healthy plant	
							Height (cm)	Weight of 10 plants (g)
Nonsolarized	Plow	Level	108	17.9	16	24.5	13.7	46
Solarized	Plowless	Level	118	0.6	45	6.6	22.1	170
Solarized	Plow	small	116	1.1	27	3.8	21.5	165

a) Field experiment at Matsumoto farm in Sapporo (1988).

The area investigated was 4.5 m per row (3 replicates).

Table 56. Detection of pathogens from spinach as the first crop after soil solarization by mulching in open field

Soil treatment ^{a)}	Plowing	Ridging	Root browned ^{b)} (%)	% of detection of fungi from plant ^{c)} (25 Aug.)			
				<i>Pythium</i>	<i>Rhizoctonia</i>	<i>Aphanomyces</i>	<i>Fusarium</i>
Nonsolarized	Plow	Level	30	30	0	45	35
Solarized	Plowless	Level	5	0	0	0	45
Solarized	Plow	small	0	0	0	0	10

a) Field experiment at Matsumoto farm in Sapporo (1988).

Soil conditioner was applied to solarized plots

b) Twenty cotyledonary plants collected from each plot at random were investigated.

c) The number of root segments tested was 20.

Table 57. Effect of various plowings at the first spinach cropping after soil solarization by mulching on development of weed

Soil treatment	Ridging of solarization	Plowing after solarization	No. of weeds per m ² (20 days after solarization)		
			Common-purslane (<i>Portulaca oleracea</i> L.)	Chickweed (<i>Stellaria media</i> L.)	Others
Nonsolarized	Level	Plow	11	87	13
Solarized	Level	Plowless	1	5	1
Solarized	Small	Plow	4	36	8

a) Field experiment at Matsumoto farm in Sapporo (1988).

考 察

和歌山、滋賀および兵庫の各県では、各種野菜の土壤病害防除を目的とした露地における太陽熱土壤消毒法が検討され、普及に移されている⁹³⁾。その成果の一部を要約すると次の通りである。

①マルチ被覆に比べて、マルチ+トンネルによる二重被覆の防除効果は高い。②高い畝を立てると地温が上昇し易い。③太陽熱処理効果の低い低温年では処理後の不耕起栽培区において高い防除効果が得られた。本節ではこれらの知見が実証された。しかし、北海道は西南暖地に比べて太陽熱処理にとって気象条件が不利であるため、太陽熱処理に際し、地温上昇を図るうえで、種々の配慮

が必要であると考えられる。

そこで、本節の露地における実験結果と前節で得られたハウスにおける知見を交えて、以下、露地における各種の処理方法に対する必須気象条件並びに処理上の留意点を昇温、保温の両面から考察した。

1) 被覆方法と昇温効果

Table 58 はほぼ同一の土壤、気象条件下で各種被覆方法別の地中深 10 cm における最高地温の推移をみたものである。最高地温は、露地のマルチ+トンネル>ハウスのマルチ>露地のマルチの順に高く推移しており、この順に地温に対する昇温効果が高いと理解できる。

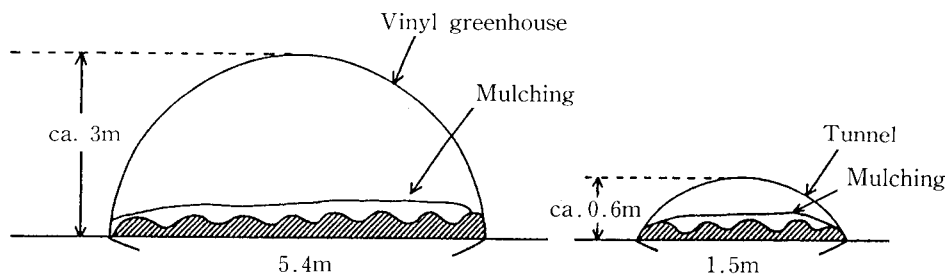
Table 58. Change in maximal soil temperature under various coverings during soil solarization in open field and vinyl greenhouse.

Field	Covering of solarization	Soil moisture weight (%)	Max. soil temp. at a depth of 10 cm ^{a)} (°C, in July, 1987)				
			16	17	18	19	Mean
Greenhouse	Mulching ^{b)}	58	29	26	35	37	32
Open field	Mulching + Tunnel ^{c)}	50	31	27	38	43	35
Open field	Mulching	48	27	23	30	35	29

a) Field experiment at Matsumoto farm.

b) Mulching at a vinyl greenhouse

c) Mulching + tunnel at an open field



露地のマルチ+トンネルとハウスのマルチとはスケールの大きさの点を除けば、同一の被覆方法であるのに、昇温効果の点で異なった原因の一つとして、以下のことが考えられる。小倉⁶⁹⁾によれば、日中の地表における熱収支式は次に示す受熱(左辺)と放熱(右辺)の関係で表される。 $I + R = E + RBs + B$

I ：水平面日射受熱, R ：長波受熱(反ふく射), E ：地面から空気への熱伝達(顕熱+潜熱), RBs ：長波放出, B ：地中伝導熱。この地表における熱収支式がマルチの表面においても適用できるとするならば、マルチ下 10 cm の地温は地中伝導熱： B の多少に左右される。そこで、上記の熱収支式を $B = (I + R - RBs) - E$ と整理し、露地のマルチ+トンネルとハウスのマルチにおけるマルチ表面の単位面積当りの純放射： $I + R - RBs$ に差がないと仮定すると、両被覆方法における地中伝導熱： B は、マルチ表面から空気への熱伝達： E の影響を受ける。次の理由から分かるように、ハウスのマルチでは露地のマルチ+トンネルに比べて E の値が大きいと考えられる。すなわち、ハウスのマルチでは①ハウスの被覆フィルムの面積が大きいので、大気中へ顕熱が多く放出される。②被覆フィルムによるハウス内の密閉度が露地のマルチ+トンネルに比べて劣るので、土壤中の水蒸気が大気中へ逃げ易く、大気中へ潜熱が多く放出される。したがって、ハウスのマルチでは地中伝導熱が少なく、そのためハウスのマルチは露地のマルチ+トンネルに比べて地温が上昇しにくいものと推察される。

次に土壌水分別に最高外気温と最高地温の関係 (Fig. 12) をみると、昇温効果の低い露地のマルチでは土壌水分含量の影響を受けて、含水比 47% の村重試験地の地温は含水比 28~36% の他 2 試験地に比べて上昇しにくい傾向が認められた。とりわけ、地温上昇にとって不利な低い最高外気温域でこの傾向は顕著であったが、地温上昇にとって有利な高い最高外気温域では含水比の違いに基づく地温上昇の差は小さかった。一方、昇温効果の高い露地のマルチ+トンネルやハウスのマルチでは地温上昇に及ぼす土壌水分の影響は判然としな

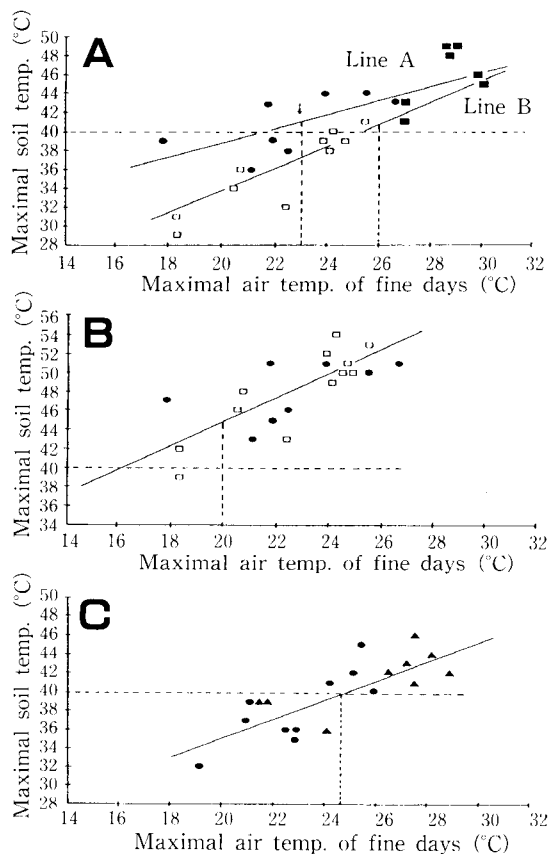


Fig. 12. Relationship between maximal air temperature and maximal soil temperature at a depth of 10 cm at various soil moisture levels at each covering of soil solarization in Sapporo city. **A**, Soil solarization by mulching in open fields (1988). Soil moisture weight percentage of fields tested; ●: 28% (Yanase), ■: 36% (Matsumoto), □: 47% (Murashige).

The line A represents linear regression in which the results from 28% field and those from 36% are combined; correlation coefficient = 0.793 ($p < 0.01$, $n = 15$). The line B represents linear regression of those from 47% field; correlation coefficient = 0.916 ($p < 0.01$, $n = 12$). **B**, Soil solarization by mulching + tunnel in open fields (1988). Soil moisture weight percentage of fields tested; ●: 29% (Yanase), □: 41% (Murashige). The line represents linear regression in which the results from 29% field and those from 41% are combined; correlation coefficient = 0.755 ($p < 0.01$, $n = 20$). **C**, Soil solarization by mulching in vinyl greenhouses (1987). Soil moisture weight percentage of fields tested; ●: 60% (Matsumoto), ▲: 45% (Murashige). The line represents linear regression in which the results from 60% field and those from 45% are combined; correlation coefficient = 0.786 ($p < 0.01$, $n = 19$).

かった。これらのことから、高い昇温能を構造上
有する露地のマルチ+トンネルやハウスのマルチ
では昇温に対する土壌水分の影響はある程度緩和
されるが、昇温能の低い露地のマルチでは土壌水
分の影響を強く受けることが示された。

したがって、露地のマルチ処理は土壌水分の少
ないときに実施するのが、地温上昇の面から有利
であると考えられる。しかし、土壌乾燥時に行っ
た場合、湿熱殺菌効果の低下や処理後1作目にお
ける発芽抑制などが生じる危険性があるので、あ
る程度の土壌水分が必要となる。そこで、次の実
験結果を勘案すると、露地のマルチ処理における
処理時の望ましい土壌水分は概ね含水比30%と
判断される。①含水比35%以上では、土壌水分含
量の多少に基づく湿熱殺菌効果の差は小さい
(Table 48)。②含水比28%の柳瀬試験地でも太陽
熱処理の効果が認められた(Table 52)。なお、昇
温効果の高い露地のマルチ+トンネルでは含水比
30%より高い含水比で処理を行うのが、湿熱殺菌
効果の面で有利であり、30~50%が処理時の含水
比の目安と考えられる。また、Fig.12 からマルチ
処理の含水比28~36%では23°C以上、同47%で
は26°C以上、一方マルチ+トンネル処理の含水比
29~41%では、20°C以上の最高外気温が40°C以上
の有効地温を得るうえで概ね必要であると考えら
れる。したがって、露地における処理で安定して
有効地温が得られる時の最高外気温はマルチでは
概ね25°C以上、マルチ+トンネルでは20°C以上と
判断される。

2) 被覆方法と保温効果

40°C以上の最高地温が得られた際の1日当りの
有効地温の積算時間をFig.13に示した。露地とハ
ウスの積算時間を比較すると、ハウスに比べて露
地では同じ最高地温が得られても有効地温の積算
時間は短いことが認められる。例えば、44°Cの最
高地温が得られた場合、ハウスではほぼ8時間の
積算時間が得られたのに対し、露地のマルチ+ト
ンネルでは7時間、同マルチでは5時間と短く
なっている。

したがって、保温効果の劣る露地の太陽熱処理
では、防除効果が期待出来る有効地温の積算時間

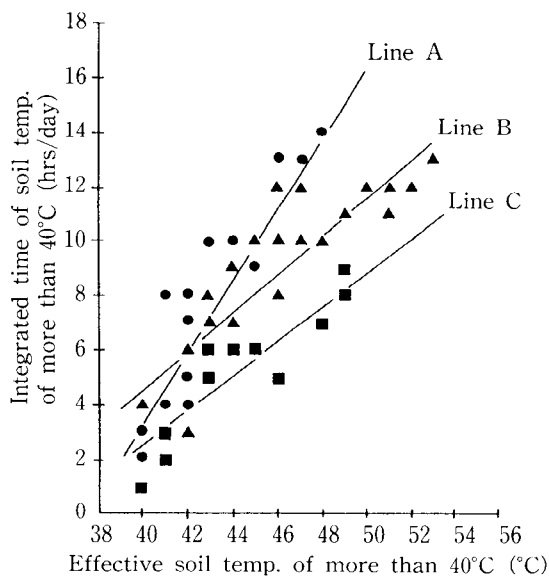


Fig. 13. Relationship between effective soil temperature of more than 40°C and integrated time of that per day at a soil depth of 10 cm at various treatments for soil solarization in Sapporo city. The line A represents linear regression of results from mulching and mulching+tunnel plots (marked with ●) at vinyl greenhouses (soil mois. weight % = 45-60, 1986-1987); correlation coefficient = 0.932 ($p < 0.01$, $n = 16$). The line B represents linear regression of results from mulching+tunnel plots (marked with ▲) at open fields (soil mois. weight % = 29-50, 1987-1988); correlation coefficient = 0.902 ($p < 0.01$, $n = 29$). The line C represents linear regression of results from mulching plots (marked with ■) at open fields (soil mois. weight % = 28-47, 1988); correlation coefficient = 0.913 ($p < 0.01$, $n = 17$).

である50時間を得るうえで、有効地温到達日の日数がハウスの7日前後に比べてより多く必要となる。すなわち、Fig.13から露地のマルチ+トンネルでは8日前後、同マルチでは10日前後必要である。

3) 処理上の留意点

昇温および保温効果の低い露地のマルチ処理では、特に地温の上昇にくい下層土(10~20 cm)の殺菌効果が劣る(Table 51)。このことから、処理後下層からの病原糸状菌による再汚染や死滅し

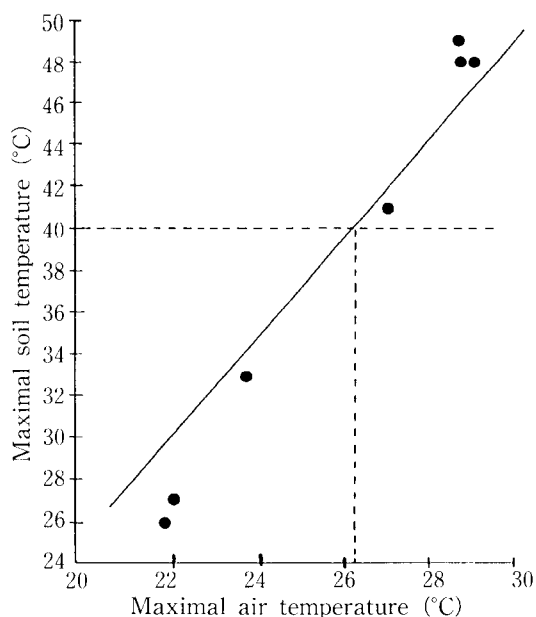


Fig. 14. Relationship between maximal air temperature and maximal soil temperature at a depth of 5 cm at soil solarization by mulching (level ridge) in open field. Field experiment at Matsumoto farm in 1988. Soil moisture weight percentage = 39. Correlation coefficient = 0.996 ($p < 0.01$, $n = 7$).

ていない雑草種子の上層への移行を防ぐうえで、耕起深を浅くするかあるいは不耕起栽培が望ましいと判断される。ただし、不耕起栽培の場合、太陽熱処理時の畝立て方法は平畝となり、地温上昇の点からみてやや不利である (Table 53)。Fig. 14 は不耕起栽培を前提としたマルチ平畝区の最高外気温と地中深 5 cm における最高地温の関係をみたものである。地中深 10 cm では有効地温が得られなかったが (Table 53)、この図から同 5 cm では 27°C 以上の最高外気温があれば、40°C 以上の有効地温が得られることが判る。このことから、マルチ平畝の場合の処理時期は気象条件の極めて良い期間に限定される。

また、露地のマルチでは耐熱性の強い *Fusarium* 属菌に対する殺菌効果は劣る (Table 51, 56)。したがって、死滅し易い *Pythium* spp., *A. cochlidioides* のそれぞれによって引き起こされる立枯病、根腐病を露地のマルチ処理の主な防除対象とすべきである。

以上の結果を勘案して、効果の期待出来る必須気象条件、処理適期および処理上の留意点を取りまとめ、Table 59 に示した。なお、処理適期は北海道の主要ホウレンソウ産地が存在する道央、道南地域の気象を想定し、必須気象条件に基づいて

Table 59. Desirable conditions of short-term soil solarization in open field for the control of soil-borne diseases, especially *Aphanomyces* root rot of spinach grown in summer and early autumn

Soil solarization			Indispensable climatic condition	Optimum time for solarization	Plowing after solarization
Covering	Ridging	Irrigation			
Mulching	Small	Untreated	About 10 fine days with maximal air temp. of more than 25 °C	July (middle) – August (middle)	Shallow plowing
Mulching	Level	Untreated	About 10 fine days with maximal air temp. of more than 27 °C	July (end) – August (early)	Plowless
Mulching + Tunnel	Small	Untreated	About 8 fine days with maximal air temp. of more than 20 °C	June (middle) – August (middle)	Shallow plowing

Notes 1) The recommended covering term is ca. 2 weeks.

