

トンネル内の CO₂ 濃度が ダイコンの生育に及ぼす影響 *

成 松 次 郎

The Influence of CO₂ Concentration on the Growth of Japanese Radish in Plastic Tunnel.

Jiro NARIMATSU

緒 言

冬春まきダイコンのトンネル栽培は、被覆の保温作用を活用した栽培法である。この栽培法では、生育初期のトンネル内気温をなるべく高く保つため、トンネルを终日密閉状態に管理する。これは、高温による脱春化作用を利用して、花芽分化を抑制することを目的としている。

冬から春にかけての気温上昇期におけるトンネル内の温度管理方法については多くの報告があり⁵⁾⁹⁾¹⁰⁾¹²⁾、これらをまとめると、トンネルは葉に高温障害が起こりそうな温度に上昇する日まで密閉し、その後、徐々に換気率を上げる方法が良いとしている。

筆者ら¹⁰⁾は2月まきトンネル栽培での換気試験を行い、播種後40日間の長期密閉をすると、葉色が淡緑化することを観察した。この時にはトンネル内の気温が40℃に達したことから、この症状を高温障害によるものと考えた。

しかし、密閉したトンネル内は外気とのガス交換が極めて少ないため、CO₂は土壌からの発生と植物の呼吸による供給が大半を占める。そのため、植物体が大きくなり光合成が活発になるとCO₂欠乏が起きることも予想され、CO₂欠乏が葉色淡緑化の原因ではないかと推定された。

そこで、本報告では、トンネル内のCO₂濃度が生育に及ぼす影響とCO₂施用の効果を検討するとともに、換気

によるCO₂濃度の変化と生育の関係を調査した。また、ダイコンのトンネル内環境の改善に関して、栽培上の指針が十分確立されていないので、この点についても明らかにした。

本研究を進めるに当たり、野菜・茶業試験場中島武彦博士には貴重なご助言とご校閲を賜った。記して謝意を表する。

材料及び方法

実験1. トンネル内へのCO₂施用効果

1988年2月23日に品種「耐病総太り」(タキイ種苗)を播種した。栽植方法は、ベッド幅80cm, 通路70cm, 条間45cm, 株間27cmの2条千鳥まきとし、3月23日に間引いて1本立ちにした。

トンネルの大きさは幅80cm, 高さ40cm, 長さ10mのかまぼこ型(トンネル内容積2.5m³)で、厚さ0.075mm, 幅185cmの梨地ビニルを播種日に被覆し、両裾に土寄せして密閉した。また、厚さ0.02mmの透明ポリエチレンフィルムを用いてマルチを行った。

施肥量は、10a当り化成肥料で窒素15kg, リン酸18kg, 加里14kgと牛ふんおがくず堆肥2tを施用した。

CO₂は液化炭酸ガスを用い、トンネル内濃度1,000ppmを目標に、3月23日~29日は0.2l/min, 3月30日~4月6日は0.5l/minの流量で、自作の制御装置を使って施用した。CO₂測定器は山武ハネウエル製APBA-200Yを用いた。

試験区の構成は、3月23日から29日までの1週間密閉状態でCO₂施用したCO₂I, CO₂無施用の対照I, 3月30

* 本報告の一部は平成3年度園芸学会春季大会において発表した。

日から4月5日までの1週間密閉状態でCO₂施用したCO₂Ⅱ及び無施用の対照Ⅱの計4区とし、2反復で実施した。なお、CO₂施用終了日の翌日からはCO₂Ⅰと対照Ⅰはトンネルの裾を20cm程度上げて終日換気とし、CO₂Ⅱと対照Ⅱはトンネル全体を除去した。

実験2. 換気によるトンネル内CO₂濃度の変化と生長

1989年2月7日に品種‘天春’（サカタのタネ）を播種した。栽植方法、トンネルの方法と資材、施肥量は実験1と同じである。

処理期間は、間引いて1本立ちにした後の3月9日から20日までで、換気方法は、外気をブローアによってトンネル内に導入した。この方法は第1図に示したように、塩ビ管を使って1つのトンネル内5か所に設けた送風口より外気を導入し、トンネル片側4か所に埋設した排気口より排出させた。なお、換気量は1つのトンネル当り1.4~1.6m³/minに調節した。

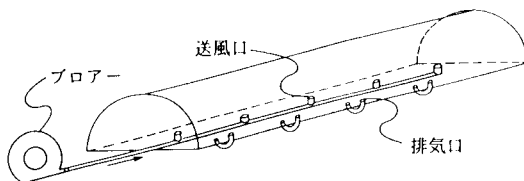
試験区の構成は、送風換気（昼）、送風換気（終日）、CO₂施用及び対照の計4区、2反復である。送風換気（昼）は毎日8時30分から16時まで換気し、送風換気（終日）は終日の換気を行った。CO₂施用は液化炭酸ガスにより400ppmを目標に、0.1~0.3ℓ/minの流量で施用し、換気は行わなかった。対照は無換気、CO₂無施用である。

処理終了後は、すべての区でトンネルの裾を20cm程度上げる終日の裾換気を行い、トンネル全体は3月27日に除去した。

実験3. トンネルの換気時刻と生長

1990年2月9日に品種‘天春’（サカタのタネ）を播種した。栽植方法、トンネルの方法と資材、施肥量は実験1と同じであるが、堆肥は施用しなかった。3月9日に間引いて1本立ちにした後、トンネルの両側の裾に20cm程度の換気幅を設けて、朝夕の一定時刻に開閉して換気した。但し、強風時には風害を避けるために、一時的に裾を下した。

トンネルの開閉処理期間は3月9日から27日までとし、28日にトンネル全体を除去した。



第1図 トンネルの換気方法

試験区の構成は、終日換気、8時換気、10時換気及び換気時刻変更の4区、2反復とした。処理期間中、終日換気は終日の裾上げ状態であり、8時換気は午前8時より午後4時まで裾上げを、10時換気は午前10時より午後4時まで裾上げをした。換気時刻変更は3月9日から18日までは午前10時より、19日から27日までは午前8時より午後4時まで裾上げした。

実験4. CO₂濃度及び気温と光合成特性

1990年2月27日に品種‘天春’をロックウール粒状綿を詰めた直径12cm、高さ4cmのポリポットに播種し、液肥を与えて室温が最低10℃以上のハウス内で育成した。光合成測定に用いた個体は葉数で13~16枚、生育日数37~42日であった。

