炭酸ガス環境に関する研究 (第1報)

CO₂ 濃度がフダンソウの生育におよぼす影響

今津 正・矢吹 万寿・織田弥三郎

(大阪府立大学農学部)

Studies on the carbon dioxide environment for plant growth.

I. Effects of carbon dioxide concentration on the growth of

Swiss chard (*Beta vulgaris* L. var. *flavescens* D. C.)

T. IMAZU, K. YABUKI and Y. ODA

College of Agriculture, University of Osaka Prefecture, Sakai, Osaka

Summary

Swiss chard (*Beta vulgaris* L. var. *flavescens* D. C.) was grown in gravel culture using Hoagland's No.2 solution under polyvinyl plastic growth chambers to investigate the practice of CO₂ enrichment of the atmosphere on plant growth. Five chambers were employed with each at 300 (air), 600, 900, 3,000 and 6,000 or 30,000 ppm CO₂, the concentration being regulated by adjusting the flow of CO₂ and air into the chamber. Treatments were for 9 weeks in the early summer and winter experiments and for 24 days in the midsummer experiment. Benches were maintained above 15°C during the winter experiment.

In all experiments, fresh weight and dry weight

yields, plant height, and leaf areas markedly increased with increasing CO₂ concentrations; but, no significant difference was observed in the number of leaves. In the summer at 3,000 ppm, dry weight yield was five times more than those grown at 300 ppm and in the winter the yield was twice as those grown in 300 ppm. Fresh weight and dry weight yields did not reach a maximum even at 30,000 ppm.

Analyses of leaves at the end of the experiments showed that percentages of the N, P and K on a dry weight basis were nearly the same regardless of treatment.

I. 緒 言

大気中の CO₂ 濃度を高めて作物の増収を計ろうとする試みが 1800 年ころからあつたが、近年になつて欧米ではガラス室栽培に CO₂ 施用の実用化が進みつつあり、わが国でもトンネルやハウス栽培など園芸施設の増加をみつつある現状から、この技術の導入は検討しなければならないものと考えらる。

大気中の CO₂ 濃度は平均的に約 0.03% (容量) とされているが、戸外の圃場における CO₂ 濃度の微気象観測の結果によると昼間の作物群落内は CO₂ 濃度が低下して光合成の制限因子となることがしばしば指摘されている。それだけに室内栽培では内部の CO₂ 濃度は外気の標準濃度の半分以下の場合が多く、とくに冬期の礫耕ガラス室では標準 CO₂ 濃度の 1/4 になつている (矢吹今津, 1964)。

以上の観点から、CO₂ 濃度と作物の生育との関係について栽培学的な立場で解明されねばならぬ問題は多い。しかし、これに関連した研究のほとんどが生理学の分野

でなされたものである。

本実験は礫耕法によりフダンソウを材料とし、CO₂ 濃度の調節可能な生育箱で種々の濃度の CO₂ 処理を行ない、その濃度と乾物生産との関係、その処理時期、高濃度処理にともなう作物の反応などについて検討を試みたものである。

なお、この研究の一部は昭和 37 年度文部省科学研究費、“ガラス室、ハウス内における炭酸ガス環境に関する研究”によってなされたもので、研究の実施にあたり本学教授、西内 光、本田幸太郎両氏の助言をうけた。それぞれの各位に厚く感謝の意を表する次第である。

II. 材料および方法

1. 実験装置ならびに CO₂ 濃度の調節

本実験に用いた装置の概略は Fig. 1 に示したが、この生育箱は礫耕ベンチの上に透明な塩化ビニール・フィルムを全面に張つたフレームをスプリング付きの留金で密着固定したもので、調査ならびに管理の便のためフィルムはチャックで開閉ができるようになつている。礫耕の装置は、大きさ 1.0×1.5 m、深さ 30 cm のコンクリ

1966 年 10 月 4 日受理

Fig. 1 Side view of growth chamber

Fig. 2 The growth chambers used.