2) The recommended soil moisture weight percentage at solarization is 30 – 50.

The suitable soil moisture weight percentage is 30 at the solarization by mulching alone in an open field, because it has less ability to raise soil moisture.

3) The recommended rate of soil conditioner application is 1 ton of half-matured or matured manure, 50 kg of calcium cyanamide per 10 a. These are to be mixed well with soil.

4) Mulching alone is effective only for reducing *Pythium* damping-off and *Aphanomyces* root rot, for these pathogens are more sensitive to solarization.

設定した。

第4節 太陽熱処理に伴う土壌の無機態窒素含量の変化と処理後の窒素肥培管理

太陽熱処理時の土壌は高温・高水分条件下にあることから、土壌の有機態窒素の無機化が想定される。そこで、本節では主にこの点の解明を試みた。さらに、処理後1作目における窒素減肥の適否についても検討した。

1. 太陽熱処理に伴う土壌の無機態窒素含量の変化

実験方法

1) ハウスにおける実験

1986年に札幌市有明地区の村重ハウス圃場1棟で実験を実施した。ハウスの1/2の面積(81 m²)に対して小畝造成と灌水を行った後、7月22日から8月4日まで14日間、不透明の塩化ビニールフィルムによるマルチ+トンネル被覆を行った。被覆処理区の一部に土壌改良資材無施用区(18.9 m²)を設定し、さらにその中に約0.25 m²の平畝部分を作った。この平畝部分の地中深10 cmと20 cmの地温を自記地温計で測定し、またこの部分から土壌を採取した。被覆前に、灌水チューブによる灌水を90分間行い、水が地中深約20 cmまで浸透していることを確認した上で被覆した。太陽熱処理開始時の7月22日の灌水直後と8月4日の処理終了時の2回、土壌を採取した。すなわち、土壌改良資材無施用区の平畝部分の地中深20 cmまでの土壌を5 cm刻みで4層に分けて採取し、含水比と無機態窒素の分析に供した。

2) 露地における実験

1988年に札幌市有明地区の村重圃場で実験を実施した。処理区として、被覆2方法(マルチ、マルチ+トンネル)×土壌改良資材施用の有無の計4処理(各1反復、20 m²/区)を設定した。土壌改良資材施用区では石灰窒素50 kg/10 aおよびバーク堆肥1 トン/10 aを施用した。いずれの処理区とも灌水処理は行わなかった。被覆には不透明の塩化ビニールフィルムを用いた。太陽熱処理期間は7月13日から7月26日までの14日間であった。地温の測定と土壌採取(処理開始時と終了時の2回)はハウスと同様の方法で行った。処理期間中の気象条件および地温は本章の第3節のTable 50に示した通りである。

結 果

ハウスにおける実験では土壌改良資材を施用していないので、主に太陽熱処理に伴う土壌そのものに由来する無機態窒素含量の変化を検討した。太陽熱処理期間中の地温は、地表面に近い上層において高かった(Table 60)。すなわち、最高地温の平均値は、地中深10 cmでは37°C、同20 cmでは33°Cであった。

土壌の含水比は処理前にはいずれの土層においても50%前後であったが、処理後の調査では40%前後にまで含水比は低下した(Table 61)。フィルム被覆前に行った灌水処理により土壌のNO₃-Nは溶脱し、下層へと移行した。そのため、地表面に近い土層(0~5 cm)のNO₃-N含量は少なかった。このようなNO₃-Nの土壌中の分布状況は太陽熱処理期間中にも維持されていたが、太陽

Table 60. Soil temperature at various depths of soil during soil solarization by mulching plus tunnel in vinyl greenhouse

Soil depth (cm)	Soil temp. during solarization ^{a)} (°C)						Integrated time of effective soil temp. ^{b)} (hrs)
	Min. temp.			Max. temp.			
	Min.	Mean	Max.	Min.	Mean	Max.	
10	17	28	36	20	37	48	67
20	17	28	37	19	33	44	46

a) Results between 23 July and 4 August at Murashige farm (1986).

b) See legend b) of Table 39.

Table 61. Change in content of inorganic nitrogen at various soil layers by soil solarization (mulching plus tunnel) without soil conditioner application in vinyl greenhouse

Soil layer (cm)	Before solarization (after irrigation ^{a)} , 22 July)			After solarization (4 August)				
	Soil mois. weight (%)	Inorganic nitrogen (mg/100g soil)		Soil mois. weight (%)	Inorganic nitrogen (mg/100g soil)		Increase in inorganic nitrogen (mg/100g soil)	
		NO ₃ -N	NH ₄ -N		NO ₃ -N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	NH ₄ -N
0-5	55	1.4	0.6	37	3.4	10.4	2.0	9.8
5-10	52	17.3	0.3	39	6.5	7.5	-10.8	7.2
10-15	50	16.5	0.6	39	10.2	5.7	-6.3	5.1
15-20	43	13.7	0.4	40	12.5	2.2	-1.2	1.8
Mean of 4 layers	50	12.2	0.5	39	8.2	6.5	-4.0	6.0

a) Field experiment at Murashige farm in Sapporo (1986).

Ninety minutes was spent for irrigation. Water penetrated into at a soil depth of ca. 20 cm.

熱処理に伴い NO₃-N 含量は減少した (Table 61)。すなわち、太陽熱処理前に溶脱により NO₃-N の少なかった 0～5 cm の土層では NO₃-N の減少が認められなかったが、5 cm 以下の土層では NO₃-N が減少しており、その減少量は地温が高く推移した 5～10 cm の土層で多かった。4 層の平均値でみると、処理前には NO₃-N は 12.2 mg/100 g あったが、処理後には 8.2 mg/100 g へと減少した。NO₃-N が減少した原因として、脱窒および処理期間中における地中深 20 cm 以下の下層への NO₃-N の溶脱が考えられた。

一方、土壌の NH₄-N 含量は処理前にはいずれの土層においても 1 mg/100 g 以下であったが、処理後増加した。その増加量は 4 層の平均値でみると、6.0 mg/100 g であった。とりわけ、地温が高く推移した土層において NH₄-N の増加量は多く、下層になるにつれて漸次増加量が少なくなることが認められた。NH₄-N が増加した原因として、有機態窒素の無機化による NH₄-N の生成が考えられた。

土壤改良資材施用区および無施用区を設定した露地における実験では、土壌および土壤改良資材由来の無機態窒素含量の変化を被覆方法別に検討した。太陽熱処理期間中の地中深 10 cm における最高地温の平均値は被覆方法により異なった。すなわち、マルチ被覆では 34°C であったが、昇温効

果の高いマルチ+トンネル被覆では 47°C と高かった。処理期間中の土壌の含水比の平均値はマルチ被覆では 47%，マルチ+トンネル被覆では 41% であった。なお、含水比の平均値は太陽熱処理前と後の含水比から算出した。Table 62 には太陽熱処理前と後の土壌の無機態窒素含量の実数を、Table 63 には Table 62 の実数を基に算出した土壌および土壤改良資材由来の無機態窒素の増減量をそれぞれ示した。ハウスの場合と同様に太陽熱処理によって NH₄-N の生成が認められたが、被覆方法の違いにより様相を異にした (Table 62)。土壌に由来する NH₄-N の生成は、マルチ被覆に比べて処理期間中の地温が高く推移したマルチ+トンネル被覆で顕著であった。すなわち、マルチ被覆では地温の上昇し易い 0～5 cm の土層においてのみ 10.4 mg/100 g の NH₄-N の増加が認められたのに対し、マルチ+トンネル被覆では地温の上昇にくい 10～15 cm の土層においてさえ、10.6 mg/100 g の NH₄-N の増加があった (Table 63)。これに対し、土壤改良資材に由来する NH₄-N の生成に及ぼす被覆方法の違いに基づく影響は小さかった。すなわち、土壤改良資材に由来する NH₄-N の生成量を 4 層の平均値でみると、マルチ被覆では 5.6 mg/100 g であり、マルチ+トンネル被覆では 7.6 mg/100 g であった。

Table 62. Change in soil pH and inorganic nitrogen content by soil solarization without irrigation in open field (Murashige farm in Sapporo, 1988)

1) Soil pH

Soil layer (cm)	Soil pH before solarization ^{a)} (13 July)	Soil pH after solarization (26 July)			
		Mulching		Mulching + Tunnel	
		Soil conditioner ^{b)}		Soil conditioner	
		Treated	Untreated	Treated	Untreated
0-5	5.5	6.5	5.9	6.4	6.1
5-10	5.4	6.1	5.4	6.1	6.1
10-15	5.4	5.9	5.2	6.0	5.8
15-20	5.4	5.7	5.5	6.3	5.5
Mean of 4 layers	5.4	6.1	5.5	6.2	5.9

a) Before soil conditioner application.

b) One ton of bark compost and 50 kg of calcium cyanamide per 10 a.

2) Ammonium nitrogen

Soil layer (cm)	NH ₄ -N (mg/100g) before solarization (13 July)	NH ₄ -N (mg/100g soil) after solarization (26 July)			
		Mulching		Mulching + Tunnel	
		Soil conditioner		Soil conditioner	
		Treated	Untreated	Treated	Untreated
0-5	1.5	17.8	11.9	20.4	14.5
5-10	1.5	11.0	1.3	22.0	14.9
10-15	1.7	7.6	0.7	21.7	12.3
15-20	1.4	0.7	0.8	14.4	6.5
Mean of 4 layers	1.5	9.3	3.7	19.6	12.0

3) Nitrate nitrogen

Soil layer (cm)	NO ₃ -N (mg/100g) before solarization (13 July)	NO ₃ -N (mg/100g soil) after solarization (26 July)			
		Mulching		Mulching + Tunnel	
		Soil conditioner		Soil conditioner	
		Treated	Untreated	Treated	Untreated
0-5	3.3	2.0	3.3	1.1	0.8
5-10	5.9	7.4	9.7	1.5	1.6
10-15	5.7	9.5	9.7	3.2	2.1
15-20	5.2	11.8	6.9	2.9	4.6
Mean of 4 layers	5.0	7.7	7.4	2.2	2.2

なお、マルチ被覆の地中深5 cm以下の地温が低く推移した土層において、土壌由来のNH₄-Nがやや減少したが、土壌由来のNO₃-Nが増加しており、同土層域においては生成したNH₄-Nの

一部は硝酸化成によりNO₃-Nへ変化していることがうかがわれた(Table 63)。一方、処理期間中の地温が高く推移したマルチ+トンネル被覆ではいずれの土層においても土壌由来のNO₃-Nが減

Table 63. Increase in inorganic nitrogen at various soil layers by soil solarization without irrigation at open field^{a)}

Soil solarization	Soil layer (cm)	Increase in inorganic nitrogen (mg/100g soil)											
		Increase in soil pH			NH ₄ -N			NO ₃ -N			Inorganic nitrogen (total)		
		Derived from:	Soil		Derived from:	Soil		Derived from:	Soil		Derived from:	Soil	
		Soil ^{b)}	conditioner ^{c)}	Total	Soil	conditioner	Total	Soil	conditioner	Total	Soil	conditioner	Total
Mulching (34°C) ^{d)}	0-5	0.4	0.6	1.0	10.4	5.9	16.3	0	-1.3	-1.3	10.4	4.6	15.0
	5-10	0	0.7	0.7	-0.2	9.7	9.5	3.8	-2.3	1.5	3.6	7.4	11.0
	10-15	-0.2	0.7	0.5	-1.0	6.9	5.9	4.0	-0.2	3.8	3.0	6.7	9.7
	15-20	0.1	0.2	0.3	-0.6	0.1	-0.7	1.7	4.9	6.6	1.1	4.8	5.9
	Mean of 4 layers	0.1	0.6	0.7	2.2	5.6	7.8	2.4	0.3	2.7	4.6	5.9	10.5
Mulching Tunnel (47°C)	0-5	0.6	0.3	0.9	13.0	5.9	18.9	-2.5	0.3	-2.2	10.5	6.2	16.7
	5-10	0.7	0	0.7	13.4	7.1	20.5	-4.3	-0.1	-4.4	9.1	7.0	16.1
	10-15	0.4	0.2	0.6	10.6	9.4	20.0	-3.6	1.1	-2.5	7.0	10.5	17.5
	15-20	0.1	0.8	0.9	5.1	7.9	13.0	-0.6	1.7	-2.3	4.5	6.2	10.7
	Mean of 4 layers	0.5	0.3	0.8	10.5	7.6	18.1	-2.8	-0.1	-2.9	7.7	7.5	15.2

a) Calculated based on the results of Table 62.

b) Calculated value: the analyzed value of a plot without soil conditioner application after solarization - the analyzed value of the plot before solarization.

c) Calculated value: the analyzed value of a plot with soil conditioner application after solarization - the analyzed value of a plot without soil conditioner application after solarization.

The rate of soil conditioner application was 1 ton of bark compost and 50 kg of calcium cyanamide per 10 a.

d) The average of maximal soil temperature at a depth of 10 cm during solarization.

少しており、脱窒がその原因と考えられた。さらに、太陽熱処理に伴う土壌由来の NH₄-N の生成や土壌改良資材施用の影響を受けて、土壌 pH の上昇がいずれの被覆方法においても認められた (Table 63)。

2. 土壌の無機態窒素含量の増減に及ぼす土壌水分、温度および土壌改良資材の影響

実験方法

札幌市有明地区の初夏どりハウレンソウ収穫後の村重露地圃場の土壌を用いた。供試土壌は中粒質の褐色低地土であり、処理前の化学性は、腐植：8.7%，pH：5.4，NH₄-N：0.6 mg/100 g，NO₃-N：12.0 mg/100 g であった。また、供試バーク堆肥の原物の化学性は、pH：7.5，炭素 (C)：8.3%，窒素 (N)：0.5%，C/N：16.6 であった。C と N は CN コーダーで分析した。

処理区として、加温温度 3 処理 (30, 40, 50°C) × 含水比 3 処理 (5, 35, 65%) × 土壌改良資材施用 4 方法 (無施用、石灰窒素のみ、バーク堆肥のみ、

石灰窒素 + バーク堆肥) の計 36 処理 (各 3 反復) を設定した。

250 ml 容のポリビンに 21.0 g の含水比 5% の風乾細土を入れ、土壌水分の調整と石灰窒素の添加が必要な処理区では石灰窒素 10 mg を蒸留水に懸たくして加え、併せて水分調整も行った。バーク堆肥は原物で 200 mg 添加した。なお、石灰窒素とバーク堆肥の添加量は、10 a 当りの土壌量 100 トン (仮比重 1.0, 土層 0 ~ 10 cm) に対して石灰窒素 50 kg/10 a, バーク堆肥 1 トン/10 a の施用量を想定して算出した。次に各処理区のポリビンの口をポリ塩化ビニリデンフィルムで密閉し、30, 40, 50°C に調節した恒温器内に入れ、太陽熱処理時の地温変化を想定し、1 週間の変温処理を行った。1 日のうち 8 時間を上記の高温で、残りの 16 時間を 25°C で加温した。各高温条件の積算時間は 56 時間であった。加温後、直ちに土壌中の NH₄-N と NO₃-N の含量を分析した。

結 果

Table 64 に土壌の無機態窒素含量の増減に及ぼす温度、水分および土壌改良資材の影響を示した。土壌の全無機態窒素の増加量は、太陽熱処理時の土壌条件にほぼ匹敵する処理区で多かった。すなわち、加温温度が 40°C 以上で、かつ含水比が 35% 以上の処理区では加算値で 14.1~19.2 mg/100 g の、石灰窒素+バーク堆肥区の実測値で 12.2~17.1 mg/100 g の増加が認められた。この無機態窒素の増加の大部分は $\text{NH}_4\text{-N}$ の生成に基づくものであり、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の寄与は小さかった。増加した $\text{NH}_4\text{-N}$ はそのほとんどが土壌と石灰窒素由来のものであり、バーク堆肥由来の $\text{NH}_4\text{-N}$ 量は極めて少なかった。

土壌由来の $\text{NH}_4\text{-N}$ の生成は、昇温効果の高いマルチ+トンネル被覆を想定した処理区で多かった。すなわち、加温温度が 50°C で含水比が 35% 以上の高温・多湿条件下の処理区で $\text{NH}_4\text{-N}$ の生成量が多く、7.2~8.7 mg/100 g であった。一方、昇

温効果の低いマルチ被覆を想定した加温温度が 40°C で含水比が 35% 以上の区では、土壌由来の $\text{NH}_4\text{-N}$ の生成量は 0.4~0.9 mg/100 g と少なかったが、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は 1.8~2.5 mg/100 g 増加した。このことから、この区では生成した $\text{NH}_4\text{-N}$ の一部は硝酸化成により $\text{NO}_3\text{-N}$ へと変化する事が示された。