光合成は、光合成・蒸散測定システム（小糸工業K.K.製）を使い、光の強さ1,780 μmol/m²・sec（BOCランプ1灯）、相対湿度60%、通気量10ℓ/min、チャンパー容量12ℓの条件下で、気温は15、25及び35℃の3段階、CO₂濃度は0~1,750ppmに変化させて測定した。そして、このチャンパー内に供試個体の最大葉を挿入して単葉の光合成速度を測定した。

結果

実験1. トンネル内へのCO₂施用効果

(1) トンネル内のCO₂濃度

トンネル内CO₂濃度は3月11日から日中300ppmを割って大気以下となり、CO₂施用前日の3月22日には100ppmまで低下した。さらに、生長に伴ない4月4日には、対照Ⅱにおいて50ppmまで低下した。夜間については、測定を開始した3月4日以降は測定器の測定限界2,000ppm以上となっていた。

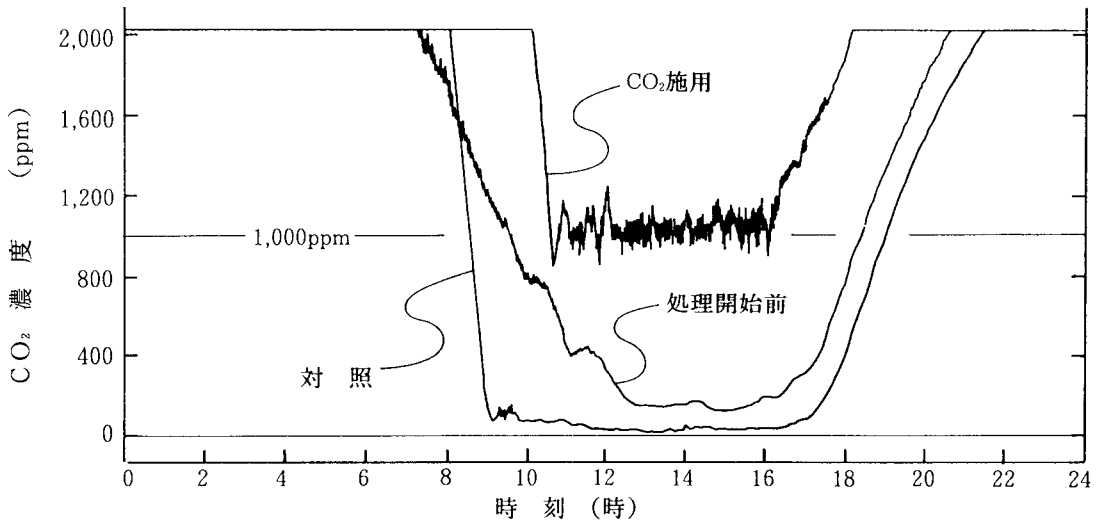
CO₂施用は、1,000ppmを目標に施用したところ、ほぼ目標値での制御ができた。トンネル内CO₂濃度の変化は、第2図に示したように、日の出とともに急減し、日中は常時低い値で経過し、日没に向けて急増する特徴が認められた。

(2) トンネル内の気温

密閉したトンネル内は、日射の強い時には気温が上がり、3月16日には始めて40℃を越えて最高気温は44℃となった。処理期間中の気温を第1表に示した。これによると、前期処理期間（3月23日~29日）のトンネル内の最高平均気温は33.7℃、後期（3月30日~4月5日）は36.8℃となった。

(3) 生育

生育調査の結果を第2表にまとめた。これによると、

第2図 トンネル内のCO₂濃度変化の例(1988年)

注) 1. 測定日 処理開始前 3月20日, CO₂施用 4月2日
対 照 4月4日
2. 測定レンジ 0~2,000ppm

第1表 処理期間中のトンネル内気温(1988年)

期 間	試 験 区	最 高	最 低	平 均
		°C	°C	°C
3月23日~ 29日	CO ₂ I } 対照I }	33.7 ± 10.0	5.9 ± 2.3	19.8 ± 5.3
	外 気	14.1 ± 3.4	4.8 ± 1.8	9.5 ± 1.8
	CO ₂ I } 対照I }	20.0 ± 5.2	5.5 ± 1.9	12.8 ± 3.2
3月30日~4月5日	CO ₂ II } 対照II }	36.8 ± 9.6	6.7 ± 2.0	21.7 ± 5.4
	外 気	15.9 ± 4.7	5.5 ± 1.9	10.7 ± 2.9
	CO ₂ I } 対照I }	36.8 ± 9.6	6.7 ± 2.0	21.7 ± 5.4

注) 1. 数値は平均気温±標準偏差を示す。

2. 測器は測温抵抗体を用い、測定位置は地上20cm。

3月30日におけるCO₂Iの生育は、葉肉が厚く、葉色が濃く、対照Iより茎葉重、根重ともに重かった。

4月6日におけるCO₂Iと対照Iの葉は、換気をしたため葉色が濃くなった。CO₂IIは対照IIより、ほとんどの測定項目で生長量が大きく、特に葉面積の増大が顕著であり、葉面積指数は2.45と大きかった。また、CO₂IIはCO₂Iに対して、対照IIは対照Iに対していずれも葉面積の増大が著しく、茎葉重は重かったが、茎葉の乾物重については逆に軽かった。

4月21日では、根重は、CO₂I > CO₂II > 対照I > 対照IIの順に重かった。なお、この時に、全区に抽台が観察され、平均花茎長は13~18cmであったが、試験区間に有意差は認められなかった。

第2表に示した数値から生長解析を行った結果を第3表に示した。これによると、3月24日~30日の生長は、CO₂Iで相対生長率が高く、CO₂施用より純同化率が向上した。3月31日~4月6日の生長は、CO₂IIで相対生長率が高く、同じくCO₂施用により純同化率が向上した。対照IIは純同化率が低く、4月5日までのトンネル密閉被覆は生長を抑制した。

実験2. 換気によるトンネル内CO₂濃度の変化と生長

(1) トンネル内のCO₂濃度

換気またはCO₂施用を開始する前日の日中のトンネル内CO₂濃度は120ppmまで低下した。

処理期間中のトンネル内CO₂濃度変化の例を第3図に

第2表 CO₂の施用時期が生育に及ぼす影響 (1988年)

