

第Ⅱ章 低濃度二酸化炭素施用が促成栽培キュウリの収量に及ぼす影響とその経済性評価

第1節 緒言

我が国における野菜の施設栽培では、増収を目的として冬季に栽培する果菜類を中心に二酸化炭素施用が行われている（大須賀，2003）。高温・高湿度管理を行うキュウリ（*Cucumis sativus* L.）の促成栽培では、換気時間が短く、換気窓及び内張りカーテンの開度も小さいために晴天日の日中には二酸化炭素飢餓が起こりやすく、その対策として二酸化炭素施用が行われ、高い増収効果が得られている（板木，1983；土岐，1977）。

施設栽培キュウリに対する我が国の二酸化炭素施用基準は、日の出30分後から換気を開始するまでの2～3時間、晴天時で1,000～1,500 ppm、曇天時で500～1,000 ppmとされている（大須賀，2003）。これは、本基準の二酸化炭素濃度の範囲に通常の栽植密度及び日射量における二酸化炭素飽和点があり（伊東，1973）、増収効果も高い（Slack・Hand, 1985, 1986）ことによる。また、植物が日射を受けてから気孔が全開するまでに30～50分を要すること、晴れた日では日の出後30～40分経過した頃に光合成が盛んになって施設内の二酸化炭素濃度が急激に減少すること（伊東，1970, 1971, 1973, 1977）、換気をともなう日中に二酸化炭素を施用しても室外に散逸して不経済とされ（伊東，1977；渡辺・上浜，1976）、これらの考えに基づいて施用時間が設定されている。

一方、換気を行っている時間帯でも、作物の群落内及び葉面周辺では二酸化炭素濃度が大气より低下すること（伊東，1970, 1971；Slack・Hand, 1985；矢吹・今津，1965）から、換気後も二酸化炭素を施用すれば物質生産が促進され、さらに増収する可能性があると推察される。また、オランダなどで行われているように大气中の濃度よりやや高い500～800 ppm程度に二酸化炭素を施用すれば、換気による室外への二酸化炭素放出割合が低下し、施用した二酸化炭素の利用率は高まると考えられる（Kamp・Timmerman, 2004；Mortensen, 1987）。Slack・Hand（1985）は、換気が頻繁に行われる夏季の施設栽培でも二酸化炭素濃度を450 ppmに高めることによってキュウリの果実収量が22%増加し、費用対効果が高いことを報告している。これらのことから、低濃度の二酸化炭素を換気中にも施用する方法は、1,000 ppm前後で短時間施用する方法に比べてキュウリの増収効果が高く、二酸化炭素の室外への散逸が少ない経済的な施用法ではないかと考えた。

本研究は、大气中の濃度よりやや高い500 ppmを目標に換気中にも二酸化炭素を施用する管理法が、促成栽培キュウリの生育と果実収量に及ぼす影響を明らかにするとともに、その経済性評価を行うことを目的とした。

第2節 材料及び方法

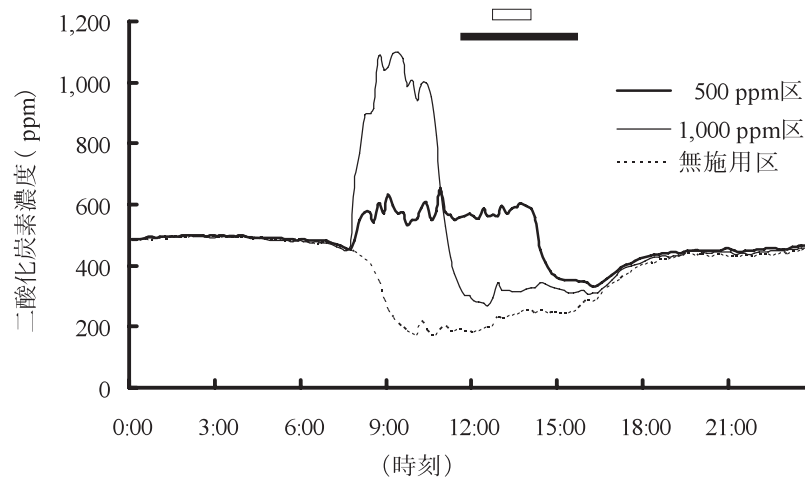
1. キュウリの果実収量に及ぼす二酸化炭素施用の影響

試験は、千葉県農業総合研究センター（現千葉県農林総合研究センター）生産技術部野菜研究室（千葉市）の間口4.8 m、奥行7 m、棟高3.3 mで、1室33.6 m²のガラス温室で実施した。内部に厚さ0.1 mmの農業用ビニルで内張りカーテンを設置し、高さ53 cmの高設床で栽培した。穂木は‘ハイグリーン21’（株）埼玉原種育成会）、台木は‘ひかりパワーゴールド’（株）ときわ研究場）を供試した。