石灰窒素由来の $\text{NH}_4\text{-N}$ 生成に及ぼす温度の影響は、30~50°C の温度域では判然としなかった。しかし、土壌水分の影響は明瞭に認められた。すなわち、各温度を通じ、含水比 5% の乾燥条件下における $\text{NH}_4\text{-N}$ の生成量は 1.2~3.4 mg/100 g であったが、35% 以上では 9.1~13.2 mg/100 g と多かった。

前述した圃場実験のマルチ+トンネル区の結果から予想された高温条件下における $\text{NO}_3\text{-N}$ の脱窒と思われる現象は、50°C 含水比 5 および 35% 区で認められたが、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の減少量の合計はそれぞれ 1.9, 1.2 mg/100 g と少なかった。一方、石

Table 64. Effect of soil temperature, moisture and soil conditioner application on increase in inorganic nitrogens in soil (*in vitro*)

Heating (°C)	Soil mois. weight (%)	Increase in inorganic nitrogen (mg/100g soil)											
		NH ₄ -N				NO ₃ -N				Inorganic nitrogen (total)			
		Soil ^{a)}	Derived from:		Total	Soil	Derived from:		Total	Soil	Derived from:		Total
			Calcium cyanamide ^{b)}	Manure ^{c)}			Calcium cyanamide	Manure			Calcium cyanamide	Manure	
30	5	0.2	1.2	0.3	1.7(1.9) ^{d)}	-2.4	1.7	1.2	0.5(-1.1) ^{d)}	-2.2	2.9	1.5	2.2(-0.8)
	35	0.2	11.5	0	11.7(11.8)	2.5	-1.4	0.1	1.2(-0.5)	2.7	10.1	0.1	12.9(11.3)
	65	-0.2	11.7	0.4	11.9(10.9)	2.3	1.1	-0.8	0.4(-1.4)	2.1	10.6	-0.4	12.3(-9.5)
40	5	0.5	2.0	0.3	2.8(2.0)	0.2	0	-0.8	-0.6(-2.4)	0.7	2.0	-0.5	2.2(-0.4)
	35	0.9	11.9	1.0	13.8(13.1)	2.5	-0.2	0.3	2.6(-0.4)	3.4	11.7	1.3	16.4(12.7)
	65	0.4	13.2	0.2	13.4(13.1)	1.8	-1.8	0.7	0.7(0.9)	2.2	11.4	0.5	14.1(12.2)
50	5	0.8	3.4	0.1	4.3(3.3)	-1.2	-0.8	0.1	-1.9(-1.7)	-0.4	2.6	0.2	2.4(-1.6)
	35	8.7	9.1	0.4	17.4(17.0)	1.0	-0.8	0.6	-1.2(0.1)	7.7	8.3	0.2	16.2(17.1)
	65	7.2	10.3	0.9	18.4(17.0)	1.2	0.3	-0.7	0.8(2.9)	8.4	10.6	0.2	19.2(14.1)

a) Calculated value: the analyzed value of a plot without soil conditioner after incubation—the analyzed value of the plot before incubation.

b) Calculated value: the analyzed value of a plot with calcium cyanamide (50mg/100g soil) after incubation—the analyzed value of a plot without soil conditioner after incubation.

c) Calculated value: the analyzed value of a plot with bark compost (1g/100g soil) after incubation—the analyzed value of a plot without soil conditioner after incubation.

d) The values in parentheses indicate the increase in inorganic nitrogen of a plot with manure and calcium cyanamide by incubation, namely the value of the increase in inorganic nitrogen derived from soil, calcium cyanamide and bark compost.

Formula: the analyzed value of a plot with bark compost and calcium cyanamide after incubation—the analyzed value of a plot with soil conditioner before incubation.

灰窒素＋バーク堆肥区の $\text{NO}_3\text{-N}$ の実測値をみると、ほとんどの処理区で $\text{NO}_3\text{-N}$ は減少しており、特に 50°C 含水比 65% 区では $\text{NO}_3\text{-N}$ の減少量は多く、 $2.9\text{ mg}/100\text{ g}$ であった。

3. 太陽熱処理後 1 作目のハウレンソウの収量に及ぼす窒素減肥の影響

実験方法

1) ハウスにおける実験

1987 年に札幌市有明地区の松本ハウス圃場 1 棟で実験を実施した。処理区として、被覆 2 方法 (マルチ, マルチ＋トンネル) $\times$ N 施肥量 3 段階 (無施用, 7.5 , $15.0\text{ kg}/10\text{ a}$) の計 6 処理 (各 1 反復, $5.4\text{ m}^2/\text{区}$) を設定した。 $15\text{ kgN}/10\text{ a}$ が標準の窒素施肥量である。6 月 29 日に石灰窒素 $50\text{ kg}/10\text{ a}$ とバーク堆肥 $1\text{ トン}/10\text{ a}$ を施用後、灌水処理および塩化ビニールフィルムによる被覆を行った。太陽熱処理期間は 6 月 29 日から 7 月 14 日までの 16 日間であった。処理終了後、窒素施肥 (硝安)

を行った。さらに全処理区に対して、 K_2O (硫加) : $10\text{ kg}/10\text{ a}$, P_2O_5 (過石) : $10\text{ kg}/10\text{ a}$ を施用した。7 月 17 日にハウレンソウ (品種：グローバル) を播種し、8 月 18 日に収量調査を行った。

2) 露地における実験

1988 年に札幌市有明地区の松本圃場で実験を実施した。処理後の耕起 2 方法 (不耕起, 耕起) $\times$ N 施肥量 2 段階 (7.5 , $15.0\text{ kg}/10\text{ a}$) の計 4 処理 (各 1 反復, $7.5\text{ m}^2/\text{区}$) を設定した。8 月 1 日に硝安を用いて窒素施肥を行い、さらに全処理区に対して K_2O (硫加) : $10\text{ kg}/10\text{ a}$, P_2O_5 (過石) : $10\text{ kg}/10\text{ a}$, 石灰窒素 : $50\text{ kg}/10\text{ a}$ およびバーク堆肥 : $1\text{ トン}/10\text{ a}$ を施用した後、フィルムによる被覆を行った。なお、太陽熱処理時の畝立て法は、不耕起系列では平畝、一方耕起系列では小畝であった。8 月 1 日から 8 月 14 日までの 14 日間、全ての処理区に対して塩化ビニールフィルムによるマルチ被覆を行った。8 月 16 日にハウレンソウ

Table 65. Effect of cutting down rate of nitrogen application on yield of spinach as the first crop after solarization

Field ^{a)}	Soil treatment ^{b)}	Ridging	After solarization			At the first cropping after solarization		
			Inorganic nitrogen (mg/100g soil)			Rate of Nitrogen ^{c)} application (kgN/10a)	Healthy plant (harvest time)	
			$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	Total		Height (cm)	Weight of 10 plants (g)
Vinyl greenhouse	Solarized (mulching)	Small	2	13	15	0	27.9	346
						7.5	28.9	333
						15.0	30.0	350
Vinyl greenhouse	Solarized (mulching + tunnel)	Small	5	11	16	0	31.2	367
						7.5	28.4	321
						15.0	29.0	321
Open field	Solarized (mulching)	Small	32	14	46	7.5	21.9	182
			36	21	57	15.0	21.5	165
Open field	Solarized (mulching)	Level	29	17	46	7.5	25.0	188
			36	26	62	15.0	22.1	170

a) Greenhouse experiment at Matsumoto farm in Sapporo (1987).

Open field experiment at Matsumoto farm in Sapporo (1988).

b) The rate of soil conditioner application was 1 ton of bark compost and 50 kg of calcium cyanamide per 10 a.

c) Nitrogen as ammonium nitrate was applied after solarization in the greenhouse, before solarization in the open field.

(品種：パロック)を播種し、9月19日に収量調査を行った。

結 果

ハウスと露地における太陽熱処理後1作目のホウレンソウの収量に及ぼす窒素減肥の影響をTable 65に示した。ハウスにおける太陽熱処理後の土壌の無機態窒素含量は、いずれの被覆系列とも15 mg/100 g程度であった。このような土壌条件下では、処理後の栽培において窒素減肥を行っても収量の低下は認められなかった。すなわち、窒素標準区(15 kgN/10 a)と窒素減肥系列(無施用, 7.5 kgN/10 a)の10株重には、処理の差がなかった。太陽熱処理前に窒素施肥を行った露地における実験では、太陽熱処理後の土壌の無機態窒素含量は窒素標準区(15 kgN/10 a)において多く、50 mg/100 gを超えていた。そのため、同区では濃度障害に起因すると思われる生育抑制が認められ、窒素減肥区(7.5 kgN/10 a)に比べて10株重はやや低かった。

考 察

土壌の有機態窒素(以後、土壌窒素)の無機化に伴う $\text{NH}_4\text{-N}$ の生成は高温・高水分条件下で促進される¹⁰⁴⁾。この現象は地温上昇効果と呼ばれている。一般に、最大容水量の60~80%の水分域で、かつ温度が30~45°Cの条件下で無機化は促進されるが、山根ら⁹⁴⁾によれば、湛水条件下の土壌窒素の無機化量は、さらに高温の60°Cまで温度の上昇につれて、増加するという。また、高温・高水分条件下では $\text{NO}_3\text{-N}$ の脱窒が促進されることが報告されている。すなわち、甲斐ら³⁷⁾は、湛水条件下の脱窒は45°Cまで温度が高いほど速く進行することを指摘している。これに対し、硝酸化成は最大容水量の50~60%の水分域で、かつ温度が25~30°Cで促進されると言われており、硝酸化成は土壌窒素の無機化や脱窒の場合に比べて、低い温度域で進行する³⁶⁾。さらに、吉倉ら¹⁰⁵⁾は太陽熱処理によって $\text{NH}_4\text{-N}$ が土壌中に蓄積する現象を認めている。

本節の実験においても、太陽熱処理期間中の圃場は、地中深10 cmの最高地温が概ね30~50°Cと高く、かつ土壌の含水比が40~50%と高い高温・

高水分条件下にあったため、①土壌窒素の無機化に伴う $\text{NH}_4\text{-N}$ の生成、②脱窒によると思われる $\text{NO}_3\text{-N}$ の減少、および③硝酸化成が認められた。

太陽熱処理による土壌窒素の無機化量は、土壌の種類、栽培来歴、地温、土壌水分および土壌pHによってそれぞれ異なることが予想されるが、本節では主に地温の影響を明らかにする目的から、2通りの被覆方法で太陽熱処理を行った。その結果、無機化に伴う $\text{NH}_4\text{-N}$ の増加は、昇温効果の低いマルチ区(露地)では地温の上昇し易い地表面に近い土層(0~5 cm)において、一方、昇温効果の高いマルチ+トンネル区(ハウス、露地)では10 cm以下の地温が上昇しにくい土層でも認められた(Table 61, 63)。無機化に伴う $\text{NH}_4\text{-N}$ の増加量を土層0~20 cmの平均値でみると、地中深10 cmにおける最高地温の平均値が34°Cであった露地のマルチ区では2.2 mg/100 g、一方同地温が37°Cであったハウスのマルチ+トンネル区では6.0 mg/100 g、同地温が47°Cであった露地のマルチ+トンネル区では10.5 mg/100 gであった。このことから、太陽熱処理時のような高水分条件下では高地温ほど土壌窒素の無機化が進行し易いことが示された。このことは前述した土壌窒素の無機化に関する既往の知見とも符合する。北海道における現地のホウレンソウ栽培圃場では毎年1~3トン/10 aの有機物が通常施用されており、そのため土壌窒素の富化が起こり太陽熱処理時にはかなりの量の $\text{NH}_4\text{-N}$ が発現するものと思われる。

また、高地温であったハウスおよび露地のマルチ+トンネル区では、脱窒によると思われる $\text{NO}_3\text{-N}$ の減少も認められた。さらに昇温効果の低かったマルチ区(露地)における地温の上昇しにくい下層域(土層: 5~20 cm)では硝酸化成に伴う土壌由来の $\text{NH}_4\text{-N}$ の減少と $\text{NO}_3\text{-N}$ の増加が認められた(Table 63)。これらの実験結果から、土壌窒素の無機化に伴う $\text{NH}_4\text{-N}$ の生成と脱窒によると思われる $\text{NO}_3\text{-N}$ の減少は、硝酸化成に比べて、より高い温度域で進行することが示された。このことは前述した既往の知見とほぼ符合する。

これらの現地における実験結果をモデル実験により確認することができたが、モデル実験では加温期間が1週間と現地の2週間に比べて短かったこともあり、加温温度50°Cの含水比5%および35%区における脱窒によると思われる $\text{NO}_3\text{-N}$ の減少量は少なかった。さらに、モデル実験では現地で得られた知見の確認に加えて、次のことも認められた(Table 64)。**①**土壌窒素の無機化に伴う $\text{NH}_4\text{-N}$ の生成量は、50°Cの高温下であっても含水比5%の乾燥条件下では極めて少ない。**②**土壌改良資材由来の $\text{NH}_4\text{-N}$ の生成は主に石灰窒素(Ca-シアナミド)に起因しており、堆肥の寄与は小さい。**③**30~50°Cの温度域では、Ca-シアナミドから $\text{NH}_4\text{-N}$ への変化に及ぼす温度の影響は判然としなかったが、土壌水分の影響は明瞭に認められた。すなわち、含水比5%の乾燥条件下では $\text{NH}_4\text{-N}$ の増加量は少なかったのに対し、太陽熱処理時を想定した35、65%の高水分条件下では各温度を通じて、9.1~13.2 mg/100 gの $\text{NH}_4\text{-N}$ が増加した。

計算上、添加した窒素分20%の石灰窒素から $\text{NH}_4\text{-N}$ が10 mg/100 g発現することを考えると、含水比35%以上では、**③**の結果を論拠に石灰窒素から $\text{NH}_4\text{-N}$ への変化はほぼ100%進行するものと判断される。したがって、50 kg/10 aの石灰窒素を施用した場合、太陽熱処理期間中高水分条件下にある処理圃場では10 kg/10 aの $\text{NH}_4\text{-N}$ の富化が起こる。このことに加えて、土壌窒素の無機化に伴う $\text{NH}_4\text{-N}$ の生成や前作栽培由来の土壌の残存 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量などを勘案すると、脱窒によると思われる $\text{NO}_3\text{-N}$ の減少分を差し引いても太陽熱処理後の土壌の無機態窒素含量は相当量にのぼるものと考えられる。現に、露地における太陽熱処理に伴う土壌中の無機態窒素の増加量だけでもマルチ区では10.5 mg/100 g(土層:0~20 cmにおける平均値)、一方マルチ+トンネル区では15.2 mg/100 gであった(Table 63)。ちなみに、この無機態窒素の増加量を圃場10 a当りの窒素施肥量に換算すると、マルチ区の場合には約21.0 kg、マルチ+トンネル区では約30.4 kgとなる。夏どりハウレンソウの標準の窒素施肥量は15

kgN/10 aであること²⁴⁾や、初夏どりハウレンソウに対する窒素用量試験を行った結果、40 kgN/10 a施用区に比べて20 kgN/10 a施用区の収量が優っていた(第IV章第1節のTable 35)ことなどを勘案すると、太陽熱処理後のハウレンソウ栽培においては窒素の減肥が可能であり、窒素の減肥は濃度障害の回避の面からも望ましいと考えられる。事実、現地試験において窒素減肥によるハウレンソウの収量低下は認められず、窒素減肥はむしろ濃度障害の回避に有効であることが示された(Table 65)。

第5節 根部搬出による発生軽減対策

北海道におけるハウレンソウの収穫では、通常、地際の株元から地上部のみが刈り取られるため、収穫後根部が圃場土壌中に残る。こうした残根により土壌の微生物相が悪変し、土壌病害の多発生が助長されることも想定される。したがって、土壌中の残根は圃場衛生上問題となる。そこで、本節では前作のハウレンソウの残根が次作の土壌病害の発生に及ぼす影響を明らかにするとともに、病害発生の軽減に対する根部搬出の効果を実証した。

1. 土壌中におけるハウレンソウの残根が土壌病害の発生に及ぼす影響

実験方法

1988年9月27日に北海道立中央農試のハウレンソウ4連作目の圃場から、供試土壌と収穫時の根を採取した。土壌は乾燥させずに生土の状態を実験に供した。一部の土壌をオートクレーブ(121°C 2時間)で滅菌し、殺菌土の実験系に用いた。滅菌に伴う土壌の養水分の変化はほとんど認められなかった。根は肉眼判定によって正常、罹病の2種類を採取し、正常、罹病別にダンボール箱に詰め室内に約2週間放置した後、実験に供した。なお、正常、罹病の判定は次の基準により行った。正常根:外観的に正常と認められるもの。罹病根:根腐れ症状あるいは導管褐変が認められるもの。