調査日	試験区	葉数 枚	最大 葉長 cm	葉色	葉面積 cm ²	葉面積 指数	生 重			乾 物 重		
							茎葉重 g	根 重 g	合 計 g	茎葉重 g	根 重 g	合 計 g
3/23	(処理開始)	8.0	20.5	—	321	0.30	18	1	19	1.2	0.1	1.3
3/30	CO ₂ I	13.7b	26.8a	—	1110b	1.03	74b	8b	82	6.6b	0.6b	7.2
	対照 I	12.7a	27.2a	—	869a	0.80	57a	5a	62	3.7a	0.4a	4.1
4/6	CO ₂ I	18.9b	32.7b	39b	2093b	1.94	129b	29c	158	11.9c	2.0d	13.9
	対照 I	17.7a	29.9a	37b	1512a	1.40	85a	16b	101	8.3b	1.2b	9.4
	CO ₂ II	19.2b	36.5c	35a	2650c	2.45	167c	27c	194	11.6c	1.6c	13.2
	対照 II	17.5a	37.2c	32a	1847b	1.71	117b	12a	129	6.5a	0.7a	7.2
4/21	CO ₂ I	—	49.7c	—	—	—	502c	316d	818	34.1bc	18.6d	52.7
	対照 I	—	47.2b	—	—	—	439b	245b	684	30.7b	14.0b	44.7
	CO ₂ II	—	46.7b	—	—	—	476bc	278c	754	35.1c	16.5c	51.6
	対照 II	—	41.7a	—	—	—	318a	134a	452	25.1a	8.1a	33.2

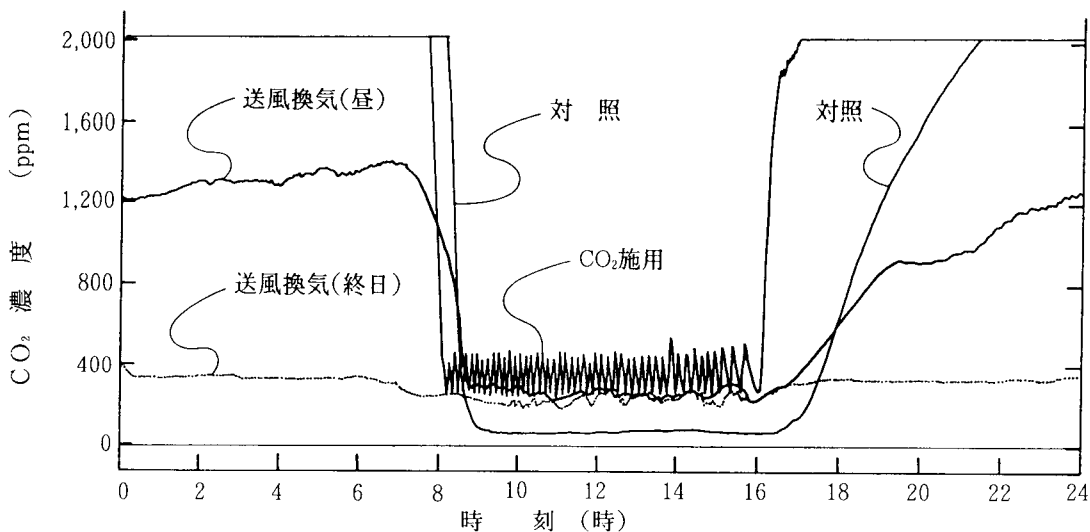
注) 1. 数値は調査個体数20の平均値を示す。

2. 葉色はミノルタ葉緑素計SPAD-501で測定し、数値が大きいほど葉緑素が多い。

3. アルファベットの異符号間にはダンカン多重検定により5%水準の有意差がある。

第3表 第2表のデータをもとに計算した生長関数 (1988年)

期 間	試 験 区	相 对 生 長 率	純 同 化 率	葉 面 積 比
		g/g/day	g/m ² /day	cm ² /g
3月24日～ 30日	CO ₂ I	0.2495	13.30	187.6
	対照 I	0.1697	7.63	222.4
3月31日～4月 6日	CO ₂ I	0.0937	6.13	152.9
	対照 I	0.1187	6.53	181.8
	CO ₂ II	0.1674	8.17	204.9
	対照 II	0.0788	3.33	236.6



第3図 トンネル内のCO₂濃度変化の例 (1989年)

注) 1. 測定日 送風換気(昼) 3月13日, 送風換気(終日) 3月17日
CO₂施用 3月15日, 対 照 3月18日

2. 測定レンジ 0~2,000ppm

示した。この事例では、送風換気（昼）は日中230ppmまで低下し、夜間はそれよりやや高濃度を示した。送風換気（終日）は日中180ppmまで低下し、夜間は320ppm前後を推移したこと、CO₂施用は日中400ppm前後で制御された値を示し、夜間は2,000ppmを越えて高濃度となったこと、そして、対照は日中60ppmまで低下し、夜間は2,000ppmを越えたことが示され、処理方法によってCO₂濃度は著しく異なった。

(2) トンネル内の気温

3月8日の処理開始前日には最高36~38℃とトンネル間に若干の差はあるものの高温を示した。その後の処理期間中（3月10日~20日）は日照に恵まれる日が多く、

第4表に示したように、最高平均気温は、送風換気（昼）で35.0℃、送風換気（終日）で34.4℃、CO₂施用で39.5℃及び対照で40.7℃と試験区間の差は著しいが、最低平均気温は、1.6~2.5℃となり試験区間の差は小さかった。

(3) 生育

生育調査の結果を第5表に示した。処理終了時の3月20日では、対照は他区より根重、茎葉重などの生長量は劣り、葉色は淡かった。これに対し、CO₂施用は際立った生長促進が認められ、葉色は濃かった。送風換気（昼）と送風換気（終日）はほぼ似た値を示し、対照とCO₂施用の中間的な生長量を示した。

4月17日の収穫期では根重はCO₂施用が最も重く、次

第4表 処理期間中のトンネル内気温（1989年 3月10日~3月20日）

試験区	最高 ℃	最低 ℃	平均 ℃
送風換気（昼）	35.0 ± 2.3	1.6 ± 3.5	18.3 ± 2.2
送風換気（終日）	34.4 ± 2.6	2.0 ± 3.6	18.2 ± 2.4
CO ₂ 施用	39.5 ± 3.1	2.2 ± 3.4	20.9 ± 2.4
対 照	40.7 ± 3.0	2.5 ± 3.5	21.6 ± 2.4
外 気	17.9 ± 2.1	1.0 ± 3.5	9.5 ± 2.5