試験区は、7時30分～14時30分までの7時間にわたって二酸化炭素濃度を500 ppmに制御する500 ppm区、7時30分～10時30分までの3時間1,000 ppmに制御する1,000 ppm区、無施用区の3区設け、1区10株3反復とした。

穂木は2003年10月22日、台木は10月23日に播種、11月4日に呼び接ぎを行い、11月20日に2葉期苗を、株間20 cm、417株・a⁻¹で定植した。主枝は6節までの雌花及び子づるを摘除し、7節目から出た子づるを1本放任枝とした。他の子づるは1節で摘心、主枝は13節で摘心した。室温は13時30分まで29℃、以後15時まで25℃、16時30分まで22℃で天窓を開閉し、夜間は13℃に加温した。天窓の開閉及び加温は、Green Kit 102（イー・エス・ディ社製）で制御した。内張りカーテンは2月20日までは11時30分に、それ以降は10時30分に10 cm開け、16時30分に閉じた。施肥は、基肥として窒素2.5 kg・a⁻¹、リン酸3.3 kg・a⁻¹、加里2.5 kg・a⁻¹施用した。その他の管理は慣行に準じた。

二酸化炭素は液化二酸化炭素を用い、高さ1.0 mの位置に1室2本、小孔を開けたビニルチューブを設置して施用した。12月19日、7節目の雌花開花期に二酸化炭素施用を開始し、収穫終了日まで施用した。二酸化炭素は、各区の設定値以下になったら500 ppm区は1度に1分間、1,000 ppm区は1月9日までは1度に1分間、1月10日以降は設定濃度を維持するために同2分間放出した。キュウリ群落内の二酸化炭素濃度は、赤外線二酸化炭素分析計Ventpstat（TELAIRE社製）で測定した。キュウリの果実は2003年1月1日～3月10日まで毎日収穫し、粗収益は月別上物収量に1999～2003年の東京都中央卸売市場の月別平



第1図 ガラス温室内二酸化炭素濃度の日変化

□ は天窓が開いている時刻を示す
 ■ は内張りカーテンを開けている時刻を示す

第1表 二酸化炭素施用が促成栽培キュウリの果実収量に及ぼす影響

試験区	キュウリの果実収量 (kg · a ⁻¹)							
	1月		2月		3月		合計	
	上物	総収量	上物	総収量	上物	総収量	上物 ^z	総収量
500 ppm	445	484	394	458	163	184	1,002 c ^y (155)	1,126 c (150)
1,000 ppm	390	421	377	445	136	147	903 b (139)	1,012 b (135)
無施用	247	281	303	359	98	108	648 a (100)	749 a (100)

^z上物は、曲がり3 cm未満の果実の合計収量

^y同一列の異なる文字はTukey-Kramer法により5%水準で有意差があることを示す

均単価を乗じて算出した。

2. キュウリ幼植物の生育、乾物生産に及ぼす二酸化炭素施用の影響

試験は、前述のガラス温室で実施した。2003年2月17日に培養土げんきくん果菜200（コープケミカル社製）を詰めた播種箱に播種し、播種12日後に本葉未展開のキュウリ苗を播種箱から抜いて根を水洗し、崎山ら（2001）の方法に準じて育苗装置に移植して養液栽培を行った。培養液は大塚A処方（池田，1996）の3・4⁺濃度（EC 2.0 dS·m⁻¹）を用いた。移植14日後の3月15日にキュウリ3.5葉期苗を1株ずつ上記培養液を満たした1・5,000 a¹ワグネルポットに鉢上げし、前述したガラス温室の各処理区に各区7株搬入して二酸化炭素処理を開始した。培養液は、エアープンプによって常時通気処理を行い、処理7日後の3月22日に生育中庸な5株の生育量、乾物重を調査した。