処理区として、土壌2種類(殺菌土、無殺菌土)×根の混入4方法(無混入、罹病根3g、正常根3g、

正常根 6 g/ポット)の計 8 処理を設定し、4 反復で実験を行った。殺菌および無殺菌土壌各 500 g に K_2O (硫加): 12 mg/100 g, P_2O_5 (過石): 10 mg/100 g を加え、次に 3~5 mm の長さに切断した生乾きの根を入れ、よく混和し、これらの土壌をノイバイエルポットに詰めた。ポット当り 15 粒のハウレンソウ種子を播種した後、ポットの内壁に装着した給水パイプから、N (硝安): 15 mg/100 g を液肥の形態で加えた。播種後 12 日目の子葉期に立枯れ株率を調査した後、立枯れ株のみを採取し、根部から糸状菌を検出した。また、発芽株数の多かった殺菌土系列では間引きを行い、ポット当り 8 株に調整した。無殺菌土系列では発芽株数が少なかったため、立枯れ株の採取のみを行い、間引きは行わなかった。播種後 35 日目に全株を抜取り、根部の病徴の観察および糸状菌の検出を行った。なお、実験は 25°C の温室内で実施した。

結 果

播種後 12 日目の発芽率および立枯れ株の発生状況を Table 66 に示した。無殺菌土系列の発芽率は 37~67% であり、殺菌土系列の 80~87% に比べて低かった。いずれの系列とも根の混入に伴い発芽率は低下したが、混入根の種類、量の違いに基づく発芽率の差は判然としなかった。とりわけ、発芽率の低下は無殺菌土系列の根混入区で顕著であり、37~45% の発芽率であった (Plate VII-3)。

また、両土壌系列とも罹病根、正常根を問わず根を混入した処理区では、いずれも立枯れ株が発生した。殺菌土系列の立枯れ株率は、罹病根混入区において高く、16.3% であった。一方、無殺菌土系列でも同様に罹病根混入区において高く、11.1% であった。

なお、無殺菌土系列の無混入区において立枯れ株率が 20% と高かった原因として、次のことが考えられた。すなわち、同系列の根を混入した処理区では発芽率が極めて低いことから、発芽前に立枯れ株が多く発生したのに対し、無混入区では発芽後に立枯れ株が発生したものと推察された。いずれにしても無殺菌土系列の無混入区の正常株数は根を混入した処理区に比べて多かった。両土壌

系列を通じて発生した立枯れ株の大部分は、病徴と根部から検出された糸状菌を勘案すると、*Pythium* 属菌を病原とする立枯病によるものであり、一部は *Aphanomyces* 属菌を病原とする根腐病によるものであった。

播種後 35 日目においては (Table 67)、両土壌系列とも根の混入に伴い萎ちょう黄化株が多発生し (Plate VII-4)、とりわけ、殺菌土系列で多かった。病徴と根部から検出された糸状菌を勘案すると、萎ちょう黄化株のほとんどは、*Fusarium* 属菌を病原とする萎ちょう病によるものであり、一部は立枯病および根腐病によるものであった。

また、いずれの系列とも根を混入した処理区のうち、正常根 3 g 混入区では萎ちょう黄化株率が低く、生育もやや優った。これらのことから、ハウレンソウの残根は正常根、罹病根を問わず、土壌病害の多発生に起因する発芽および生育抑制など引き起こすため、圃場衛生上問題となることが示された。

2. 前作収穫時の根部搬出が次作の土壌病害の発生に及ぼす影響

実験方法

1) 圃場実験

1988 年の 5 月 25 日に北海道立中央農試の圃場において 1 作目のハウレンソウを畦幅 20 cm の間隔で 32 m² の面積に播種した。播種後 *F. oxysporum* f. sp. *spinaciae* (F-98) を接種した。菌の培養および接種方法は次の通りである。F-98 菌株をジャガイモ煎汁ショ糖加用液体培地 5.3 リットル内で 25°C で 29 日間培養した後、得られた菌糸塊を殺菌水で数回洗浄し、ミキサーで殺菌水との懸濁液とした。これを水道水で 40 リットルに希釈した後、畦上に如露で均一に散布した。なお、1 作目の施肥量は、N (硝安): 20 kg/10 a, K_2O (硫加): 12 kg/10 a, P_2O_5 (過石): 10 kg/10 a であった。栽培後、1 作目の収穫を早期 (7 月 4 日)、中期 (7 月 8 日)、晩期 (7 月 12 日) の 3 期に分けて行い、圃場への残根量を 3 段階 (1 処理区当り 8 m², 1 反復) 設定した。さらに根部を搬出する処理区 (7 月 4 日) を設けた。すなわち、残根処理系列では、現地の収穫方法にならい地際か

Table 66. Effect of intermixing spinach root residues with soil on severity of soil borne diseases of cotyledonary spinach

1) Germination and damping-off severity

Soil ^{a)}	Root intermixed ^{b)}	Amount of root (g/pot)	12 days after sowing				
			Seeds sowed ^{c)} (no.)	Germination (%)	Healthy plants (no.)	Damping-off	
						No.	%
Sterilized	Control	0	60	86.7	52	0	0
	Diseased	3	60	81.7	41	8	16.3
	Healthy	3	60	80.0	43	5	10.4
	Healthy	6	60	80.0	44	4	8.3
Non-sterilized	Control	0	60	66.7	32	8	20.0
	Diseased	3	60	45.0	24	3	11.1
	Healthy	3	60	36.7	20	2	9.1
	Healthy	6	60	41.7	23	2	8.0

a) The soil was collected from a field where spinach was cropped four times continuously in Hokkaido Central Agricultural Experiment Station.

b) The spinach root residues were collected from the field of legend a)
Diseased root : root rot or root with discoloration of vascular system
Healthy root : healthy at a glance.

c) The number of seeds sowed per pot was 15 (4 replicates).

2) Detection of pathogens from damping-off plant

Soil	Root intermixed	Amount of root (g/pot)	Detection of pathogens (%)			
			Root tested (no.)	<i>Pythium</i>	<i>Rhizoctonia</i>	<i>Aphanomyces</i>
Sterilized	Control	0	0	—	—	—
	Diseased	3	8	87.5	0	25.0
	Healthy	3	5	100.0	0	0
	Healthy	6	4	100.0	0	0
Non-sterilized	Control	0	8	100.0	12.5	0
	Diseased	3	3	100.0	0	33.3
	Healthy	3	2	100.0	0	100.0
	Healthy	6	2	100.0	0	0

ら地上部のみを鎌で刈り取り、根部を圃場に残し、一方根部搬出区では剣先スコップで地中深約 25 cm までの土を掘り起こし、根付きのままハウレンソウを収穫した。

Table 68 に示したように、収穫期が遅くなるに伴い圃場への残根量が増加しており、3 段階の残根量を設定できた。また、1 作目の収穫時に設定した残根および根部搬出処理区の 1 作目収穫時の萎ちょう黄化株率および土壌の残存無機態窒素含

量はほぼ同じ値であり、各処理区についてほぼ同一の土壌条件を設定し得た。なお、1 作目の栽培時期は低温期に当たっていたため、萎ちょう病に起因する萎ちょう黄化株の発生は極めて少なかった。

以上の残根および根部搬出処理を行った後、2 作目のハウレンソウを 7 月 26 日に播種した。全処理区に対して、N (硝安) : 40 kg/10 a, K₂O (硫加) : 12 kg/10 a, P₂O₅ (過石) : 10 kg/10 a を施用

Table 67. Effect of intermixing spinach root residues with soil on severity of soil-borne diseases and on the growth of spinach in middle growth stage

1) Wilt severity and growth of spinach

Soil	Root intermixed	Amount of root (g/pot)	35 days after sowing				
			Surviving plants ^{a)} (no.)	Wilt (%)	Diseased and Healthy plants		
					Height (cm)	Leaves (no.)	Weight of 10 plants (g)
Sterilized	Control	0	32	0	8.6	6.0	15.6
	Diseased	3	26	92.3	4.6	4.0	3.4
	Healthy	3	26	69.2	5.8	4.9	5.7
	Healthy	6	25	76.0	4.9	4.3	3.2
Non-Sterilized	Control	0	23	47.8	5.7	5.2	6.9
	Diseased	3	18	66.7	3.7	3.5	2.8
	Healthy	3	19	57.9	5.1	4.6	3.8
	Healthy	6	15	73.3	3.8	3.5	3.4

a) Damping-off plants were collected at cotyledonary stage.

The number of plants in each plot of sterilized soil was arranged 8 plants per pot by thinning at cotyledonary stage, in each plot of nonsterilized soil, not arranged because of poor germination.

2) Detection of pathogens from plant of middle growth stage

Soil	Root intermixed	Amount of root (g/pot)	Detection of pathogens ^{a)} (%)			
			Root tested (no.)	<i>Pythium</i>	<i>Aphanomyces</i>	<i>Fusarium</i>
Sterilized	Control	0	32	0	0	21.9
	Diseased	3	26	3.8	15.4	100.0
	Healthy	3	26	7.7	11.5	100.0
	Healthy	6	25	24.0	8.0	100.0
Non-Sterilized	Control	0	23	8.7	4.3	87.0
	Diseased	3	18	16.7	0	88.9
	Healthy	3	19	10.5	0	78.9
	Healthy	6	15	20.0	0	66.7

a) *Rhizoctonia* sp. was not detected.**Table 68.** Root treatment, amount of root residues in field and content of inorganic nitrogen remaining in soil at harvest time of preceding cropping of spinach

Harvesting method (root treatment)	Date (1988)	Plant height (cm)	Root weight (g)	Root residue in field ^{a)} (kg/8m ²)	Wilt (%)	Soil pH	Inorganic nitrogen (mg/100g soil)	
							NH ₄ -N	NO ₃ -N
Cutting off	Early (4 July)	18.8	1.79	1.02	0.9	5.5	0.6	7.3
Cutting off	Middle (8 July)	21.1	2.28	1.30	0.8	5.6	0.3	5.0
Cutting off	Late (12 July)	28.8	2.67	1.52	0.7	5.7	0.5	5.1
Pulling out	Early (4 July)	17.1	—	—	0.9	5.4	0.3	6.4

a) Calculated value : Root weight × the number of plants per 8 m².The number of plants per 8 m² was 571 (inter-row distance : 20cm, inter-plant distance : 7cm).

Table 69. Effect of root treatment at harvest time of preceding spinach on reducing *Fusarium* wilt and on the growth of spinach grown in early-autumn

Root treatment of preceding spinach ^{a)}		At harvest time of next cropping (22 Sept.)					
Harvesting method	Date (1988)	4 m per row			Healthy plant		
		Surviving plants (no.)	Healthy plants (no.)	Wilt (%)	Height (cm)	Leaves (no.)	Weight of 10 plants (g)
Cutting off	Early (4 July)	52	50	3.8	22.4	10.7	210
Cutting off	Middle (8 July)	43	37	14.0	19.5	11.0	181
Cutting off	Late (12 July)	39	34	12.8	19.0	10.9	168
Pulling out	Early (4 July)	52	50	3.8	25.5	12.1	280

a) Field experiment at Hokkaido Central Agricultural Experiment Station in 1988.

Each plot was infested with *F. oxysporum* f. sp. *spinaciae* (isolate : F-98) at the sowing time of preceding cropping.

Cutting off: Top (stem and leaf) was harvested. Root remained in field.

Pulling out: Top with root was harvested.

Table 70. Effect of pulling out root at harvest time of preceding spinach on reducing soil-borne diseases and on the growth of next spinach in open field

Continuous cropping field ^{a)}	Treatment at harvest time of preceding spinach	At harvest time of next spinach (8 Sept.)				
		Per row			Healthy plant	
		Surviving plants (no.)	Healthy plants (no.)	Wilt (%)	Height (cm)	Leaves (no.)
9 times (spinach)	Cutting off	13	6	53.8	22.9	10.6
	Pulling out	17	14	17.6	26.8	12.1
5 times (spinach)	Cutting off	30	24	20.0	22.2	9.9
	Pulling out	37	33	10.8	26.2	11.2

a) Field experiment at Katsuzaki farm in Sapporo (1986).

b) The area investigated was 3 m per row at the 9 times field (5 replicates), 5 m per row at the 5 times field (5 replicates).

した。9月22日に土壤病害の発生状況と収量を調査した。なお、窒素無施用および20 kgN/10 a系列も設定したが、8月下旬に合計152 mmの降雨に見舞われ、これらの系列の一部に滞水箇所が生じたため、調査不能であった。

2) 現地実験

1986年に札幌市有明地区の1農家の露地ホウレンソウ連作圃場において実験を実施した。1作目収穫時の7月31日に9連作および5連作圃場の一部分において、それぞれ7.5, 15.0 m²の面積にわたり、スコップによる根部搬出処理を行った。

8月2日に2作目を播種し、農家慣行で栽培した。9月8日に土壤病害の発生状況と収量を調査した。なお、根部搬出区に隣接した農家慣行の刈り取り区を対照とした。

結 果

圃場実験の結果をTable 69に示した。圃場への残根量の少ない早期(7月4日)に刈り取り収穫を行った区並びに根部搬出区では、収穫時の株数が多く、萎ちょう黄化株率は低く(Plate VII-5, 6), 生育も旺盛であった。現地実験の根部搬出区においても、同様の結果が得られた(Table 70)。

考 察

京都府を中心とした近畿地方ではハウレンソウは根付きで収穫、出荷されており、その利点は、店頭における棚持ちの良さと土壤病害を主体とした連作障害の回避にあると言われている。翻って、北海道では農家一戸当りのハウレンソウの栽培面積が大きいので、作業の煩雑な根付き収穫は敬遠され、刈り取り収穫が一般的である。加えて、ハウレンソウの生育期間はほぼ35日前後と短いことから、通例、年間に2ないし4作栽培される。したがって、本道におけるハウレンソウの連作圃場では土壤中の残根の蓄積は相当量にのぼるものと考えられる。

本節のポット実験を通じ、ハウレンソウの残根は罹病根、正常根を問わず、土壤病害の発生に起

因する発芽および生育抑制を引き起こすため、圃場衛生上問題となることが示された (Table 66, 67)。ハウレンソウの根群のうち、搬出し易い主根の占める割合が高いことや、罹病部位が地際下ほぼ10 cm以内の主根に概ね限られていることを考えると、搬出し易い主根主体の搬出であっても、発生軽減効果は十分に期待できるものと思われる。現に、圃場および現地実験で初夏どり収穫時に根部搬出を行った場合には、次作の初秋どりにおいて土壤病害の発生軽減や生育促進効果が認められた (Table 69, 70)。このように、土壤病害が多発生する作型に対する土壤病害の発生軽減を目的として、前作収穫時のみに根部を搬出しても効果は期待できるが、毎作継続的に搬出するのが最も望ましいと考える。

第V章 総合考察

土壌中には、作物の根の表面組織や導管部を侵す寄生性の糸状菌、細菌など、いわゆる土壌病原菌が生息している。これらを病原とする土壌病害は根部の腐敗、地上部の立枯れおよび萎ちょう黄化といった生育障害を引き起こすため、その被害は作物生産の場においてしばしば問題となる。このような土壌病害は、高収益性を追求するあまり連作を余儀なくされている野菜作において多発する。事実、野菜の連作障害の原因のうち、土壌病害は60%を占めるという⁶³⁾。中でも、同一圃場において年間の作付回数が多いハウレンソウでは、発生する土壌病害の種類は多岐に及ぶ。また、ハウレンソウは軟弱であることから、可食部である地上部に萎ちょう、黄化などの病徴が発現し易い。そのため、被害が一層深刻なものとなっている。

本研究で実施した北海道の主要ハウレンソウ産地における実態調査の結果、主な土壌病害として次の3種類の発生が確認された。①*Pythium* spp.による立枯病、②*A. cochlioides*による根腐病、③*F. oxysporum* f. sp. *spinaciae*による萎ちょう病。

本研究ではこれらのうち、主に根腐病の「圃場における発生機構」と「生態的防除法」について土壌肥料学と植物病理学との学際的観点から検討を行った。

1. 北海道の主要ハウレンソウ産地における根腐病の発生状況

実態調査の結果、北海道におけるハウレンソウの主要産地である札幌市、渡島管内七飯町、上川管内鷹栖町で根腐病の発生が認められた。子葉期の罹病株の病徴は*Pythium*属菌による立枯病に酷似しており、病徴のみでは両土壌病害の識別は困難であった。生育中期以降の罹病株では古い葉から萎ちょう黄化し、一見、萎ちょう病に酷似した病徴を示すが、根部は萎ちょう病とは異なり、全

体的に褐変して細くなり、しばしば地際から主根が切れるというこの病害に特有の病徴を呈した。主根が切れることから、農家は根腐病を「鎌いらず」と称しており、以前から原因不明の障害として、特に札幌市では問題となっていた。