注) 1. 数値は平均気温±標準偏差を示す。

2. 測器は測温抵抗体を用い、測定位置は地上20cm。

第5表 換気方式が生育に及ぼす影響（1989年）

調査日	試験区	葉数 枚	最大 葉長 cm	葉色	葉面積 cm ²	生 重			乾 物 重			
						葉面積 指数	茎葉重 g	根 重 g	合計 g	茎葉重 g	根 重 g	合計 g
3/9 (処理開始)		7.9	17.6	36	241	0.22	12	2	14	1.0	0.1	1.1
	送風換気(昼)	19.1bc	29.8b	48bc	1627c	1.50	91c	40c	131	8.4	2.5	10.9
	送風換気(終日)	18.6b	27.7a	48b	1357b	1.26	77b	37b	114	7.6	2.4	10.0
3/20	CO ₂ 施用	19.5c	29.0b	51c	1809d	1.67	110d	50d	160	11.8	3.1	14.9
	対 照	17.2a	27.3a	44a	1063a	0.98	57a	15a	72	5.1	1.0	6.1
	送風換気(昼)	30.9ab	44.5bc	—	—	—	331b	1017b	1348	—	—	—
	送風換気(終日)	32.4b	46.0c	—	—	—	377c	1045bc	1422	—	—	—
4/17	CO ₂ 施用	30.5a	42.4b	—	—	—	305b	1101c	1406	—	—	—
	対 照	30.6a	37.4a	—	—	—	228a	661a	889	—	—	—

注) 1. 数値は調査個体数20の平均値を示す。

2. 葉色はミノルタ葉緑素計SPAD-501で測定し、数値が大きいほど葉緑素が多い。

3. アルファベットの異符号間にはダンカンの多重検定により5%水準の有意差がある。

第6表 第5表のデータをもとに計算した生長関数（1989年）

期 間	試 験 区	相 対 生 長 率	純 同 化 率	葉 面 積 比
		g/g/day	g/m ² /day	cm ² /g
3月10日~20日	送風換気（昼）	0.2055	12.16	169.0
	送風換気（終日）	0.1987	12.56	158.2
	CO ₂ 施用	0.2348	21.99	106.8
	対 照	0.1539	8.22	187.2

いで送風換気（昼）と送風換気（終日）がほぼ同じとなり、対照が最も軽かった。

第5表に掲げた数値に基づく生長解析の結果を第6表に示した。これによると、3月10日～20日において、相対生長率及び純同化率はCO₂施用で著しく高く、一方、対照は最も低く、送風換気（昼）と送風換気（終日）はこれらの中間値を示した。

実験3. トンネルの換気時刻と生長

(1) トンネル内のCO₂濃度

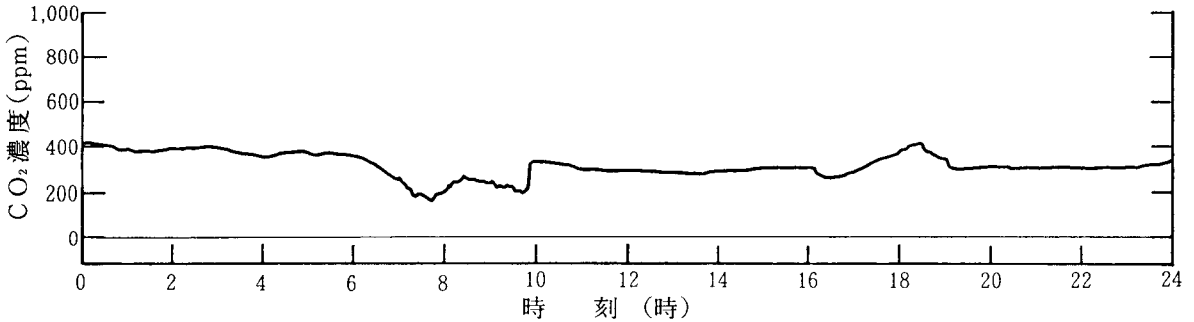
トンネル内のCO₂濃度は、処理開始前日の3月8日には日中100ppmまで低下した。また、8～9日の夜間には最大950ppmまで上昇した。

トンネルの裾の開閉によって換気した場合のCO₂濃度の変化を第4図に示した。裾を下した時でもトンネルは完全な密閉状態にならないので、夜間のCO₂濃度は400

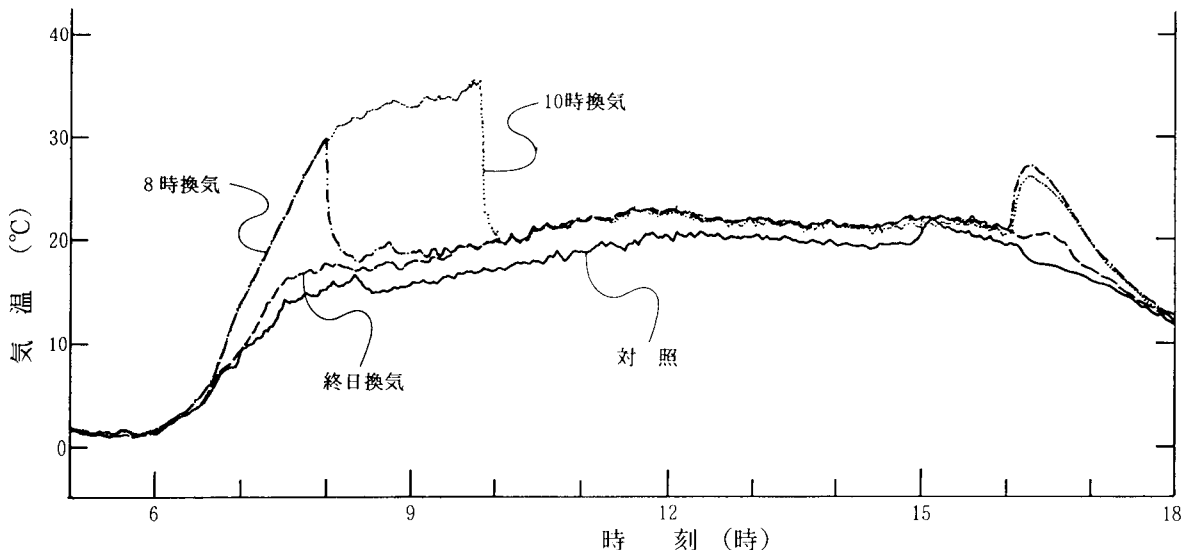
ppmより上昇しなかった。また、日の出とともにCO₂濃度の低下が始まって、150～200ppm程度まで下がるものの、外気との交換があつて極端な低下は起きなかった。そして、裾上げ後、トンネル内は大気濃度付近で日中を経過した。その後、午後4時に裾を下げることにより一時的にCO₂濃度が少し下がったが、夜間になって概ね大気に近い値を推移した。

(2) トンネル内の気温

処理開始前日にはトンネル内気温は最高40℃となった。処理開始後の晴天日のトンネル内気温の例を第5図に示した。これによると、8時換気と10時換気はそれぞれの時刻までは気温が上昇し、換気後には終日換気と同じ気温推移を示した。そして、午後4時にトンネルを閉めることにより若干の上昇がみられるものの、日没後は終日換気とほぼ同じとなった。