第3節 結 果

1. 温室内二酸化炭素濃度

晴天となった2003年2月5日における無施用区の温室内二酸化炭素濃度は、8時頃から低下し始め、9時に300 ppmを下回り、最低濃度は171 ppmとなった。9時～16時30分までの平均濃度は223 ppmであった。500 ppm区では、二酸化炭素施用開始10分後の7時40分から施用を終了した14時30分までの平均二酸化炭素濃度は563 ppmであった。1,000 ppm区では、二酸化炭素施用開始10分後の7時40分から施用を終了した10時30分までの平均二酸化炭素濃度は935 ppmで、二酸化炭素施用中止後には270 ppmにまで低下した。500 ppm区及び1,000 ppm区の二酸化炭素濃度は、16時まで無施用区より高かった（第1図）。

第2表 キュウリ栽培期間中の二酸化炭素施用量

項 目	時 期	500 ppm区	1,000 ppm区
二酸化炭素施用量 (kg・a ⁻¹)	12月19日～31日	21	22
	1月1日～31日	59	70
	2月1日～29日	64	70
	3月1日～10日	26	25
	合計	170	187
1日当たり二酸化炭素施用量 (kg・日 ⁻¹)		3.1	3.5

第3表 二酸化炭素施用の経済性に関する各指標値

項 目	500 ppm区	1,000 ppm区	無施用区
キュウリ上物収量 (kg・a ⁻¹)	1,002	903	648
キュウリ粗収益 (円・a ⁻¹) ^z	355,200	319,800	227,300
二酸化炭素施用による粗収益増 (円・a ⁻¹) ^y	127,900	92,500	—
二酸化炭素施用装置一式 (円・a ⁻¹)	40,000	40,000	—
二酸化炭素施用装置償却年数 (年)	5	5	—
二酸化炭素施用装置減価償却費 (円・a ⁻¹ ・年 ⁻¹)	8,000	8,000	—
液化二酸化炭素施用量 (kg・a ⁻¹)	170	187	—
液化二酸化炭素単価 (円・kg ⁻¹)	140	140	—
液化二酸化炭素施用代 (円・a ⁻¹)	23,800	26,180	—

^zキュウリの月別収量に、1999～2003年までの東京都中央卸売市場の月別単価を乗じて算出した

^y二酸化炭素施用区粗収益－無施用区粗収益の値を示した

第4表 促成栽培キュウリに対する二酸化炭素施用の経済性(円・a⁻¹)

項 目	500 ppm区	1,000 ppm区
二酸化炭素施用による粗収益増	127,900	92,500
二酸化炭素施用に要する経費	31,800	34,280
(二酸化炭素施用装置減価償却費)	8,000	8,000
(液化二酸化炭素代)	23,800	26,280
差し引き収益増	96,100	58,220

2. キュウリの果実収量

収穫期間を通して二酸化炭素を施用した区は、無施用区に対して上物収量、総収量ともに多かった。上物収量は最も多収となった500 ppm区が無施用区の155%となり、1,000 ppm区は同139%となった。総収量も同様で、二酸化炭素施用区は無施用区の135～150%と、大幅な増収となった。二酸化炭素施用区間では、上物収量、総収量ともに500 ppm区が1,000 ppm区に対して15～16%多かった(第1表)。

3. 二酸化炭素施用の経済性

二酸化炭素施用チューブから放出される時間当たり二酸化炭素放出量を試験区ごとに測定し、各区の二酸化炭素放出時間から二酸化炭素施用量を推定した。その結果、栽培

期間中の二酸化炭素施用量は、500 ppm区が170 kg・a⁻¹、1,000 ppm区が187 kg・a⁻¹となり、500 ppm区は1,000 ppm区の2倍以上の時間施用しているにもかかわらず二酸化炭素施用量は9%少なかった(第2表)。

二酸化炭素施用によるキュウリの収量増に伴う粗収益増は、500 ppm区が127,900円・a⁻¹、1,000 ppm区が92,500円・a⁻¹となり、これから二酸化炭素施用に伴う施用装置の減価償却費、施用した液化二酸化炭素代を差し引いた収益増は、500 ppm区が96,100円・a⁻¹、1,000 ppm区が58,220円・10a⁻¹となった(第3表、第4表)。