ハウレンソウ根腐病の症状の激しい罹病株では主根が切れる症状を示すことが、すでに寺中⁸³⁾によって指摘されており、このことは本研究における調査結果を支持する。同様に主根が切れる症状は、生越⁶⁶⁾により*A. raphani*によるハクサイの根くびれ病（俗称ポックリ病）でも報告されている。これらのことから、*A. cochlioides*や*A. raphani*によって引き起こされる病害では、主根がくびれたりあるいは地際から切れることは共通の症状と考えられる。両菌の2次遊走子はともに根に比べて宿主の胚軸部に多く誘引されることから、まずこの部位が最初に侵され、生長が抑制される結果、胚軸部が水浸状に褐変して、くびれ、重症の場合には切れるものと推察される。

以前から北海道においてもハウレンソウに根腐病が発生することは予想されていたが⁵⁵⁾、未確認の状態であった。したがって、本調査により、北海道におけるハウレンソウの根腐病の発生が初めて確認されたことになる。

2. 圃場における根腐病の発生機構

第III章では根腐病の発生に関与する土壌環境要因を明らかにした。これらの知見を基に、水を媒体として本病の発生に関与する諸要因を有機的に関連づけると、ハウレンソウ根腐病の圃場における発生機構を次のようにとりまとめることができる。(Fig. 15)

①土壌の高水分条件は、生理的に遊走子の生成を促進し、さらに物理的に遊走子の運動性に対して好条件をもたらす。②上記土壌条件はまた、溶脱や希釈に伴う土壌中の無機成分濃度の低下、と

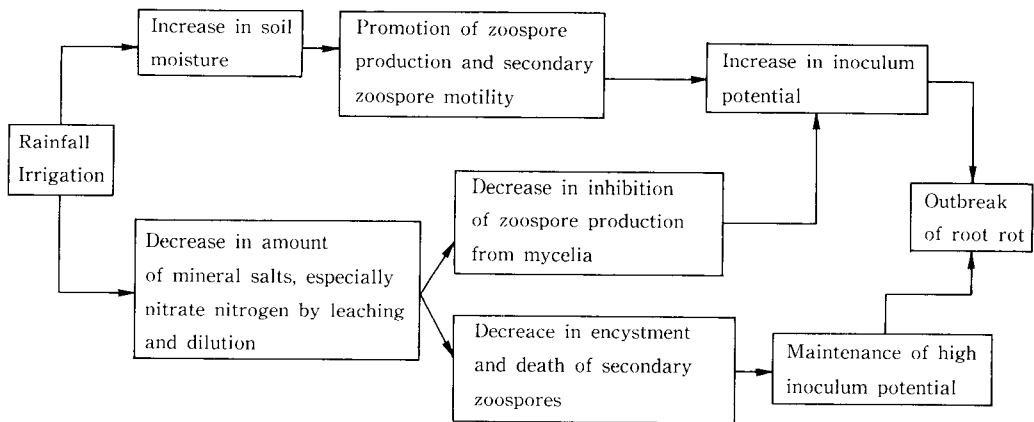


Fig. 15. Mechanisms of outbreaks of spinach root rot caused by *A. cochlioides* in relation to soil moisture. Severe outbreaks occur in fields with sandy soil where minerals, especially nitrate nitrogen are readily leached, and with heavy clay soil or packed subsoil where minerals, especially nitrate nitrogen are readily diluted by stagnant water. In addition, it is possible that the mechanisms of outbreaks of spinach root rot apply to the diseases caused by some zoosporic fungi: *A. euteiches* and *Pythium aphanidermatum*.

りわけ $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の低下を招くため、遊走子の生成阻害や被のう化および死滅に伴う運動性の消失による感染ポテンシャルの低下が起こらなくなり、感染ポテンシャルが高く維持される。これらの結果、根腐病が発生する。③とりわけ、根腐病の発生に対する抑制効果の高い $\text{NO}_3\text{-N}$ をはじめとした無機成分が溶脱により減少し易い砂質土壌や、滞水により希釈され易い重粘質土壌および透水性の悪い下層土を有する圃場では根腐病が多発生する。

北海道のハウレンソウ栽培圃場では窒素、りん酸および塩基は蓄積傾向にある^{76,78)}ため、根腐病は発生しにくいと考えられる。しかし、特に根腐病の発生に対して抑制効果の高い $\text{NO}_3\text{-N}$ は他の無機成分に比べて降雨や灌水によって溶脱し易い^{54,74,75)}。また、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は土壤溶液中の溶存量が多いため、希釈される。したがって、現地圃場では溶脱や希釈に伴う $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の低下により根腐病が発生する事例が多いものと推察される。

この圃場における *A. cochlioides* によるハウレンソウ根腐病の発生機構は、次に示す *Aphanomyces* 病の発生と個々の土壤要因との関

係に関する既往の知見と整合性があり、さらにそれらの知見を有機的に関連づけていることが判る。すなわち、*A. euteiches* によるエンドウの根腐病や *A. cochlioides* によるテンサイの病害は、①高水分土壌条件下で多発生し易い^{7,31)}。②無機要素を土壤に施用することにより発生が抑制される^{1,16,19,33,50,71,90,91)}、中でも窒素の抑制効果は高い^{1,19,90)}。③砂質あるいは重粘質土壌で多発生し易い³²⁾ ことなどが明らかにされている。

また、この発生機構は *A. euteiches* や *Pythium aphanidermatum* などの zoosporic fungi によって引き起こされる土壤病害においても同様であると考ええる。さらに、他の *Aphanomyces* 属菌や遊走子感染をする一部の *Pythium* 属菌を病原とする土壤病害に対しても適用可能と思われる。なお、次の報告例から判るように、遊走子感染をする一部の *Pythium* 属菌に対して上記の発生機構が適用できる可能性は極めて高い。内記⁶⁰⁾は岐阜県下で発生したハウレンソウの立枯病の病原は *P. aphanidermatum* 並びに *P. paroeocandrum* であるとし、さらにこれらによる立枯病の発生は、土壤の $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量と高い正の相関関係にある土壤 E

C（電気伝導率）値の上昇に伴い低下することを指摘した。

また、草刈ら⁴⁸⁾は水耕栽培時の高濃度無機塩培養液条件下で、*P. butleri*によるハウレンソウ立枯病の発生が抑えられることを観察し、その原因は、高濃度培養液による*P. butleri*の遊走子の被のう化に伴う感染ポテンシャルの低下にあることを証明した。

これらの結果は、遊走子感染で発病する糸状菌による土壤病害は一般に土壤の無機成分濃度が低い時に多発生することを示唆している。一方、土壤の無機成分濃度が上昇するに伴い多発生する土壤病害もある。すなわち、*Fusarium*病の一部にこのような現象が認められることが指摘されている^{5,17,28,40,92)}。駒田⁵³⁾によれば、一般に*Fusarium*病においては厚膜孢子からの発芽管によって感染が始まる。

これらのことから、土壤の無機成分濃度の土壤病害発生に及ぼす影響は、遊走子による感染に起因する病害の場合と発芽管による感染に起因する病害とはそれぞれ異なることが推察される。

3. 根腐病の生態的防除法の確立

1) 根腐病の発生軽減を目的とした窒素施肥法

第Ⅲ章において、根腐病は土壤中の無機成分とわりわけ $\text{NO}_3\text{-N}$ が欠乏した場合に多発生することが明らかとなったので、露地の夏どり栽培における根腐病の発生軽減を目的とした窒素施肥法を圃場実験により検討した。北海道では夏どり栽培以前に1ないし2作ハウレンソウが栽培されるため、土壤中に $\text{NO}_3\text{-N}$ を主体とした窒素成分が相当量残存している。このことから、土壤の残存 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量に対応した窒素施肥量を防除効果およびハウレンソウの生育面を勘案して策定するのが合理的であると考えられる。圃場実験の結果を取りまとめると次の通りである。①残存 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量が 5 mg/100 g 以下では防除効果の面からみて、標準の窒素施肥量 (15 kgN/10 a) よりも多めの $20\sim 25\text{ kgN/10 a}$ 施用する。②残存 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量が 15 mg/100 g 前後では標準の 15 kgN/10 a

Table 71. Recommended rate of nitrogen application for reducing outbreaks of *Aphanomyces* root rot of spinach

Content of $\text{NO}_3\text{-N}$ remaining in soil before fertilizer application (mg/100g)	At the time of summer cropping
	Rate of nitrogen application (kgN/10a)
Less than 5	20-25
5-10	15-20
10-20	10-15
20-30	0-10
More than 30	0

Notes 1) Fertilizers containing nitrate nitrogen are suitable for application.
2) Soil electric conductivity is available instead of the content of nitrate nitrogen, because there is a good correlation between them.

施用する。③残存 $\text{NO}_3\text{-N}$ が 40 mg/100 g では窒素過剰による生育抑制が起こるので無施用とする。

これらの結果から、ハウレンソウの栽培開始時の土壤中には $30\sim 40\text{ mg/100 g}$ の無機態窒素が含まれていることが必要となるが、第Ⅳ章第1節のTable 35に示したように 40 kgN/10 a 施用では濃度障害による生育抑制が認められるので、 30 mg/100 g 程度が適量であると考えられる。そこで土壤の残存 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量と窒素施肥量の合計量が概ね 30 mg/100 g となるように、残存 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量に対応した窒素施肥量を策定し、Table 71に示した。施用窒素形態としてはハウレンソウの生育および発生抑制効果の面を勘案すると、 $\text{NO}_3\text{-N}$ を含む窒素肥料が望ましいと結論される。なお、第Ⅲ章の第3節で明らかにしたように、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が溶脱し易い砂質土壤や、滞水により $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の希釈される重粘質土壤および透水性の悪い下層土を有する圃場では、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 施用による根腐病の防除効果が劣ることも想定される。したがって、このような圃場では、土壤の物理性の改善を主体とした抜本的な対策を講ずる必要があると考える。

2) 短期太陽熱利用による防除対策

第Ⅳ章の第2, 3節において、ハウス、露地の

太陽熱処理方法を検討した。それらの結果を基に、根腐病をはじめとしたハウレンソウの土壤病害に対する短期の太陽熱利用による土壤消毒法を考案した(Table 72)。土壤改良資材の施用-畝立て-灌水処理-フィルムによる被覆が太陽熱処理の基本である。被覆および畝立て方法の違いによって昇温・保温効果が異なるため、効果の期待できる必須気象条件とそれに基づいた処理適期を被覆および畝立て方法別に設定した。すなわち、それぞれの処理方法に対応した必須気象条件を次のように設定した。①ハウスにおける小畝マルチおよび小畝マルチ+トンネル被覆の場合：処理期間内に最高外気温が25°Cを超え、かつ晴の日が約7日必要である。②露地における小畝マルチ被覆の場合：25°Cを超え、かつ晴れの日が約10日。③露地における小畝マルチ+トンネル被覆の場合：20°Cを超え、かつ晴の日が約8日。④露地における平畝マルチ被覆の場合：27°Cを超え、かつ晴の日が約10

日。

しかし、北海道は寒冷地であること、本研究で開発した太陽熱処理の期間は2週間と従来の方法に比べて短いことなどを考えると、実際の処理に当たっては、昇温・保温効果の高いマルチ+トンネルによる二重被覆処理が望ましい。マルチ被覆でも効果は期待できるが、昇温・保温効果が劣る露地のマルチ被覆における防除対象は、熱処理で容易に死滅し易い *Pythium* spp. と *A. cochlidioides* のそれぞれによって引き起こされる立枯病と根腐病にすべきである。また、高水分条件下で病原糸状菌は死滅し易いので灌水設備を有するハウスでは灌水処理を実施する。一方灌水設備の無い露地では、土壌の含水比が30~50%の時(降雨後など)に太陽熱処理を行う。なお、露地のマルチ被覆では地温の上昇の面からみて、含水比が約30%の時に処理を行うのが望ましい。

北海道のような寒冷地では十分な防除効果を得

Table 72. Short-term soil solarization for the control of soil-borne diseases, especially *Aphanomyces* root rot of spinach grown in summer and early autumn

Field	Soil solarization				Indispensable climatic condition	At the first cropping after solarization
	Irrigation	Ridging	Covering	Optimum time		
Vinyl greenhouse	Treated	Small	Mulching or Mulching+Tunnel	July (middle) – Aug. (middle)	About 7 fine days with maximal air temp. of more than 25°C	① Shallow plowing ② Cutting down the rate of nitrogen application
Open field	Untreated	Small	Mulching	July (m) – Aug. (m)	About 10 fine days with maximal air temp. of more than 25°C	
Open field	Untreated	Small	Mulching+Tunnel	June (m) – Aug. (m)	About 8 fine days with maximal air temp. of more than 20°C	
Open field	Untreated	Level	Mulching	July (end) – Aug. (early)	About 10 fine days with maximal air temp. of more than 27°C	① Plowless farming ② Cutting down the rate of nitrogen application (before solarization)

- Notes
- 1) The recommended covering term is ca. 2 weeks.
 - 2) The recommended rate of soil conditioner application is 1 ton of half-matured or matured manure, 50 kg of calcium cyanamide per 10 a. These should be mixed well with soil.
 - 3) Irrigation is to be treated in a vinyl greenhouse with the equipment for it, because soil solarization is more effective in wet soil. Sprinkler irrigation before mulching is spent about 2 hours. It is made sure that water is penetrated through plow layer. At the solarization in an open field without irrigation equipment, the recommended soil moisture weight percentage is 30–50. The suitable soil moisture weight percentage is 30 at the solarization by mulching alone in an open field, because it has a less ability to raise soil temperature.
 - 4) Mulching alone in an open field is effective only for *Pythium* damping-off and *Aphanomyces* root rot which are more sensitive to solarization.

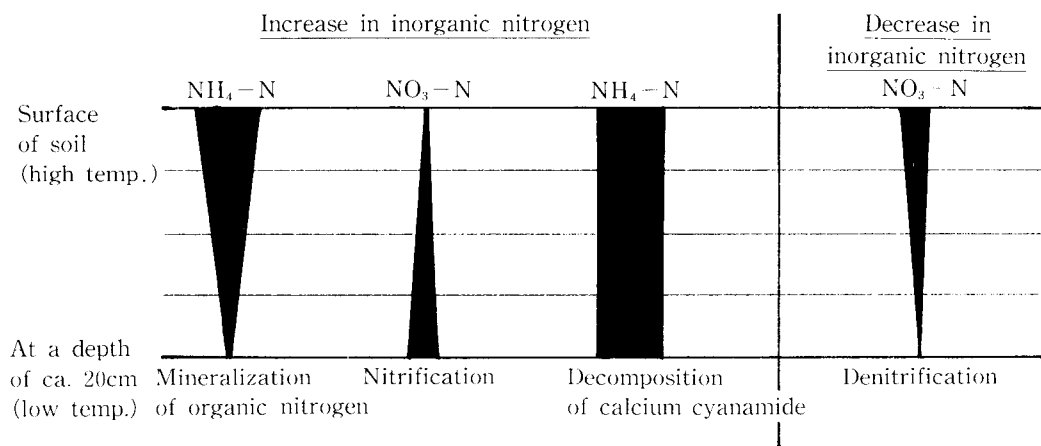


Fig. 16. Increase and decrease in inorganic nitrogen at various soil layers by short term (ca. 2 weeks) soil solarization (model). The area painted with black represents content of inorganic nitrogen.

るためには気象条件に恵まれた適期に処理を行わなければならない。気象条件は地域によって異なる。したがって、処理適期も地域によって異なると思われるので、効果の期待できる必須気象条件を基に各地域別の適期を設定することが望まれる。Plate VI 6 は北海道農務部が開発した「気象情報活用システム」²⁵⁾を利用して、上川管内の鷹栖地区のハウスにおける太陽熱処理の適期を約 1 km 平方のメッシュ毎に 1/25000 の地図上にマッピングしたものである。このような気象情報を利用することにより、地域別の詳細な処理適期や適地の把握が可能になると考える。

第 IV 章の第 4 節では太陽熱処理に伴う土壌無機態窒素の変化を検討し、その結果を模式的に Fig. 16 に取りまとめた。高温・高水分条件下にある太陽熱処理では、脱窒によると思われる $\text{NO}_3\text{-N}$ の減少量に比べて、有機態窒素の無機化による $\text{NH}_4\text{-N}$ の発現や Ca-シアナミド（石灰窒素）の $\text{NH}_4\text{-N}$ への分解に基づく無機態窒素の増加量が多いので、処理後の土壌の無機態窒素含量は増加する。したがって、処理後 1 作目では窒素の減肥が可能であり、窒素の減肥は濃度障害の回避のうえでも望ましいと結論される。

土壌改良資材の施用は、次に示す効果が期待されるので施用すべきであると考えられる。有機物

の施用により、保水性などの土壌の物理性が改善され、また太陽熱処理に伴う有機態窒素の減耗が補完される。石灰窒素の施用に伴い土壌 pH が上昇するため、特に酸性土壌では pH が矯正される。ハウレンソウは耐酸性が極めて弱いこと^{80,81)}を考えると、石灰窒素の施用はハウレンソウの生育に対して好条件をもたらすものと思われる。なお、太陽熱処理では $\text{NH}_4\text{-N}$ の集積や石灰窒素施用に伴う土壌 pH の上昇が起こるため、土壌中の可給態の微量元素含量が減少することも想定される。したがって、特にハウレンソウにおいて発生し易いマンガン欠乏症^{35,79)}に対する留意をマンガン欠乏地帯ではすべきであろう。

3) 根部搬出による土壌病害の発生軽減対策

収穫後、根部を圃場系外に搬出することにより土壌病害の多発生を回避する技術は古くから知られている。例えば、キャベツの根こぶ病や *A. raphani* によるハクサイの根くびれ病では、この技術は有効な対策の一つと見なされている⁴⁾。

第 IV 章の第 5 節ではハウレンソウの土壌病害の発生軽減に対する根部搬出の効果を実証した。その結果、土壌病害の多発生する作型に対する効果を目的とした前作収穫時のみの根部搬出でも効果が認められたが、毎作継続的に根部を搬出するのが望ましいと考えられる。なお、搬出作業に際し、

狭い作付面積ではスコップによる手作業が可能であるが、広い面積に対しては機械化対応が必要である。したがって、今後、ホウレンソウの根部搬出のために利用し得るルートピッカーの開発が待たれる。

4) 耕種的総合防除法の組立て

一般に土壤病害は難防除であることから、ホウレンソウの土壤病害の対策に当たっては総合防除法で臨むべきであると考えられる。さらに、農産物や生産者の健康に対する安全性が重視されてい

Table 73. Agrotechnical integrated control of soil-borne diseases of spinach grown in summer-early autumn, especially *Aphanomyces* root rot

Time of treatment	Control
At harvest time of early summer cropping. (preceding cropping)	Pulling out of root.
Between preceding cropping and next cropping. (ca. 2 weeks)	Short-term soil solarization.
Summer-early autumn cropping. (next cropping)	① Avoid nitrogen deficiency at a field where <i>Aphanomyces</i> root rot outbreaks severe. ② Disease tolerant cultivars.