第4図 トンネル内のCO₂濃度変化の例（1990年） 注）3月20日の10時換気区



第5図 トンネル内気温（1990年） 注）3月20日（晴天日）

第7表 処理期間中のトンネル内気温（1990年）

期 間	試 験 区	最 高		最 低		平 均
		°C		°C		
3月 9日～18日	終 日 換 気	22.6 ± 4.6	3.9 ± 4.9	13.3 ± 3.4		
	8 時 換 気	23.7 ± 4.4	3.8 ± 4.8	13.8 ± 2.9		
	10 時 換 気	29.5 ± 3.6	3.8 ± 4.9	16.7 ± 2.9		
	換気時刻変更	30.4 ± 3.3	3.8 ± 4.9	17.1 ± 2.9		
	外 気	18.9 ± 2.4	3.8 ± 4.8	11.4 ± 2.5		
3月19日～27日	終 日 換 気	21.6 ± 4.0	3.7 ± 3.7	12.7 ± 3.4		
	8 時 換 気	26.7 ± 3.8	3.9 ± 3.9	15.3 ± 3.6		
	10 時 換 気	33.2 ± 3.3	3.9 ± 3.7	18.4 ± 2.7		
	換気時刻変更	28.2 ± 4.4	3.7 ± 3.9	16.1 ± 3.7		
	外 気	19.0 ± 2.4	3.6 ± 3.8	11.4 ± 2.8		

注) 1. 数値は平均気温±標準偏差を示す。

第8表 トンネルの換気時刻が生育に及ぼす影響

調査 日	試 験 区	葉 数 枚	最大 葉 長 cm	葉 色	葉面積 cm ²	葉面積 指 数	生 重			乾 物 重		
							茎葉重	根 重	合 計	茎葉重	根 重	合 計
							g	g	g	g	g	g
3/9 (処理開始)	7.3	14.8	39	127	0.12	6	1	7	0.6	0.1	0.7	
3/19	終 日 換 気	13.7a	19.9a	45a	442a	0.41	24a	11a	35	2.6	0.8	3.4
	8 時 換 気	13.9a	21.1b	46a	478a	0.44	26a	11ab	37	2.6	0.8	3.4
	10 時 換 気	15.9b	22.6c	46a	642b	0.59	35b	14c	49	3.2	1.0	4.2
	換気時刻変更	15.3b	21.9bc	48a	599b	0.55	32b	13bc	45	3.0	0.9	3.9
3/28	終 日 換 気	20.3a	28.8a	58b	1341a	1.24	87a	78a	165	8.8	4.7	13.5
	8 時 換 気	21.7b	31.1b	54a	1739b	1.61	107b	89ab	196	9.9	5.0	14.9
	10 時 換 気	23.7c	31.8b	53a	2149c	1.99	124c	91b	215	10.4	5.0	15.4
	換気時刻変更	23.0c	32.1b	53a	2026c	1.87	119c	96b	215	10.4	5.5	15.9
4/17	終 日 換 気	38.7a	39.4a	—	—	—	319a	866a	1185	—	—	—
	8 時 換 気	37.5a	39.7a	—	—	—	329a	941b	1270	—	—	—
	10 時 換 気	39.1a	45.0b	—	—	—	396b	918ab	1314	—	—	—
	換気時刻変更	38.7a	44.2b	—	—	—	397b	970b	1367	—	—	—

第9表 第8表のデータをもとに計算した生育関数（1990年）

期 間	試 験 区	相 对 生 長 率	純 同 化 率	葉 面 積 比
		g/g/day	g/m ² /day	cm ² /g
3月10日～19日	終 日 換 気	0.1643	10.73	153.1
	8 時 換 気	0.1637	10.16	161.1
	10 時 換 気	0.1849	10.95	168.9
	換気時刻変更	0.1802	10.81	166.7
3月20日～28日	終 日 換 気	0.1544	13.88	111.2
	8 時 換 気	0.1658	13.10	126.6
	10 時 換 気	0.1460	10.01	145.8
	換気時刻変更	0.1547	11.30	136.9

処理期間中（3月9日～27日）の気温を第7表にまとめたが、第5図でみたように、8時換気と10時換気の高気温は換気直前の値で示された。なお、最低気温に試験区間の差は認められなかった。

(3) 生育

生育調査の結果は第8表のとおりである。処理開始10日後の3月19日には10時換気（換気時刻変更と同一処理）で茎葉部の生長が最も進んだ。8時換気は終日換気と比べ、生長はやや良かったものの、10時換気よりやや劣った。

処理終了後の3月28日では、茎葉重は10時換気>換気時刻変更>8時換気>終日換気の順に重く、茎葉の生長は気温の高い区が優れていた。根重は換気時刻変更が若干重いものの、8時換気及び10時換気との差は有意ではなかった。終日換気の根重は最も軽かった。

第9表に第8表より算出した生長解析の結果を示した。3月10日～19日では、10時換気（換気時刻変更と同一処理）は葉面積比がやや大きく、純同化率は他区とほぼ同じ値を示したので、相対生長率は最も大きかった。

3月20日～28日では、10時換気は葉面積比は大きい、純同化率が小さいため、相対生長率は最も小さかった。一方、8時換気の相対生長率は最も大きかった。そして、換気時刻変更は、8時換気と10時換気の間値を示した。

実験4. CO₂濃度及び気温と光合成特性

CO₂濃度及び気温と光合成速度の関係を第6図に示した。これによると、CO₂濃度200ppm以上では高温ほど光合成速度が大きかった。200ppm以下ではCO₂濃度が光合成の制限要因となり、気温による光合成速度の差は小さかった。

また、CO₂飽和点は、15℃と25℃では1,500～1,700ppmにあるが、35℃ではそれ以上であり、実験の範囲内では見い出せなかった。一方、CO₂補償点は50ppm付近に存在することが示された。

考 察

1. トンネル内のCO₂濃度の動態

トンネルは外気との空気の交換を抑えて温度を上昇させることを主な目的にしており、トンネル内部のCO₂濃度については注意が余り払われていない。金関²⁾は、ミズナを栽培した時に、無孔ポリエチレンフィルムを被覆材としてトンネル内のCO₂濃度は好天日の昼間に著しく低く、逆に夜間は著しく高いことを見出している。このような日中の低CO₂濃度下では、作物の光合成速度は小さくなり、生長が抑制されるものと思われる。