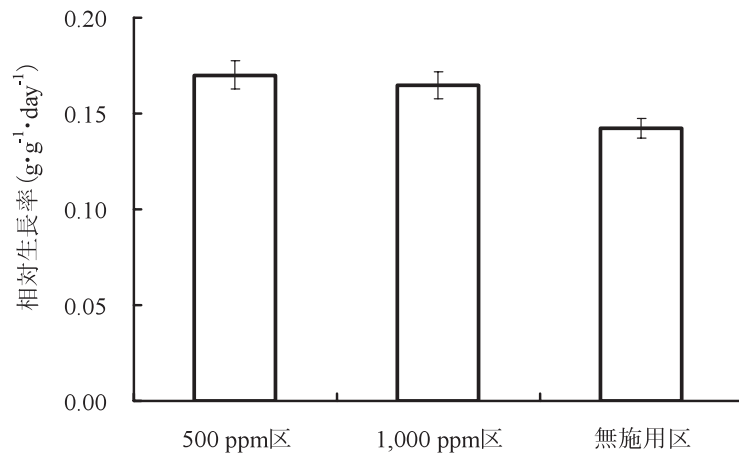
4. キュウリ幼植物の生育、乾物生産

処理開始後7日目のキュウリの生育量は、葉面積、各器官の生体重、乾物重とも、500 ppm区が最も大きく、次の

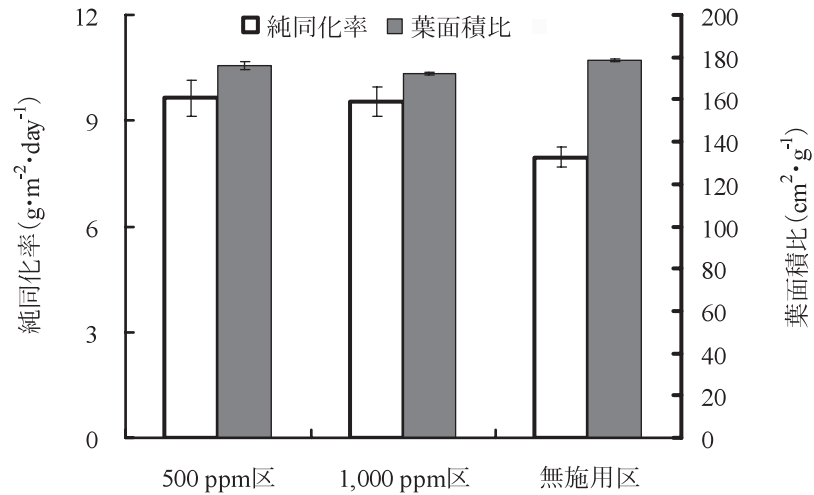
第5表 二酸化炭素施用がキュウリ幼植物の生育に及ぼす影響²⁾

試験区	葉数 (枚)	葉面積 (cm ²)	生体重 (g)			乾物重 (g)			乾物率 (%)			比葉面積 (cm ² ・g ⁻¹)
			葉	茎	根	葉	茎	根	葉	茎	根	
500 ppm	5.9	1,150	29.9	37.0	29.9	3.53	1.83	1.03	11.8	4.9	3.4	327
1,000 ppm	5.8	1,070	27.8	36.8	26.1	3.35	1.83	0.97	12.0	5.0	3.7	319
無施用	5.9	969	25.1	33.0	22.0	2.86	1.62	0.78	11.4	4.3	3.6	340

²⁾2003年3月22日に調査した



第2図 二酸化炭素施用がキュウリ乾物中の相対生長率に及ぼす影響
垂直線は標準誤差 (n=5) を示す



第3図 二酸化炭素施用がキュウリの純同化率と葉面積比に及ぼす影響
垂直線は標準誤差 (n=5) を示す

で1,000 ppm区となり、無処理区が最も小さい傾向を示した(第5表)。

乾物重の相対生長率も、500 ppm区が1,000 ppm区をわずかに上回った(第2図)。葉面積比は各区ほぼ同等で、純同化率は500 ppm区が1,000 ppm区をわずかに上回り、両区は無施用区より高かった(第3図)。

第4節 考 察

キュウリの果実収量に対する二酸化炭素施用効果は高く、無施用区に対して1,000 ppm区は35%、500 ppm区は50%増収した。菅原ら(1978)は、トマトの養液栽培で栽植密度を通常の2倍に相当する17株・3.3 m²にすることにより密植と二酸化炭素施用の相乗効果が現れ、果実収量が飛躍的に向上することを報告している。本試験でも栽植密度を417株・a¹と通常より密植にし、さらに子づるを1本伸長させて同化能力の高い新葉を常に確保して葉面積を増加させたことが、二酸化炭素施用区において物質生産量を増加させる一方で、無施用区では光合成による二酸化炭素消費量を増長させて二酸化炭素の不足を引き起こしたと考えられ、このことが本試験において二酸化炭素施用効果が顕著に現れた要因と推察された。