Notes 1) Vinyl film cutting ultraviolet rays, effective for reducing *Fusarium* wilt alone, is available at a vinyl greenhouse.
2) Maintain optimum nitrogen level and optimum soil pH in the field where *Fusarium* wilt outbreaks severe.

Table 74. Characteristics of agrotechnical controls for soil-borne diseases of spinach

Control	Strong point	Weak point
Control of root rot by Nitrogen application	Simple and safe	Less effective at the field with sandy or heavy clay soil
Short-term soil solarization	Safe and effective for several diseases	Depending on climatic condition The time for the treatment is limited.
Pulling out of root	Safe and effective for several diseases	Laborious
Crop rotation	Safe	Nothing profitable instead of spinach
Vinyl film for cutting ultraviolet rays	Simple and safe	Effective for <i>Fusarium</i> wilt alone
Disease tolerant cultivar	Simple and safe	Cultivars resistant to <i>Pythium</i> damping-off and <i>Aphanomyces</i> root rot have not been developed yet.

る最近の社会情勢を考えると、その防除法には安全であることが求められる。そこで、第Ⅳ章で得られた①根腐病の発生軽減を目的とした窒素施肥法②短期太陽熱利用による防除対策③根部搬出による土壌病害の発生軽減対策などの防除技術を軸に、根腐病をはじめとしたハウレンソウの土壌病害に対する薬剤を使用しない耕種的な総合防除法を組み立てた (Table 73)。

土壌病害の多発生する夏～初秋どり栽培における防除がその目的である。なお、ハウスでは被覆フィルムとして萎ちょう病防除を目的とした紫外線カットフィルム⁴⁹⁾の使用が可能である。また、萎ちょう病はハウレンソウの生育が土壌環境の悪

変により抑制される場合に発生し易いことが考えられるので、特に土壌の無機態窒素の過不足や土壌の酸性化に留意する必要がある⁶⁾。

このような対策の外に、輪作や耐病性品種導入による発生回避も考えられる。いずれにしても、個々の対策を適切に組み合わせた総合的な防除を講ずるべきであろう。なお、Table 74 に示したようにそれぞれの耕種的な対策には一長一短があるので、実施に当り対象圃場に発生する土壌病害の種類、発生程度および土壌の理化学特性などに即した有効で、かつ実施可能な対策を選択することが肝要と考える。

第Ⅵ章 要 約

ハウレンソウの土壤病害について、根腐病を中心にその圃場における発生機構と生態的防除法を、土壤肥料学と植物病理学との学際的観点から検討し、以下の結果を得た。

1. 北海道の主要産地におけるハウレンソウ土壤病害の発生実態

- 1) 土壤病害の発生は8月、9月の高温期に多く、露地の夏どり栽培では連作4年目以降に土壤病害が多発生した。
根腐病の発生は調査した4ヶ所中3調査地で認められた。
立枯病と萎ちょう病の発生は調査した4ヶ所のハウレンソウ産地のいずれにおいても認められた。
- 2) 根腐病の病原糸状菌は、*Aphanomyces cochlioides* Drechsler と同定された。子葉期の根腐病罹病株では、胚軸部が水浸状に褐変し、地上部は立枯れ症状を呈した。一方、生育中期以降罹病株では古い葉から萎ちょう黄化し、根部が全体的に根腐れ症状を呈して細くなり、主根がしばしば地際から切れるのが特徴であった。
- 3) 立枯病の病原糸状菌として未同定の *Pythium* sp., *P. ultimum* Trow, *P. aphanidermatum* (Edson) Fitzpatrick, *P. spinosum* Sawada, *Rhizoctonia solani* Kühn AG-4, 同AG-5の6種菌株が確認された。中でも、未同定の *Pythium* sp. と *P. ultimum* の分離圃場数はいずれの調査地においても多く、立枯病の主原因と結論された。また、萎ちょう病の病原糸状菌は、*Fusarium oxysporum* f. sp. *spinaciae* と同定された。
- 4) *A. cochlioides* と *F. oxysporum* f. sp. *spinaciae* は、ハウレンソウの生育中期株に対しても強い病原性を有するため、それぞれを

病原とする根腐病と萎ちょう病の防除対策の確立が急務であると結論した。

2. 圃場における根腐病の発生機構

- 1) 実態調査の結果、根腐病は土壤 pH が中性域 (6.5~7.5) でかつ土壤の $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量が 5 mgN/100 g 以下の窒素欠乏域の圃場で多発生することが確認された。
- 2) 根腐病発生に対する土壤の $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量の影響は、土壤 pH のそれに比べて大きかった。すなわち、高い感染ポテンシャル下では土壤 pH の影響は小さかったが、土壤溶液中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が約 200 ppm 以上になると根腐病の発生は著しく低下した。また、根腐病発生に対する各種無機塩の影響を検討した結果、いずれの無機塩も高濃度域で根腐病の発生を抑制した。中でも硝酸カルシウムの発生抑制効果は高く、硝酸イオンがその効果の主体であった。
- 3) 高濃度 $\text{NO}_3\text{-N}$ の根腐病発生抑制効果の原因を *in vitro* で検討した結果、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は宿主ハウレンソウの感受性に対してよりむしろ病原である *A. cochlioides* の感染ポテンシャルに対して影響を及ぼすことが次の実験結果から示された。
 - ① $\text{NO}_3\text{-N}$ の施肥量を変えて栽培したハウレンソウに対する蒸留水中における2次遊走子の宿主胚軸部への集積・感染には差異が認められなかった。
 - ② $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 200 ppm 以下の硝酸塩水溶液中ではハウレンソウの胚軸部に対する2次遊走子の集積・感染が観察されたが、300 ppm 以上では集積・感染が認められなかった。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 高濃度域におけるこの現象は、2次遊走子の被のう化および死滅に伴う運動性の低下に基づくものであった。

- ③ 高濃度 $\text{NO}_3\text{-N}$ による2次遊走子の運動性の低下は、浸透圧の影響よりはむしろ硝酸塩のもつ毒性よると考えられた。
- ④ $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の上昇に伴って、*A. cochlioides*の菌糸起源の遊走子生成は著しく阻害された。
- ⑤ $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 300 ppm 以上におけるこのような2次遊走子の運動性の低下は、*A. euteiches*, *P. aphanidermatum*などのzoosporic fungiでも観察された。
- 4) 根腐病は降雨の浸入し易いハウスの端に近い畦や、露地では降雨後などの高水分条件下で多発生した。また、根腐病が多発生する札幌市の有明地区のハウスでは灌水に伴い、土壌の無機養分が溶脱し、中でも $\text{NO}_3\text{-N}$ の溶脱が顕著であった。
- 5) 根腐病は $\text{NO}_3\text{-N}$ が溶脱し易い砂質土壌、滞水により $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が希釈される重粘質土壌および透水性の悪い下層土を持つ圃場で多発生することがモデル実験により明らかになった。
- 6) 根腐病の発生に関与する諸要因を水を媒体として有機的に関連づけると、圃場におけるハウレンソウ根腐病の発生機構は次の通りである。①土壌の高水分条件は生理的に遊走子の生成を促進し、さらに物理的に遊走子の伝播に対して好条件をもたらす。②上記土壌条件はまた、溶脱や希釈に伴う土壌中の無機成分濃度の低下、とりわけ $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の低下を招くため、高 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度条件下で認められる遊走子の生成阻害や被のう化および死滅に起因する運動性の消失と、それによる感染ポテンシャルの低下が起こらなくなり、感染ポテンシャルが高く維持される。これらの結果、根腐病が発生する。③とりわけ、根腐病の発生に対して抑制効果の高い $\text{NO}_3\text{-N}$ をはじめとした無機成分が溶脱により減少し易い砂質土壌や、滞水により希釈され易い重粘質土壌および透水性の悪い下層土を有する圃場では根腐病が多発生する。この発生機構は*A. euteiches*や*Pythium aphanidermatum*など

のzoosporic fungiによって引き起こされる土壌病害においても同様である。

3. 根腐病の生態的防除法の確立

- 1) 夏どり露地栽培における根腐病の発生軽減を目的とした窒素の施肥量は、①土壌の残存 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量が5 mg/100 g 以下の場合には20~25 kgN/10 a, ②15 mg/100 g 前後の場合には15 kgN/10 a, ③40 mg/100 g 以上の場合には窒素無施用が適量であった。これらの結果を基に根腐病の発生軽減のための窒素施肥基準を提案した。
- 2) 根腐病を主体とした土壌病害の発生軽減を目的として、寒冷地向けの太陽熱利用による土壌消毒法を検討した結果、次の結論が得られた。
 - ① ビニールマルチ+ビニールトンネルによる二重被覆処理はビニールマルチ被覆に比べて、昇温効果が大きく、根腐病に対する防除効果も優る。
 - ② ハウスにおいて各種処理方法の効果を検討した結果、土壌改良資材の施用-小畦造成-灌水処理-新しい被覆資材によるマルチ+トンネル被覆が根腐病の防除およびハウレンソウの生育促進の面で望ましいと判断された。この方法は、根腐病をはじめとするハウレンソウの土壌病害の防除を目的とした寒冷地における太陽熱による土壌消毒法の基本にすべきであると提案した。
 - ③ 灌水設備を持たない露地における太陽熱処理では、土壌含水比30~50%が処理時の土壌水分の目安と考えられた。昇温・保温能の低いマルチ被覆では、土壌水分が多いと地温が上昇しにくいので、含水比が約30%の時に処理を行うのが昇温および湿熱殺菌効果の面から望ましいと判断された。
 - ④ 地温が上昇しにくい地中深10~20 cmの下層土における殺菌効果は劣る。したがって、下層土からの病原糸状菌の再汚染や死滅していない雑草種子の上層への移行を防

ぐために、太陽熱処理後の耕起深を浅くするのが望ましいと結論した。

- ⑤ ホウレンソウの主要病原糸状菌の死滅に有効な地中深 10 cm の地温とその積算時間は 40°C 以上、50 時間前後と推定された。このような有効地温とその積算時間を得るのに必要な最高外気温とその日数を各処理方法別に策定した。
- ⑥ 高温・高水分条件下にある太陽熱処理では、脱窒によると考えられる $\text{NO}_3\text{-N}$ の減少量に比べて、地温上昇効果による土壌の有機態窒素からの $\text{NH}_4\text{-N}$ の生成や Ca-シアナミド（石灰窒素）の $\text{NH}_4\text{-N}$ への分解に基づく無機態窒素の増加量が多いので、処理後の土壌の無機態窒素含量は増加した。したがって、処理後 1 作目では窒素の減肥が可能であり、窒素の減肥は濃度障害回避のうえでも望ましいと結論した。
- ⑦ 以上の結果を取りまとめ、根腐病をはじめ

としたホウレンソウの土壌病害に対する短期太陽熱処理方法をハウス栽培と露地栽培別に提案した。

- ⑧ 北海道農務部が開発した「気象情報活用システム」を利用して、約 1 km 平方のメッシュ毎の太陽熱処理適期を、1/25000 の地図上にマッピングできることを提案した。
- 3) ホウレンソウの残根は罹病根、正常根を問わず、土壌病害の発生に起因する発芽および生育抑制等の生育阻害を引き起こす。したがって、ホウレンソウを収穫する時にはその都度残根を搬出することが望ましいが、初夏どり収穫時の根部搬出のみでも、次作の初秋どりホウレンソウに土壌病害の発生軽減や生育促進などの効果があることを明らかにした。
- 4) 以上の防除技術を組み合わせて、ホウレンソウの根腐病をはじめとしたホウレンソウの土壌病害に対する耕種的な総合防除法を提案した。

引用文献

- 1) Afanasiev, M. M. and Carlson, W. E. (1942) : The relation of phosphorus and nitrogen ratio to the amount of seedlings diseases of sugar beets, Amer. Soc. Sugar Beet technol. Proc. (3d Gen. Mtg.), 407-411.
- 2) 赤井 純・馬場徹代・三井 康・生越 明・杉本利哉 (1963) : 北海道におけるテンサイの立枯性病害の分布, 北日本病虫研報, **14**, 1.
- 3) 安堂和夫・清水清成・芳岡昭夫 (1978) : 簡易太陽熱利用による土壤消毒について, 関西病虫研報, **20**, 93.
- 4) 赤司和隆・相馬 暁・岩淵晴郎 (1981) : 春播きタマネギの窒素施肥に関する研究——異なる気象(降雨)条件における生育相および窒素吸収の変動——, 北農, **48**(10), 9-20.
- 5) 赤司和隆・阿部秀夫 (1986) : ハウレンソウの土壤病害とその発生に関する土壌肥料学的考察2. 札幌市近郊畑における立枯病について, 北海道立農試集報, **54**, 1-8.
- 6) 赤司和隆・前田 要・関口久雄 (1986) : ハウレンソウの土壤病害とその発生に関する土壌肥料学的考察3. 萎ちょう病の病原菌と発生圃場の土壤養分実態, 北海道立農試集報, **55**, 53-62.
- 7) 築尾嘉章・内藤繁男・杉本利哉 (1986) : テンサイ黒根病の発生におよぼす土壤温度と水分の影響(講要), 日植病報, **52**, 142.
- 8) Drechsler, C. (1928) : The occurrence of *Aphanomyces cochlioides* n.sp. on sugar beets in the United States (Abstract), Phytopathology, **18**, 149.
- 9) Drechsler, C. (1929) : The beet water mold and several related root parasites, Jour. Agr. Res., **38**, 309-361.
- 10) 土壤病害対策委員会編 (1964) : 土壤病害の手引(II), 日本植物防疫協会.
- 11) 土壤養分測定法委員会編 (1973) : 土壤養分分析法, 養賢堂, 東京.
- 12) 土壤微生物研究会編 (1981) : 土壤微生物実験法, 養賢堂, 東京.
- 13) 土壤標準分析・測定法委員会編 (1986) : 土壤標準分析・測定法, 博友社, 東京.
- 14) 福西 務 (1978) : ハウレンソウ根腐症状株とその土壤から分離される病原菌(講要), 日植病報, **44**, 86.
- 15) Garner, W. W. and Allard, H. A. (1920) : Effect of the relative length of day and night and the factors of the environment upon growth and reproduction in plants, Jour. Agr. Res., **18**, 553-606.
- 16) Geach, W. L. (1936) : Root rot of grey peas in Tasmania, Austral. Council. Sci. and Indus. Res. Jour., **9**, 77-87.
- 17) Gasiorkiewicz, E. C. (1960) : Influence of nitrogen and potassium nutrition levels on the development of *Fusarium systemic wilt* of carnations, Phytopathology, **50**, 636.
- 18) Hungerford, C. W. (1923) : A *Fusarium* wilt of spinach, Phytopathology, **13**, 205-209.
- 19) Haenseler, C. M. (1931) : The use of fertilizers in reducing losses from pea-root rot caused by *Aphanomyces euteiches* (Abstract), Phytopathology, **21**, 116-117.
- 20) 花岡 保・伊藤和夫 (1955) : ほうれん草の周年栽培に於ける品種の適否, 北農, **22**, 365-372.
- 21) Herr, L. J. (1971) : In vitro zoospore production, motility, and germination of *Aphanomyces cochlioides*, Amer. Soc.