ハウスやトンネルなどの施設内におけるCO₂環境の動態について、モデル的な検討がなされている。

内島¹³⁾は、グロスチャンパー内のCO₂収支式を次のように表している。

$$VcdCi/dt = Af(\gamma_s + F\gamma_p - Pt) - Q(C_o - C_i) \dots\dots(1)$$

ここで、Vc: 生育箱の容積 (cm³)、Af: 底面積 (cm²)、C_i: C_o: 箱内外のCO₂濃度 (g CO₂/cm³)、F: 群落の葉面積指数、 γ_s : 土壌呼吸量 (g CO₂/cm²・sec)、 γ_p : 呼吸量 (g CO₂/cm²・sec)、Pt: 群落の全光合成量 (g CO₂/cm²・sec)、Q: 箱の換気量 (cm³/sec) を示す。

(1) 式を小倉¹⁴⁾に従って展開すると次のようになる。

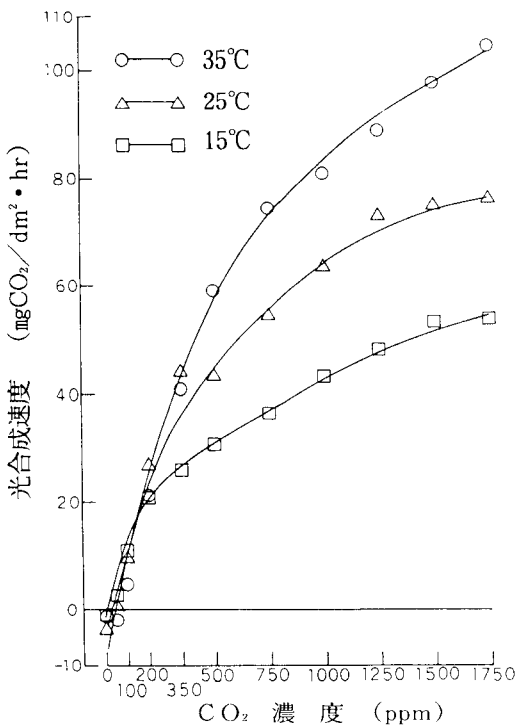
夜間の密閉トンネル内 (Pt = 0 及び Q = 0) のCO₂収支式は:

$$VcdCi/dt = Af(\gamma_s - F\gamma_p) \dots\dots(2)$$

となる。これを積分して解くと、

$$Ct = C_o - (Af/Vc)(\gamma_s + F\gamma_p)t \dots\dots(3)$$

となり、この式はトンネル内濃度が時間とともに直線的に上昇することを示す。従って、日の出前にトンネル内濃度は最高になり、早朝における光合成が活発になると



第6図 CO₂濃度及び気温と光合成速度

思われる。

一方、日中にはトンネル内濃度は光合成により低下する。(1)式においてQ=0であり、またPtは概ねCO₂濃度に比例するので、この比例定数をD(積分交換係数、内島¹²⁾)とおけば：

$$V_c dC_i / dt = Af(\gamma_s + F\gamma_p - DC_i) \dots\dots\dots(4)$$

となり、これを積分して解けば：

$$C_i = a + (C_0 - a)e^{-bt} \dots\dots\dots(5)$$

となる。ここに、 $a = \gamma_s / FD - \gamma_p / D$ 、 $b = AfF / V_c$ 。そして、 $t = \infty$ のとき、 C_i は平衡濃度 C_e を示すので：

$$C_e = a = \gamma_s / FD + \gamma_p / D \dots\dots\dots(6)$$

となる。 C_i は時間 t の経過とともに指数関数的に減少して C_e に近づき、 C_e はDに反比例し、 $(\gamma_s / F + \gamma_p)$ に比例する。

トンネル内土壌の呼吸量 γ_s は土質、温度、時刻などにより変化するが、黒田⁷⁾が整理したところでは、少ない場合で $0.1 \sim 0.5 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 、中程度で $0.5 \sim 1.0 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 、多い場合で $1.0 \sim 1.5 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{sec}$ と述べている。

呼吸量 γ_p は温度により影響を受けやすいが、一般的に $1.5 \sim 3.0 \text{ mg/dm}^2 \cdot \text{hr}$ で、換算すれば $0.42 \sim 0.83 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{sec}$ である。

また、積分交換係数Dは内島¹³⁾によれば、多くの作物で $0.05 \sim 0.2 \text{ cm/sec}$ の間にあるとしている。

そこで、本実験の場合に、 $V_c = 2.5 \times 10^8 \text{ (cm}^3)$ 、 $Af = 8.0 \times 10^4 \text{ (cm}^2)$ 、 $C_0 = 5.7 \times 10^7 \text{ (g/cm}^2 \cdot \text{sec)}$ 、 $\gamma_s = 1.0 \times 10^{-8} \text{ (g/cm}^2 \cdot \text{sec)}$ 、 $\gamma_p = 0.56 \times 10^{-8} \text{ (g/cm}^2 \cdot \text{sec)}$ 、 $D = 0.1 \text{ (cm/sec)}$ と置いた時に、葉面積指数 $F = 0.5$ 、夜間の12時間後 $t = 4.32 \times 10^4 \text{ sec}$ では、 $C_t = 1.83 \times 10^5 \text{ g/cm}^2$ (9,630ppm)と算出される。

実験1と2において、測定器が2,000ppmまでの測定範囲内であったために、実測値が得られていないものの、CO₂収支式からの試算結果から、葉面積の増大とともに夜間のトンネル内CO₂濃度はかなりの高濃度となっていたことが予測される。

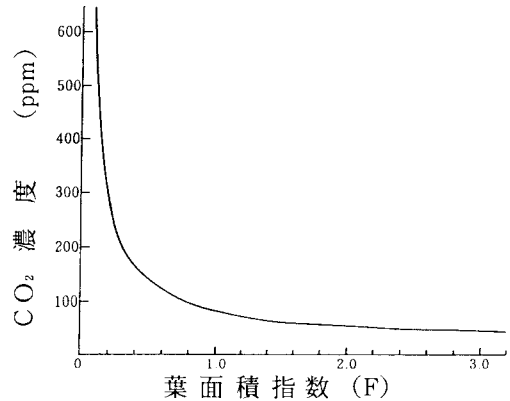
次に、日中のCO₂濃度低下について、前記の仮定に基づいて葉面積指数Fと平衡濃度 C_e の関係を算出し、それを第7図に示した。この図によると、 $F = 0.2$ 以下では大気以上の濃度となるが、これ以上ではCO₂濃度が低下し、Fの増大に従い、限りなく補償濃度に近づく。そして、実験4から得られた補償点の約50ppmに近い値となっている。実験1において、処理開始日に $F = 0.30$ であり、CO₂の実測値も低いことから、CO₂欠乏状態にあったことは明らかである。さらに、実験2においても、処理開始日