ート製のベンチに隙を25cmの厚さに充てんし、地下のタンクから培養液を1日4回定時に自動的に灌液した。また昼間蒸発散によつて失なわれた水は夜間一定の時刻に自動的に補給されるようにした。

CO₂の施用は、ボンベから各生育箱の一端に導かれ

たガスをファンにより空気と混合かく拌し、一定の濃度にして箱内に送りこみ、他端から排出するようにした。この実験では内部空気の交換は1分間に1回の割合であつた。また各生育箱および箱外の大気中のCO₂濃度の測定には熱伝導式ガス分析器（オランダ、GODART製）が使用され、処理開始前および処理期間中に数回の測定を行ない濃度維持の正確を期した（Fig. 1, Fig. 2）。

2. 材料およびCO₂処理

供試材料はフダンソウ（*Beta vulgaris* L. var. *flavescens* D. C.）の小葉種を用い、各実験ともベンチの隙上に直播し、発芽後の第1本葉の展開したころにCO₂

濃度処理を開始した。

実験は処理濃度が2~20倍で処理時期を夏と冬にかえた第1および第2実験と、処理濃度が10~100倍までの第3実験とに分けてあり、それらの処理時期および処理濃度はTable 1に示される。実験期間中は受光やその他の条件を等しくするため1週間ごとに間引きを行ない株間ならびに1ベンチ当たり個体数を等しく保つた。また冬の第2実験では各ベンチごとに隙中に100 Wの電熱温床線を敷設し、床温が15℃以下になると自動的に通電し保温した。

本実験では隙耕法を採用したが、培養液としてはHOAGLAND第2液を用い2週間ごとに全量を更新した。また実験期間を通じてpHはほぼ6.0に保たれるように調節した。

3. 生育調査および植物体の分析

生育調査は各処理区のベンチからランダ

Table 1. Carbon dioxide concentrations treated and durations of the experiment studied

Expt. No.	Year	Periods of expt.	No. of days	CO ₂ conc. (ppm)
1	1963	May 2 ~ July 4	63	300, 600, 900, 1,500, 30,000
2	1964	Jan. 2 ~ March 5	63	300, 900, 3,000, 6,000
3	1963	Aug. 17 ~ Sept. 9	24	300, 3,000, 15,000, 30,000

ムに選んだ10個体につき、処理後1週間ごとに行なつた。調査項目は新鮮重、乾物重、草丈、葉数、最大葉の大きさおよび葉面積で、葉面積の測定は穿孔器で打ち抜いた葉身の円盤より算定した。また処理打ち切り時の乾物粉末試料について体内のN、P、K含量を求め、NはGUNNING変法、PはDENIGES法、Kはflame photometer法によつて、それぞれ分析したものである。

III. 実験結果

1. CO₂濃度とフダンソウの生育との関係

(1) 第1および第2実験

第1実験（夏季）の処理期間中の生育の経過を各処理濃度別の乾物重で表わすとFig. 3のようである。

これによると処理前期の5週間ごろまでの増加はゆるやかで、その後の増加は日を追つて急激に上昇を示す。その増加の割合はCO₂濃度に応じて大きかつた。この傾向は冬の第2実験でもまったく同じであるので第1実験の場合のみを示す。

Fig. 3 Dry weight increase during the treatment at different CO₂ concentrations in Expt. 1.

次に処理9週間後の実験打ち切り日における生育調査の結果を第1実験は Table 2, 第2実験は Table 3 にそれぞれ示した。

第1実験では標準区（標準大気、CO₂ 濃度は約 300 ppm）にくらべ処理区に新鮮重、乾物重、草丈、葉面積のいずれにおいても CO₂ 濃度に応じた増加が認められ、なかでも新鮮重ならびに乾物重では著しい増加を示した。しかし株当たりの葉数においては各処理区と標準区とに大差がなかった。これらについて標準区の値を 100 とした比数で表わしたものが Fig. 4 である。たとえば

Table 2. Effects of CO₂ concentrations on growth of Swiss chard after 9 weeks treatment.