- Sugar Beet Technol. Jour., **16**, 508-515.
- 22) 北海道立中央農業試験場他 (1981): 土壌および作物栄養の診断基準, 分析法.
- 23) 北海道立中央農業試験場編 (1981): 地力保全基本調査 北海道土壌統一覧.
- 24) 北海道農務部編 (1983): 北海道施肥標準, p.44.
- 25) 北海道農務部編 (1988): 気象情報活用システム利用の手引き.
- 26) 岩田正利・谷内武信 (1953): 窒素形態の差異と蔬菜の生育, 園学誌, **22**, 183-192.
- 27) 家村浩海・中野昭信 (1978): レタスビッグベインの発生と土壌 pH の関係および土壌の消毒法について, 関西病虫研報, **20**, 96.
- 28) 岩淵晴郎・多賀辰義・相馬 暁 (1978): 施肥並びに土壌水分条件が春播きタマネギの生育・収量・貯蔵性に及ぼす影響Ⅵ. 生育初期における濃度障害と乾腐病発生の関係, 北海道立農試集報, **39**, 27-33.
- 29) 一谷多喜郎・福西 務 (1979): ホウレンソウの立枯病をおこす *Pythium ultimum* Trow, 関西病虫研報, **21**, 44.
- 30) 五十嵐文雄 (1983): ハウス土壌の熱処理による防除, 北海道畑作物の土壌病害, 宇井格生監修 北海道畑作物の土壌病害刊行会編, p.272-276.
- 31) Jones, F. R. and Linford, M. B. (1925): Pea disease survey in Wisconsin, Wis. Agr. Expt. Sta. Res. Bul., **64**, 1-31.
- 32) Jones, F. R. and Drechsler, C. (1925): Root rot of peas in the United States caused by *Aphanomyces euteiches* (n. sp.), Jour. Agr. Res., **30**, 293-325.
- 33) Kotila, J. E. and Coons, G. H. (1940): *Aphanomyces* root rot of sugar beets as influenced by phosphate application, Amer. Soc. Sugar Beet Technol. Proc. (2nd Gen. Mtg.) (pt. II), 223-225.
- 34) 化学大辞典編集委員会編 (1961): 化学大辞典 7, 共立出版, 東京, p.640.
- 35) 小林茂久平・角田三郎・只野正之・松村 蔚 (1964): 畑作物に対する特殊成分および微量元素の効果 第2報 そ菜に対する微量元素の効果, 群馬県農試報告, **5**, 115-139.
- 36) 甲斐秀昭・津田憲一郎・原田登五郎 (1972): 硝化作用に及ぼす温度の影響と土壌の地域性について, 土肥要旨集, **18**, 36.
- 37) 甲斐秀昭・原田登五郎 (1973): 東南アジア水田土壌の窒素代謝に関する研究, 塩研, No.80, p.1-12.
- 38) 国永史朗・久保庭 孝・寺中理明・若井田正義 (1975): ホウレンソウ根腐症状株からの *Aphanomyces cochlioides* の分離およびその病原性 (講要), 日植病報, **41**, 118.
- 39) Katan, J., Greenberger, A., Alon, H. and Grinstein, A. (1976): Solar heating by polyethylene mulching for the control of diseases caused by soil-borne pathogens, Phytopathology, **66**, 683-688.
- 40) 駒田 旦 (1976): 野菜のフザリウム病菌, *Fusarium oxysporum*, の土壌中における活性評価技術に関する研究, 東近農試研報, **29**, 132-269.
- 41) 岸 国平編 (1976): 野菜の病虫害——診断と防除——, 全国農村教育協会, 東京.
- 42) 小玉孝司・宮本重信・宮川逸平・志賀陽一 (1976): 夏季の温室密閉による土壌消毒法, 農及園, **51**, 889-894.
- 43) 小玉孝司・福井俊男 (1978): 太陽熱利用による土壌消毒の適用拡大について (講要), 日植病報, **44**, 371.
- 44) 小玉孝司 (1979): 太陽熱利用によるハウス土壌消毒, 農及園, **54**, 193-196.
- 45) 小玉孝司・福井俊男 (1982): ハウス密閉処理による太陽熱土壌消毒法についてⅤ. イチゴ萎黄病防除に対する適用, 日植病報, **48**, 570-577.
- 46) 小島博文・荒井 滋・岡山健夫 (1979): 奈良県における夏ホウレンソウの生産障害について, 関西病虫研報, **21**, 46.
- 47) 草刈真一・辻 博美・山田貴義・田中 寛 (1979): *Pythium* sp. によるホウレンソウ

- の立枯病, 日植病報, **45**, 268-271.
- 48) 草刈真一・田中 寛 (1986): 高濃度水耕培養液中における *Pythium butleri* 遊走子の被のうとハウレンソウ苗立枯病発生への影響について, 日植病報, **52**, 1-7.
- 49) 児玉不二雄・近藤則夫・佐々木高行・須田耕士 (1987): 紫外線カットフィルムによるハウレンソウ萎ちょう病の発病抑制効果 (講要), 日植病報, **53**, 80.
- 50) Lewis, J. A. (1973): Effect of mineral salts on *Aphanomyces euteiches* and *Aphanomyces* root rot of peas, *Phytopathology*, **63**, 989-993.
- 51) Middleton, J. T. (1943): The taxonomy, host range and geographic distribution of the genus *Pythium*, *Memoirs of Torrey Botanical Club*.
- 52) Moss, P. (1963): Some aspects of the cation status of soil moisture, part I. The ratio law and soil moisture content, *Plant and Soil*, **18**, 99-113.
- 53) 松尾卓見・駒田 旦・松田 明編 (1982): 作物のフザリウム病, 全国農村教育協会, 東京.
- 54) 野口純隆 (1969): カラーでみる南九州の火山灰畑における肥料要素の動態, 1, 鹿児島農試鹿屋支場特報, **1**, p.55.
- 55) 成田武四 (1977): 北海道における農作物病害, 帯広畜産大学, 帯広.
- 56) Naiki, T. and Kanoh, M. (1977): On *Fusarium* wilt of spinach and its causal fungus, *Ann. Phytopath. Soc. Japan*, **43**, 297-300.
- 57) 内記 隆・加納正和 (1978): ハウス栽培ハウレンソウの土壌病害の発生とその病原菌, 日植病報, **44**, 543-553.
- 58) Naiki, T. and Kanoh, M. (1978): Grouping of *Rhizoctonia solani* Kühn causing root disease of spinach in plastic house cropping, *Ann. Phytopath. Soc. Japan*, **44**, 554-560.
- 59) 内記 隆 (1979): ホーレンソウ萎ちょう病の発生生態及び防除に関する基礎研究, 岐阜県受託調査報告, p.19.
- 60) 内記 隆 (1983): ホウレンソウ根部病害とその病原菌の生態, 土と微生物, **25**, 9-16.
- 61) Naiki, T., Gonda, Y. and Kageyama, K. (1986): *Pythium* species causing damping-off of spinach seedlings under plastic-house cropping, *Ann. Phytopath. Soc. Japan*, **52**, 772-778.
- 62) 成田保三郎 (1983): *Aphanomyces cochlioides* による連作テンサイ苗立枯病と土壌の理化学性, 微生物性, 土肥誌, **54**, 335-339.
- 63) 農水省野菜試験場 (1984): 最近における野菜・花きの連作障害の実態, 野菜試研究資料, **18**, p.98.
- 64) 農水省北海道統計情報事務所 (1987): 北海道農林水産統計年報 (総合編, 昭和61-62年).
- 65) 奥田純一郎・古田 力 (1964): ホウレンソウ立枯病の病徴と病原菌について (講要), 日植病報, **29**, 89.
- 66) 生越 明・酒井隆太郎・横沢菱三 (1972): ハクサイの根くびれ病 (俗称ポックリ病) について, 植物防疫, **26**, 10-12.
- 67) 生越 明 (1976): *Rhizoctonia solani* Kühn の菌糸融合による類別と各群の完全時代に関する研究, 農技研報, **C30**, 1-63.
- 68) 生越 明 (1983): *Aphanomyces* (苗立枯病など) 総論, 北海道畑作物の土壌病害, 宇井格生監修 北海道畑作物の土壌病害刊行会編, p.53-62.
- 69) 小倉祐幸 (1985): 被覆栽培の環境調節, 農林統計協会, 東京, p.53.
- 70) Papavizas, G. C. and Ayers, W. A. (1974): *Aphanomyces* species and their root diseases in pea and sugarbeet, *Technical Bulletin of USDA*, No.1485.
- 71) Smith, P. G. and Walker, J. C. (1941): Certain environal and nutritional factors affecting *Aphanomyces* root rot of garden

- pea, Jour. Agr. Res., **63**, 1-20.
- 72) Schneider, C. L. (1965): Additional hosts of the beet water mold, *Aphanomyces cochlioides* Drechs., Amer. Soc. Sugar Beet Technol. Jour., **13**, 469-477.
- 73) 志賀陽一・宮川逸平 (1970): 温室の夏期の保温性にもとづく土壤消毒法について (講要), 日植病報, **36**, 194.
- 74) 下野勝昭・大垣昭一 (1974): 網走地方に分布する主要土壤の養水分供給力に関する研究 第1報 降水が土壤溶液中の養分の行動に及ぼす影響, 北海道立農試集報, **29**, 119-130.
- 75) 下野勝昭・大垣昭一 (1974): 網走地方に分布する主要土壤の養水分供給力に関する研究 第2報 土壤水の上下運動が養分の行動に及ぼす影響, 北海道立農試集報, **29**, 131-147.
- 76) 里見研二・中本和雄・伊丹清二・多賀辰義 (1985): ホウレンソウ畑の施肥改善 第1報 旭川地方におけるホウレンソウ畑土壤の実態と問題, 北海道園芸研究談話会報, **18**, 36-37.
- 77) 島崎 豊・内山総子 (1985): 埼玉県における夏まきホウレンソウ立枯症の発生実態 (講要), 日植病報, **51**, 93.
- 78) 相馬 暁・山口 宏・川村明史 (1985): 野菜の栄養生理的特性に対応した施肥と肥培管理法 第3報 函館市亀田地区におけるホウレンソウ畑の実態と, それに対応した施肥・肥培管理法, 北農, **52** (10), 20-33.
- 79) 関口久雄・笹島修身 (1986): マンガン欠乏に基因するホウレンソウの黄化葉症状とその対策, 北農, **53** (10), 29-44.
- 80) 田中 明・早川嘉彦 (1975): 耐酸性の作物種間差 第2報 耐Al性および耐Mn性の種間差——比較植物栄養に関する研究——, 土肥誌, **46**, 19-25.
- 81) 田中 明・早川嘉彦 (1975): 耐酸性の作物種間差 第3報 耐酸性の種間差——比較植物栄養に関する研究——, 土肥誌, **46**, 26-32.
- 82) 但野利秋・田中 明 (1976): アンモニア態および硝酸態窒素適応性の作物種間差 (第1報) 生育初期におけるアンモニア態および硝酸態窒素選択吸収能と生育反応——比較植物栄養に関する研究——, 土肥誌, **47**, 321-328.
- 83) 寺中理明 (1979): ホウレンソウ病気, 農業総覧 原色病害虫診断防除編 3. 農文協, 東京, p.19-22.
- 84) 戸崎正弘 (1985): 都道府県別野菜栽培と病害虫 (岐阜県), 今月の農薬 (野菜の最新栽培技術 下) **29**, 233-238.
- 85) 棚橋一雄 (1988): 岐阜県におけるホウレンソウ土壤病害の発生生態, 植物防疫, **42**, 487-491.
- 86) 田中民夫 (1988): トマトの半身萎ちょう病対策, 土と微生物, **31**, 73.
- 87) 宇井格生 (1962): サトウダイコンの黒根病とその病原菌の北海道における分布, 北海道大農邦文紀要, **4**, 60-65.
- 88) 宇井格生・中村重治 (1963): てん菜の黒根病, 特にその病原菌 *Aphanomyces cochlioides* Drechsler の病原性と寄生範囲について, てん菜研究会研報, **3**, 78-95.
- 89) 宇田太郎 (1986): 野菜のプロフィール, 全国生鮮食料品流通情報センター, 東京, p. 120.
- 90) Walker, J. C. and Musbach, F. L. (1939): Effect of moisture, fertility, and fertilizer placement on root rot of canning peas in Wisconsin, Jour. Agr. Res., **59**, 579-590.
- 91) Wade, G. C. (1955): *Aphanomyces* root rot of peas—the effect of a potassium fertilizer on the severity of the disease in a potassium deficient soil, Austral. Inst. Agr. Sci. Jour., **21**, 260-263.
- 92) Weinke, K. E. (1962): The influence of nitrogen on the root disease of bean caused by *Fusarium solani* f. *phaseoli* (Abstract), Phytopathology, **52**, 757.

- 93) 和歌山県農業試験場・滋賀県農業試験場・兵庫県農業総合センター (1985)：太陽熱利用による水田転換畑露地野菜の土壌病害防除技術確立，総合助成試験中核研究成果。
- 94) 山根一郎・細川玲子 (1956)：稲作湛水期間中に於ける水田土壌の肥沃化について，東北農試研報，**10**，125-128。
- 95) 山崎慎一 (1972)：毛管水領域（土壌溶液中）における養分の挙動，土壌の物理性，**24**，7-13。
- 96) 横沢菱三・生越 明・酒井隆太郎 (1972)：*Aphanomyces raphani* Kendrick の遊走子による宿主植物への侵入機構，日植病報，**38**，284-289。
- 97) 横沢菱三・生越 明・酒井隆太郎 (1974)：*Aphanomyces raphani* Kendrick の遊走子の宿主胚軸への走性と胚軸分泌物の役割，日植病報，**40**，46-51。
- 98) 横沢菱三・国永史朗・寺中理明 (1974)：*Aphanomyces euteiches* Drechsler によるエンドウ根腐病の発生，日植病報，**40**，454-457。
- 99) 横沢菱三・国永史朗 (1979)：カンランから単離される *Aphanomyces raphani* 遊走子の誘引物質：インドール3-アルデヒド，日植病報，**45**，339-343。
- 100) Yokosawa, R. and Kuninaga, S. (1983)：Effects of light on oospore germination of *Aphanomyces euteiches*, Ann. Phytopath. Soc. Japan, **49**, 56-62.
- 101) Yokosawa, R. and Kuninaga, S. and Sekizaki, H. (1986)：*Aphanomyces euteiches* zoospore attractant isolated from pea root；Prunetin, Ann. Phytopath. Soc. Japan, **52**, 809-816.
- 102) Yokosawa, R., Sekizaki, H. and Kuninaga, S. (1988)：Attractants of *Aphanomyces cochlioides* zoospores contained in sugar beet seedlings, Ann. Phytopath. Soc. Japan, **54**, 133-140.
- 103) 山口武夫 (1977)：てん菜の苗立枯病に関する研究——特に *Pythium* 属菌について——，北海道農試研報，**118**，9-61。
- 104) 吉野 喬・出井嘉光 (1977)：土壌窒素供給力の有効積算温度による推定法について，農事試研報，**25**，1-62。
- 105) 吉倉惇一郎・二見敬三・坂本 庵・神納 浄 (1986)：露地野菜栽培土壌の太陽熱消毒処理における土壌変化 土壌養分並びに微生物相・酵素活性について，土肥要旨集，**32**，42。

Studies on Outbreak Mechanisms of Spinach Root Rot Caused by *Aphanomyces cochlioides* Drechsler and Its Ecological Controls

by
Kazutaka AKASHI

Summary

Of soil-borne diseases of spinach, outbreak mechanisms in the field of spinach root rot caused by *Aphanomyces cochlioides* Drechsler and its ecological controls were researched from the aspects of soil science and phytopathology. Results obtained were as follows.

1. Surveys of incidence of soil-borne diseases of spinach at large spinach growing areas in Hokkaido prefecture

- 1) Severe outbreaks of soil-borne diseases of spinach were observed in August and September (Fig. 1), and especially found in open fields with continuous cropping of more than four years (Fig. 2). Incidence of spinach root rot was recognized in three areas : Sapporo, Takasu and Nanae, of the four areas surveyed. Incidence of damping-off caused by *Pythium* spp. and wilt caused by *Fusarium oxysporum* was observed in the four areas surveyed (Table 18).
- 2) The spinach root rot pathogen was identified as *Aphanomyces cochlioides* Drechsler (Table 16, 17). The hypocotyl of the diseased plant in the cotyledonary stage is water-soaked and browned. It was observed in the diseased plant in the later growing stage that the lower leaves are wilted and yellowed, and the tap root is often broken off at the soil surface because of rotting of the root (Plate I-4).
- 3) Pathogens of spinach damping-off were identified as six species : *Pythium* sp., *P. ultimum* Trow, *P. aphanidermatum* (Edson) Fitzpatrick, *P. spinosum* Sawada, *Rhizoctonia solani* Kühn AG-4, and *R. solani* Kühn AG-5 (Table 7, 8, 10). It was concluded that the principal pathogens of damping-off were *Pythium* sp. and *P. ultimum*, because the number of fields from which these *Pythium* spp. were isolated was greater than that for the other fungi (Table 18). The spinach wilt pathogen was identified as *Fusarium oxysporum* f. sp. *spinaciae* (Table 12, 13).
- 4) It was decided that establishing controls for root rot and wilt caused by *A. cochlioides* and *F. oxysporum* f. sp. *spinaciae*, respectively, are needed because these pathogens have strong pathogenicity not only for spinach at the cotyledonary stage but also for the plant at a later growing stage.