に $F = 0.22$ となり、やはり欠乏状態が始まっていたと思われる。

次に、換気されているトンネル内のCO₂平衡濃度を知るには、(1)式から：

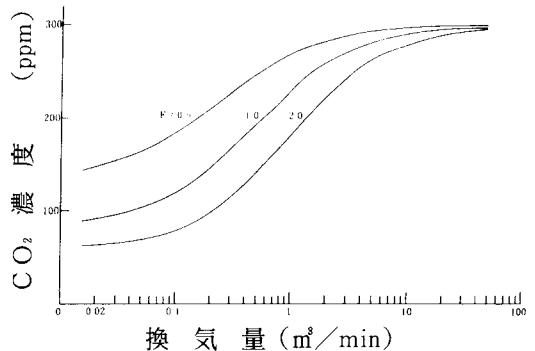
$$C_i = (\gamma_s / F - \gamma_p - C_0 Q / F Af) / (D + Q F Af) \dots\dots(7)$$

が導かれる¹³⁾。この式から、本実験に用いたトンネルでの換気量とCO₂濃度の関係を示すと第8図のようになる。この図では、 $F = 0.5, 1.0$ 及び 2.0 の事例を示した。実験2で行った $1.4 \sim 1.6 \text{ m}^3 / \text{min}$ の換気量では、 $F = 0.5$ の時に280ppm程度、 $F = 1.0$ の時に250ppm程度、 $F = 2.0$ の時に200ppm程度になることが読みとれる。第3図に示した事例は理論値との差は若干認められるものの、換気によるCO₂濃度の動態をよく示していると思われる。



第7図 葉面積指数と平衡濃度の関係

注) 土壌呼吸量 (γ_s) : $1.0 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{sec}$
呼吸量 (γ_p) : $0.56 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{sec}$
積分交換係数 (D) : 0.1 cm/sec



第8図 換気量によるCO₂濃度の変化

注) 底面積 (Af) : $8.0 \times 10^4 \text{ cm}^2$
葉面積指数 (F) : 0.5, 1.0, 2.0

2. CO₂濃度の生育に及ぼす影響

実験1において、CO₂無施用・無換気とした対照は、葉色が淡くなって生長は抑制された。茂木ら⁹⁾は、1月中下旬播きのトンネル栽培で、晩期換気では減収が著しく、その程度は播種期の早い、生育ステージの進んだものほど大きいと述べ、町田ら⁸⁾は、12月まきのトンネル栽培において、密閉条件下で本葉10枚頃までは生育障害は起きないが、本葉15枚、20枚と密閉期間が長くなるほど葉色は淡く、黄色を帯びて下葉の落葉も早くなると観察している。

これらのことは、いずれも気温上昇期に当ることから、高温障害を受けやすくなると同時に、CO₂欠乏による生育障害とも考えられる。この点について、実験1と2でみたように、密閉したトンネル内では、40℃のような高温下でもCO₂濃度が大気以上ならば何ら障害は起こらないことから、生育抑制や葉色の淡緑化はCO₂濃度の低下が主因と思われ、さらに、実験4からは、大気以上にCO₂濃度が高い場合は、35℃までの範囲で高温ほど光合成速度が大きいことが明らかになった。

GAASTRA¹⁾は、テンサイの場合に300ppmの時、20℃と30℃では光合成速度に差はみられないが、1,300ppmでは30℃の方が光合成速度は大きいと述べている。また、矢吹¹⁰⁾は、キュウリの光合成速度に対する葉温の影響について、CO₂濃度が高くなると温度の影響が大きくなり、また光合成量が最高を示す葉温が高くなることを指摘している。

このように、CO₂濃度によって、作物の温度反応が変わることから、生育初期におけるトンネルの密閉による日中の高温、高CO₂濃度が生長を促進させると推測される。さらに、生育の進んだ場合にも、高CO₂濃度下では高温管理が望ましく、CO₂施用法を考える時に応用できる栽培管理法である。

川島ら³⁾は、ダイコンのハウス栽培において、CO₂施用時には25～30℃の高温管理が良いが、CO₂施用しない場合には20℃程度に換気することを推めている。さらに、川島らは、600～750ppmの濃度で栽培すると、収穫期が1～2週間早くなると述べている。このことについて、実験2では、CO₂施用によって対照に比べて根重で1.7倍となり、川島らと同様に顕著な生長促進効果を得た。

施用時期に関して、実験1では生育ステージを変えて施用したが、3月23日～29日(本葉10枚前後)が最も多収となって適切な時期であることが示された。すなわち、これより早い時期ではCO₂欠乏の程度は軽いので、施用効果は小さく、また、これより遅い時期では気温上昇期

に当たるため、トンネル内は一層高温となって茎葉部は繁茂し、根の肥大が抑制されると思われた。このことについて川島ら³⁾は、生育後半のCO₂施用が生長促進に対して重要と述べているが、施用時期の温度条件を考慮することも必要と考えられる。

さらに、実験2では、CO₂施用区は施用終了直後には換気した区より明らかに生長が促進されていたが、収穫期にはその差が小さかった。CO₂施用中はトンネル密閉のため高温であるが、処理後には外気への馴化過程を経るので、一時的に生長が滞るものと推測された。このことに関して、吉岡ら¹⁵⁾は、ハウレンソウとイチゴの場合ではあるが、光合成実験から示唆に富む報告をしている。すなわち、CO₂施用を長期間行った後に外気に戻すと、光合成速度は無施用より低下することを認めている。これは、CO₂施用下では気孔伝導度が小さくなり、この状態は外気に戻しても回復されにくいと述べている。このようなことは、トンネル栽培のダイコンについても同様の現象があると推定される。

3. トンネル内CO₂環境の改善方法

実験2では、一定量の外気を導入することによって換気を図り、日中のCO₂濃度の低下と高温化を防いで生長を促進させることができた。終日の送風換気を行うと夜間はCO₂が高濃度にならなかったが、これはトンネルの穴換気法に相当するので、適切な換気孔率を設定すれば穴換気でもCO₂と温度環境は改善されると思われる。

古藤ら⁶⁾は、ニンジンのトンネル栽培で、換気孔率0.03%でトンネル内外で若干のCO₂交換が行われ、3%では無被覆状態に近いほど交換が行われていると指摘しているが、ダイコンのトンネル栽培の穴換気法でも同様なことと考えられる。