(per plant)

CO ₂ conc. ppm	Fresh weight g	Dry weight g	Plant height cm	No. of leaves	Maximum leaf		Leaf area cm ²	NAR g/dm ² /week
					Width cm	Length cm		
300	16.2	1.4	23.9	10.0	5.5	21.5	297.9	0.119
600	15.0	1.6	21.9	10.9	5.5	18.9	249.2	0.164
900	35.6	3.1	28.9	11.8	8.0	26.3	498.2	0.159
1,500	61.8	5.7	36.7	11.9	9.7	33.9	647.5	0.220
3,000	76.8	6.6	41.3	10.7	10.7	37.1	728.2	0.228

Table 3. Effects of CO₂ concentrations on growth of Swiss chard after 9 weeks treatment.

(per plant)

CO ₂ conc. ppm	Fresh weight g	Dry weight g	Plant height cm	No. of leaves	Maximum leaf		Leaf area cm ²	NAR g/dm ² /week
					Width cm	Length cm		
300	2.6	0.3	8.2	7.6	2.5	8.3	46.1	0.216
900	2.8	0.3	9.4	7.6	2.6	8.5	41.8	0.274
3,000	4.4	0.4	9.0	7.6	3.4	10.2	61.7	0.268
6,000	8.4	0.8	14.1	9.4	3.8	13.6	104.9	0.228

10 倍区の新鮮重および乾物重は標準区のそれにくらべるとほぼ 5 倍に達し、以下処理効果の大きな順でみると葉面積の 2.5 倍、最大葉幅の 2 倍、草丈の 1.8 倍および最大葉長の 1.7 倍であつた。

第2実験は、冬に第1実験と同じく9週間の処理を行ない、さらに処理濃度は2倍区に代わつて20倍区を設けた。実験打ち切り日における各処理区の生育の比較を Fig. 5 に示す。図は前回と同じく標準区の値を100とした比数で表わしてある。これによると3倍区は標準区にくらべいくぶんは生育促進の効果がみられたが大差はなく、10倍区では新鮮重ならびに乾物重は標準区のそれにくら

べてともに約1.7倍、20倍区は前者が3.4倍、後者が2.5倍を示し、同様に葉面積では10倍区が1.8倍、20倍区が2.2倍、草丈においては20倍区は標準区の1.7倍を示した。また最大葉の葉幅では標準区の1.5倍、同じく葉長が1.6倍であつた。これに対して葉数では第1実験と同様に各処理区とも CO₂ 濃度による影響は認めることはできなかった。

両実験を通じて CO₂ 施用による外観的な効果は処理開始後1~2週間目ごろから現われ始め、処理濃度の高い区ほど早い傾向が認められ、4~5週間めより、さら

Fig. 4 comparative result between normal and above normal CO₂ levels on Swiss chard growth in Expt. 1.

Fig. 5. Comparative result between normal and above normal CO₂ levels on Swiss chard growth in Expt. 2.

に顕著となる。すなわち処理区の新しい展開葉は標準区の葉にくらべ葉身が大きく肥厚した感じをうける。また株全体が立ちぎみで草勢が強まった (Fig. 6)。

以上の結果から CO₂ 処理はフダンソウの生育促進に著しい影響を与えることが明らかであるが、二つの実験における生育促進効果の差異はおもに両処理時期における日射量の違いにもとづくものと考えられ、これについては既に報告した。

(2) 第3実験

上記の二つの実験結果から、夏期はもちろん日射量の少ない冬期においても CO₂ 濃度の高くなるにつれ生育量が増大し、両実験の最高処理濃度でもなお生育促進のための最適 CO₂ 濃度に達しなかった。このことは自然光下でフダンソウの CO₂ 飽和点は今回の処理濃度の範囲よりもさらに高い所にあると考えられる。第3実験は前記の2実験の間を利用し、標準大気の10倍、50倍および100倍 (3,000~30,000ppm) までの高濃度処理区を設けて乾物生産量が最大となる CO₂ 濃度を見いだそうとしたもので、処理の日数は24日である。

Table 4. Effects of extra high CO₂ concentrations on growth of Swiss chard.