2. Outbreak mechanisms in the field of spinach root rot

- 1) It was recognized from surveys in 30 fields around Sapporo city that soil pH values were

neutral (6.5–7.5) and nitrate nitrogen was deficient (less than 5 mgN/100 g soil) in fields where *Aphanomyces* spinach root rot was severe (Fig. 3, 5).

- 2) The effects of nitrate nitrogen application and decreased pH on the root rot severity were examined. Disease severity was remarkably decreased at more than ca. 200 ppm of nitrate nitrogen in soil solution (Table 22). The effect of soil pH on the severity was not significant at high inoculum potential (Table 21). It was made clear from these results that nitrate nitrogen is more closely related to the outbreak than soil pH, and the severe disease outbreak occurs when nitrate nitrogen is deficient. The effect of inorganic salt application on the root rot severity was also examined. Each salt reduced spinach root rot, with nitrate as $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ the most effective of all for reducing disease severity. The nitrate ion appeared to be more important than the calcium ion (Table 24).
- 3) Experiments were undertaken to make clear the cause of reduction of spinach root rot by nitrate nitrogen application. It was confirmed *in vitro* that nitrate as $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ has an effect on the inoculum potential of the pathogen rather than on susceptibility of the host (Table 25). Accumulation of secondary zoospores of *A. cochlioides* and infection of hypocotyls of host plants were observed in nitrate solutions at nitrogen levels of 0–200 ppm, but not at levels of more than 300 ppm (Fig. 7). This phenomenon at high concentration of nitrate was the result of encystment and death of secondary zoospores (Fig. 8). A similar reduction of zoospore motility was observed in the case of *A. euteiches* and *P. aphanidermatum* (Table 26). Inhibition of zoospore production from mycelia of *A. cochlioides* was also observed at high concentration of nitrate (Fig. 6). Encystment and death at 0.75 bar and 1.00 bar, respectively, were observed in nitrate solutions, but not in controls of sugar solutions, suggesting that nitrate toxicity is more closely responsible for the motility of secondary zoospores than increased osmotic pressure (Fig. 9).
- 4) Severe outbreaks of spinach root rot were observed at the row nearest to the edge of a vinyl greenhouse where rain water is apt to invade (Table 27). In the case of the open field, rainfall that maintains high soil moisture increased root rot severity (Table 28). Nitrate nitrogen was most remarkably leached of minerals tested by irrigation in a vinyl greenhouse at Ariake area in Sapporo city where severe disease occurred (Table 29).
- 5) It was proved according to a model test that severe outbreaks occur in fields with sandy soil where nitrate nitrogen is readily leached, and with heavy clay soil or packed subsoil where nitrate nitrogen concentration is readily diluted by stagnant water (Table 31).
- 6) Outbreak mechanisms of the disease in relation to soil moisture are summarized as follows : Heavy moisture associated with rainfall or excess irrigation promotes the physiological production of zoospores of *A. cochlioides*, and is conducive to the transmission of secondary zoospores. Due to leaching and dilution by stagnant water, heavy moisture also causes a decrease in mineral salts, especially nitrate nitrogen that is responsible for the inhibition of zoospore production from mycelia, the encystment and death of secondary zoospores. Consequently, the inoculum potential remains high, and disease outbreaks occur. Severe outbreaks occur in fields with sandy soil where nitrate nitrogen is readily leached, and with heavy clay soil or packed subsoil where nitrate nitrogen concentration is readily diluted by stagnant

water (Fig. 15). In addition, the outbreak mechanisms of spinach root rot mentioned above apply to the diseases caused by some zoosporic fungi: *A. euteiches* and *P. aphanidermatum*.

3. Ecological controls for spinach root rot

- 1) Suitable rates of nitrogen application, for reducing the root rot of spinach grown in summer in an open field, were as follows:

① 20~25 kgN/10 a in the case of less than 5 mg/100 g of nitrate nitrogen remaining in the soil. ② 15 kgN/10 a in the case of ca. 15 mg/100 g of nitrate nitrogen remaining in the soil. ③ 0 kgN/10 a in the case of more than 40 mg/100 g of nitrate nitrogen remaining in the soil. The recommended rate of nitrogen application was established based on these results (Table 71).

- 2) Short-term (two weeks) soil solarization in cold regions was investigated at vinyl greenhouses and open fields around Sapporo city in Hokkaido pref. during the period 1986-1988, for the control of soil-borne diseases, especially spinach root rot showing severe outbreaks in summer and early autumn crops. The results obtained were as follows: ① Covering treatment by mulching plus tunnel with vinyl film, which has a high ability to raise soil temperature, is more effective for reducing root rot than mulching treatment alone. ② It was made clear from the experiments on several methods of solarization at vinyl greenhouses that the suitable treatments for the control of root rot and promoting growth of plants are amendment of manure and calcium cyanamide, making small ridges of 15-20 cm in height, irrigation, and covering by mulching plus tunnel with a new vinyl film. These treatments were regarded as the basis of short-term soil solarization in cold regions for the control of soil-borne diseases of spinach. ③ The recommended soil moisture weight percentage is 30-50 at soil solarization in open fields without irrigation equipment, and ca. 30 at the treatment by mulching alone in open fields from the aspect of the effect of raising soil temperature and wet-heat pasteurization, because mulching alone has a low ability to raise and to maintain soil temperature. ④ The effect of killing fungi is low in the subsoil, which has difficulty in having the soil temperature raised. Consequently, it was decided that shallower plowing than usual at the first cropping after the solarization is suitable for preventing re-contamination by pathogens and surviving weed seeds in the subsoil. ⑤ The soil temperature and its integrated time (at a soil depth of 10 cm) effective for the death of soil-borne pathogens of spinach were estimated to be more than 40°C and ca. 50 hours by both *in vitro* and field experiments. The maximal air temperature and number of days necessary for obtaining the effective soil temperature and its integrated time were established at each soil solarization. ⑥ The increase in content of ammonium nitrogen in the soil based on mineralization of soil organic nitrogen and decomposition of calcium cyanamide as soil conditioner, and the decrease in nitrate nitrogen seemed to be based on denitrification were observed in the soil under high temperature and high moisture during the solarization. The content of inorganic nitrogens in the soil increased after the solarization, because the content of increase in ammonium nitrogen was more than that of decrease in nitrate nitrogen. Consequently, cutting down the rate of nitrogen application can be done at the first cropping after the solarization, and is suitable for avoiding salt injury (Fig. 16). ⑦ Methods of short-term soil solarization at vinyl greenhouse and open field were

proposed based on these results (Table 72). ⑧ It was proved that the optimum time of the solarization in a vinyl greenhouse can be mapped out on a map of 1/25000 by mesh of 1 km square by using a computer system of climatic information on Hokkaido pref., which was developed by the Hokkaido government (Plate VI-6).

- 3) It was made clear that root residues of spinach, both the diseased root and the healthy, give rise to inhibition of germination and growth of the plant caused by the disease outbreak (Table 66, 67). Consequently, it is better that the root residues of plants are pulled out at each harvest time. However, it was proved that pulling out of the root residues at harvest time of spinach grown in early summer alone is effective for reducing disease outbreaks and promoting growth of the plant grown in early autumn (Table 69, 70).
- 4) Based on the controls mentioned above, integrated agrotechnical control of soil-borne diseases of spinach, especially root rot, was established (Table 73).

Explanation of plates

Plate I. Symptoms of soil-borne diseases of spinach at the fields in Sapporo city.

1. Symptoms of damping-off of spinach seedlings caused by *Pythium* spp.
The symptoms are extremely similar to those produced by *Aphanomyces cochlioides*.
2. Spinach seedlings showing symptoms of damping-off caused by *Pythium* spp.
Plants on left are diseased. Softend, water-soaked, and slightly discolored lesions are seen in the hypocotylous region. The symptoms are extremely similar to those produced by *Aphanomyces cochlioides*.
3. Symptoms of spinach root rot caused by *A. cochlioides*, emerged at later stage of plant growth in a field. Yellowing and wilting of the leaves are seen at the top of plants.
4. Symptoms of spinach root rot caused by *A. cochlioides*, emerged at later stage of plant.
Plants on left is diseased. Severe wilting of the foliage, rotting and discoloration of tap root are induced. The tap root is often broken off from the part at soil surface. This phenomenon is therefore called "Kamairazu" in cropping area which can be literally translated as "able to harvest without a sickle".
5. A vinyl greenhouse with a high incidence of spinach wilt caused by *F. oxysporum* f.sp. *spinaciae*.
6. Symptoms of Fusarium wilt of spinach. Discoloration of vascular system of tap root is seen in the plants on right. Soil clump containing mycelia of *F. oxysporum* f.sp. *spinaciae* is seen at the lesion of plants on left.

Plate II. Morphological observation of *Pythium* spp. isolated from spinach in Sapporo city.

1. Spherical zoosporangia of unidentified *Pythium* sp. (isolate : Py- 1).
2. Spherical zoosporangium (germinating) of *P. ultimum* (isolate : Py-11).
3. Oogonium which involves an oospore, and monoclinal antheridium of *P. ultimum* (isolate : Py-11).
4. Lobate zoosporangia of *P. aphanidermatum* (isolate : Py-12).
5. Sporangium with vesicle containing zoospores of *P. aphanidermatum* (isolate : Py-12).
6. Oogonium which involves an oospore, and antheridium of *P. aphanidermatum* (isolate : Py-12).
7. Oogonium which involves an oospore, and antheridium of *P. spinosum* (isolate : Py-17).

Plate III. Pathogenicity and morphological observation of *Rhizoctonia* spp. and *Fusarium* sp. isolated from spinach.

1. Symptoms of spinach seedlings infested with *Rhizoctonia* sp..
2. Comparison of colonies between pathogenic *Rhizoctonia* spp. isolated from spinach and

<i>R. solani</i> AG-5 (authentic)	R-6
R-1	R-7
<i>R. solani</i> AG-4 (authentic)	R-2

authentic *Rhizoctonia solani* on potato dextrose agar (Difco).

3. Imperfect fusion between *R. solani* AG-4 (authentic) and R-7 (*R. solani* AG-4).
4. Pathogenicity of *Fusarium* sp. (isolate : F-98, *F. oxysporum* f.sp. *spinaciae*) isolated from wilt spinach for the seedlings. Left : infested, right : control.
5. Microconidia produced on the conidiophores of *F. oxysporum* f.sp. *spinaciae* (isolate : F-98).
6. Macroconidium (3 septa) of *F. oxysporum* f.sp. *spinaciae* (isolate : F-98).
7. Chlamydospores of *F. oxysporum* f.sp. *spinaciae* (isolate : F-98).

Plate IV. Pathogenicity and morphological observation of *Aphanomyces* sp. isolated from spinach.

1. Filamentous zoosporangia and primary zoospore cysts of *A. cochlioides* from hypocotyl tissues of diseased spinach.
2. Oogonia and matured oospores observed on the root tissues of spinach showing root rot.
3. Pathogenicity of *Aphanomyces* spp. (*A. cochlioides*) isolated from diseased spinach for the 5-leaf stage of plant. Left to right ; first row : control, second : isolate A-K-6, third : A-K-1, fourth : A-Ka-2.
4. Oogonia which involves an oospore, and antheridia of *A. cochlioides* isolated from diseased spinach on corn meal agar (Difco).
5. Pathogenicity of *A. cochlioides* (isolate : A-K-1) for sugarbeet. Left : control, right : infested.
6. Pathogenicity of *A. cochlioides* (isolate : A-K-1) for goosefoot. Left : control, right : infested.

Plate V. Soil environment in relation to the incidence of *Aphanomyces* root rot of spinach.

1. Effect of soil pH on the severity of *Aphanomyces* root rot of spinach. Observed 10 days after inoculation (*A. cochlioides* zoospores 10^3 /g soil). Left to right ; first row : pH 5.5, second : 6.2, third : 6.5, fourth : 7.0, fifth : 7.5.
2. Effect of rate of nitrate nitrogen application on the severity of *Aphanomyces* root rot of spinach. Observed 10 days after inoculation (*A. cochlioides* zoospores 10^3 /g soil). Left to right (above) ; untreated, 20 mg/100 g soil, left to right (below) ; 40, 80 mg/100 g.
3. Effect of inorganic salts application on the severity of *Aphanomyces* root rot of spinach. Observed 10 days after inoculation (*A. cochlioides* zoospores 10^3 /g soil). The rate of cations and nitrate ion application was 14.4 mmol/kg soil. Left to right ; first row : untreated, second : magnesium ion (as magnesium sulfate), third : calcium ion (calcium chloride), fourth : kalium ion (potassium chloride), fifth : ammonium ion (ammonium sulfate),

- sixth : ammonium ion (ammonium chloride), seventh : nitrate ion (calcium nitrate).
4. Localized masses of secondary zoospores on the spinach hypocotyl adjacent to root. One hour after transfer in a suspension of secondary zoospores of *A. cochlidioides*.
 5. Incidence of *Aphanomyces* root rot at various row in a vinyl greenhouse. Severe outbreak of the root rot is seen at a row (right) nearest to the edge of a vinyl greenhouse in Sapporo city. The row may be under high soil moisture because of invading of rainfall.
 6. Effect of leaching and submergence treatments on the severity of *Aphanomyces* root rot of spinach. Left to right ; leaching : nitrate nitrogen was leached by irrigation (pot without bottom), control : water content was optimum (pot with bottom), submergence : soil was submerged at a depth of ca. 2 mm (pot with bottom).

Plate VI. Agrotechnical control of soil-borne diseases of spinach, especially *Aphanomyces* root rot.

1. Effect of rate of nitrogen application on the incidence of *Aphanomyces* root rot in the frame field infested with *A. cochlidioides*. Plot without nitrogen application. Severe outbreak is seen at the plot. The amount of nitrate nitrogen remaining in soil before fertilizer application was 22.4 mg/100 g soil
2. Plot with nitrogen application (15 kgN/10 a) at the frame field experiment of legend 1. The incidence of root rot was remarkably reduced by the nitrogen application.
3. Short-term soil solarization by mulching plus tunnel at a vinyl greenhouse of Murashige farm in Sapporo city (22 July-4 Aug., 1986). Right field : treated plot, left field : untreated plot.
4. Detection of fungi at various soil layers after soil solarization of legend 3
The upper row : solarized, the lower row : nonsolarized. The medium used was Martin and Johnson's medium. The figure represents soil layers ; 1 : 0-5 cm, 2 : 5-10, 3 : 10-15, 4 : 15-20.
5. Effect of soil solarization of legend 3 on soil-borne diseases in a spinach field (at the first cropping after solarization). Right field : solarized plot, left field : nonsolarized plot.
6. Mapping out of optimum time for soil solarization at a vinyl house in Takasu area of Hokkaido prefecture. The optimum time is mapped out on a map of 1/25,000 by mesh of 1 km square by using a computer system of the climatic information in Hokkaido pref.

Plate VII. Agrotechnical control of soil-borne diseases of spinach, especially *Aphanomyces* root rot.

1. Effect of heating and water treatments set up by supposing the soil condition of soil solarization on the number of fungi in soil (*in vitro*). Left to right ; first : soil moisture weight of 5%, second : 35%, third : 65%. Each plot was heated at 50°C for 8 hours per day, and incubated at 25°C for 16 hours per day. The integrated time of heating at 50°C was 56 hours.
2. Effect of soil solarization by mulching alone at an open field of Yanase farm in Sapporo city (29 June-10 July, 1988) on soil-borne diseases of spinach as the first crop after solarization. Left field : solarized plot, right field : nonsolarized plot.
3. Inhibition of germination of spinach by intermixing the various root residues with soil in pot

test. Observed 12 days after sowing. Left to right ; untreated, 3 g of diseased root per pot, 3 g of healthy root per pot, 1-3 row : plots in sterilized soil, 4-6 row : plots in nonsterilized soil.

4. Effect of intermixing various root residues of spinach with soil on the severity of the soil-borne diseases in the middle growing plant.

Observed 35 days after sowing (plots in sterilized soil). Left to right ; first row : untreated, second : 3 g of diseased root per pot, third : 3 g of healthy root per pot, fourth : 6 g of healthy root per pot.

5. Effect of pulling out root residues at harvest time in preceding cropping of spinach on disease incidence and on the growth of next cropping. Plot of pulling out at Hokkaido Central Agricultural Experiment Station.
6. Untreated plot of the field experiment of legend 5. Outbreak of Fusarium wilt and inhibition of growth are seen.