また、現状のキュウリに対する二酸化炭素施用基準を想定した1,000 ppm区に対して、換気中にも低濃度で二酸化炭素施用を行った500 ppm区では上物収量、総収量ともに15~16%多かった。幼植物を使用した試験でも、相対生長率は500 ppm区が1,000 ppm区をわずかに上回り、乾物生産量が多かった。相対生長率は、純同化率と葉面積比に分解することができ、純同化率はおよその乾物生産速度すなわち光合成速度を示すと考えられている(安井・本多, 1977)。葉面積比は各区ほぼ同等であるのに対して、純同化率は500 ppm区が1,000 ppm区よりわずかに高く、500 ppm区は1,000 ppm区に比べて光合成が促進され、総量として物質生産量が多かったことを示唆している。

Slack・Hand (1986) は、1月まきキュウリに対して二酸化炭素施用濃度を変えて栽培し、収穫開始後4週間の果実収量は二酸化炭素濃度を400 ppmから1,000 ppmに高めることによって約30%増加したものの、1,600 ppmまで高めても1,000 ppmと差が無く、1,000 ppmを最適濃度とした。この場合、二酸化炭素施用時間は、日の出後~日没までの長時間にわたるもので、各区同一であった。これに対して著者らの試験では500 ppm区と1,000 ppm区では二酸化炭素施用時間が異なっており、これが両試験で結果が異なった要因と考えられる。本試験において、晴天日の2003年2月5日の1,000 ppm区では温室内二酸化炭素濃度が二酸化炭素施用中止後急速に低下し、270 ppmにまでなった。11

時~14時30分までの室内の平均二酸化炭素濃度は、1,000 ppm区が330 ppmと低かったのに対して、500 ppm区では560 ppmと高く、この間500 ppm区では1,000 ppm区を上回る物質生産が行われたと考えられる(第1図)。伊東(1970, 1971)は、施設内では通常の換気回数である20~30回・h⁻¹では換気中でも二酸化炭素は不足しており、強い風が連続して施設内に入り込むか、光が弱まって作物の同化作用が低下しない限り、午後2~3時頃まで二酸化炭素が低濃度の状態で続くとしている。河野(1987)は、強制換気時でも室内の二酸化炭素濃度が外気より35 ppm低下したことを、Slack・Hand (1985)も施設内では換気中でも二酸化炭素濃度が大気中濃度より低下することを報告しており、本試験のように晴天日には換気中でも二酸化炭素濃度が大気濃度を下回することは一般的なことと考えられる。

すなわち、1,000 ppm区では施用中はキュウリの光合成が促進されたものの、施用中止後に二酸化炭素濃度は大気濃度より低下して光合成速度が低下したのに対して、500 ppm区ではその間でも二酸化炭素施用により光合成が促進され、総量として物質生産量が1,000 ppm区より多くなったものと推察され、これが500 ppm区が1,000 ppm区より増収した主因と考えられる。

一方、試験期間中の二酸化炭素施用量は、500 ppm区では長時間施用したにもかかわらず1,000 ppm区より少なかった。キュウリは高温・高湿度環境下で光合成が促進されて物質生産量が増加し(崎山ら, 2001)、増収することから換気時間が短く、特に外気温が低い12~3月の換気量は少ない。本試験の二酸化炭素施用期間は12月19日~3月10日の厳寒期であったため、内張りカーテンは10時30分もしくは11時30分まで閉じており、また日中の天窓の開閉温度は29℃と高いことから、内張りカーテン及び天窓が開く時間が短く、栽培中の換気回数は3~5程度と推定される。第1図に示した2003年2月5日において換気回数を3とし、二酸化炭素の室外への流出量を推定すると500 ppm区は534 gに対して1,000 ppm区は706 gとなり、500 ppm区では1,000 ppm区より二酸化炭素の室外への流出量が少なかったものと考えられた。

以上のように、キュウリの促成栽培において、500 ppmもしくは1,000 ppmを維持するように二酸化炭素を施用することによって、果実収量は無施用に対して39~55%増加した。また、換気中も含めて二酸化炭素濃度500 ppmを目標に7時間施用する方法は、同1,000 ppmで3時間施用するのに比べてキュウリの増収効果が高く、一方では二酸化炭素施用量が少ない、費用対効果の高い効率的な施用法であった。