ダイコンについて、この方法による温度管理に関する研究がいくつか報告されている⁴⁾⁵⁾¹⁰⁾¹²⁾。これらを要約すると、生育初期はトンネルを密閉し、本葉10枚頃より徐々に換気孔を増して、最終的に表面積の5～10%程度まで拡大し、さらにおよそ35℃以上でトンネルを除去することになる。

しかし、トンネルの換気方法に関して、穴換気法は省力的ではあるが、フィルムの再利用ができないこともあって、一般に普及している方法とは言い難い。そこで、実験3において実際の栽培で行われている裾換気法によるCO₂濃度の動態と気温の推移を調べた。

CO₂濃度については、早朝時間帯の裾を下した状態でも、極端なCO₂欠乏は起きていないことが分かった。また、夜間のCO₂濃度の上昇は小さかった。これらのこと

は、裾を下した状態では密閉されることはなく、若干換気が行われていると考えられる。また、気温に関しては、換気時刻が遅れる程、気温の上昇が顕著であった。気温上昇期のトンネルの換気法について穴換気法は生長に応じて換気孔率を大きくし、裾換気法は生長に応じて換気時刻を早めることが大切である。

具体的には、2月まきトンネル栽培において、トンネル開閉実施期間中でトンネル効果を最大にするには、裾上げ時刻を前半は午前10時頃、後半は午前8時頃が良いと思われた。なお、実際栽培への適用に当っては、トンネルの規模、支柱などの資材による裾上げ位置、裾上げ程度の検討が必要である。

実験1と2で行った液化炭酸ガスによるトンネル内のCO₂施用法を実際栽培に導入することは困難である。また、CO₂発生剤のトンネル内施用は、持続的な発生方法がないことから実用性に乏しいと思われる。

金関²⁾は、トンネル内へのCO₂補給剤として、堆肥の有効性を見出している。実験3では、栽培のための堆肥を施用しなかったことから、トンネル密閉中でもCO₂濃度は実験1と2の場合と異なり、高濃度にはならなかった。このように、堆肥からの発生量は多いと思われるので、土壌改善と併せて堆肥の施用は最も実用的な方法と考えられる。

なお、トンネル内の温度、CO₂濃度以外の環境要因については未知の点が多い。特に、トンネル密閉下における高湿度や無風状態が生長へ及ぼす影響は全く解明されていない。これらのことに関する研究は今後に期待したい。

以上のことから、本研究において、ダイコンのトンネル栽培ではトンネル内のCO₂濃度が温度と同様に重要な要因であることを明らかにした。そして、換気は温度上昇を防ぐことと同時に、大気中のCO₂をトンネル内に取り入れる意義があり、これを目的とした換気法が確立される必要がある。トンネルの裾換気法において、この観点からの管理法を見出した。

摘 要

ダイコンのトンネル栽培において、CO₂濃度の動態を調査し、CO₂濃度の生育への影響を検討した。また、トンネル内の環境改善に関して、CO₂濃度を考慮した換気について若干の考察を加え、次の結果を得た。

1. トンネル内のCO₂濃度は、ダイコンの生育にとって、温度と同様に極めて重要な環境要因である。

2. トンネル内のCO₂濃度は、ダイコンの生育初期（葉面積指数0.2以下）には土壌からのCO₂供給によって、光合成を抑制しないレベルに保たれていた。また、トンネル内のCO₂濃度が大気以上ならば、トンネルの高温管理が光合成を増大させ、生長を促進した。

3. トンネル内の葉面積が増加（葉面積指数0.2以上）すると、CO₂欠乏が起るので、換気によって大気中のCO₂を導入する必要が認められた。

4. ダイコンのトンネル栽培において、長期密閉管理による生長抑制は、トンネル内の気温が40℃程度になっても、高CO₂濃度下では障害が現れないことから、その原因は高温ではなく、CO₂欠乏であると考えられた。

5. 2月まきダイコンのトンネル栽培について、密閉処理終了後の裾換気法として、裾上げ時刻を前半は午前10時頃とし、後半は午前8時頃とする方法を提案した。

引用文献

- 1) GAastra, P. (1963) Environmental control of plant growth. (edited by L. T. EVANS), Academic Press, N. Y., 113~140.
- 2) 金関四郎 (1968) 大阪府大紀要. 20 : 49~121.
- 3) 川島信彦・黒住徹・大原正行 (1989) 奈良農試研報. 20 : 31~39.
- 4) 北田幹夫・岡田巖 (1988) 富山農技センター研報. 3 : 45~52.
- 5) 古藤英司・町田治幸・隔山普宣 (1983) 徳島農試研. 21 : 9~15.
- 6) 古藤英司・町田治幸 (1987) 徳島農試研報. 24 : 1~9.
- 7) 黒田昭太郎 (1967) 秦野たばこ試速報. 2 : 10~20.
- 8) 町田治幸・古藤英司・小川純一・隔山普宣 (1985) 徳島農試研報. 22 : 13~27.
- 9) 茂木正道・高橋武 (1975) 群馬園試報 4 : 1~10.
- 10) 成松次郎・平岡達也 (1987) 神奈川農総研報. 129 : 15~28.
- 11) 小倉祐幸 (1985) 被覆栽培の環境調節, 農林統計協会, 62~66.
- 12) 岡安正・高橋俊夫 (1987) 埼玉園試報 15 : 9~15.
- 13) 内島善兵衛 (1965) 農業気象. 21 (3) : 105~112.
- 14) 矢吹万寿 (1985) 植物の動的環境, 朝倉書店, 58~61.
- 15) 吉岡宏・中川泉・河田貢・西村仁一・村上昌子 (1989) 園学雑 58別 2 : 350~351.

SUMMARY

The experiment was carried out about the influence of CO₂ concentration and the effect of CO₂ enrichment on the growth of Japanese Radish in the plastic tunnel in winter and spring, and that the variation of CO₂ concentration by means of ventilation in the tunnel.

1. CO₂ concentration is an important factor as well as temperature for the growth of Radish in the tunnel.

2. The photosynthetic efficiency and the growth by high CO₂ concentration supplied from soil were developed at the early stage of Radish of which leaf area index was under 0.2. For that, the management of the tunnel closed the sides foot of film tightly was important at that stage.

3. When CO₂ deficiency came out by extension of the leaf area in the tunnel, it was required to induce fresh air into the tunnel by the ventilation.

4. The deficiency of CO₂ concentration caused the inhibition of the growth by the management of the tunnel closed the sides foot of film for many days, and the high temperature about 40 °C had no influence on the inhibition of the growth.

5. The ventilation method holding up the sides foot of film in case of sowing Radish in February is this; after the treatment closing film tightly, the time of holding up the sides foot is at 10 a.m. in the middle stage, and it is at 8 a.m. in the late stage.