CO ₂ conc.	Fresh weight	Dry weight	Plant height	No. of leaves
ppm	g	g	cm	
300	4.0	0.4	6.7	3.6
3,000	17.3	1.6	8.9	5.4
15,000	12.5	1.1	8.2	4.8
30,000	20.4	2.2	10.3	4.9

実験打ち切り日における生育調査の結果を Table 4 に示す。処理期間が短いうえに極端な高温期で処理濃度と生育量との関係は上記2実験のように平行的ではないが100倍区においてもなお草丈、新鮮重および乾物重は増加を示しており、高 CO₂ 濃度にもとづく生育の抑制や障害はみられず、生育促進の CO₂ 最適値は、さらに高い濃度にあることを示している。また葉数においては前記の2実験と同様に、この場合も処理区間に大差はみられなかった。標準区にくらべ100倍区における乾物重は約5倍に達したが処理期間の短いにもかかわらずこのような生育促進をみたのは

Fig. 6. Comparative growth of Swiss chard affected by various concentrations of CO_2 after 9 weeks treatment.

処理期の強い日射によるものと考えられる。

2. CO_2 濃度と純同化率 (NAR)

CO_2 施用がフダンソウの物質生産能力におよぼす影響

をみるため、これを単位葉面積当たりの乾物の増加率、すなわち GREGORY によつて提唱された純同化率 (NAR)
$$= \frac{\log u_2 - \log u_1}{u_2 - u_1} \times \frac{w_2 - w_1}{t_2 - t_1}$$
 ただし u は t 時における植物の全葉面積、 w は t 時における全乾物重) によつて表示を行なつた。

第1および第2実験における平均純同化率は Table 2 と Table 3 に示されるが、両実験を通じ CO_2 処理区の純同化率は標準区のそれにくらべ高くなつてゐる。なかでも第1実験における純同化率の値は、ほぼ CO_2 濃度の高さに応じて大きく、10 倍区では標準区にくらべて2倍に近い値を示している。第2実験でも各処理区の純同化率は標準区にくらべて高かつた。また両者を比較すると第2実験の各純同化率の値は第1実験のそれにくらべて高かつた。

3. 植物体内の N. P. K 含量

実験打ち切り日に収穫した各処理区の乾物について N. P. K の三要素の分析を行なつた結果は Fig. 7 に

示される。

N についてみると、第1および第2実験とも株当たり含有量は生育に比例して処理濃度の高い区ほど多くなつてゐるが、乾物中の含有率は処理区間に大差なく、差の変化においても一定の傾向は認められなかつた。

次に P の株当たり含有量についてみると、両実験を通じて処理濃度の高い区ほど多くなつてゐるが、乾物の P 含有率は第1実験では処理濃度の高い区ほど、わずかに減少する傾向があり、第2実験では区間の変化に一定の傾向は認められなかつた。また K についても株当たりの含有量は第1および第2実験とも処理濃度の高さに応じて増加が認められるが、乾物中の K 含有率は両実験とも標準区と各処理区間に大差がないか、その変化に一定の傾向が見られなかつた。

IV. 考 察

CO_2 濃度と光合成の関係

Fig. 8 Influence of CO_2 concentrations on N, P and K contents in leaves of Swiss chard.

については植物生理学の分野で数多くの実験が行なわれ、CO₂ 濃度が標準大気の数倍ぐらいまでは同化量が増加し、それ以上では平衡状態に達するとするものが多い (THOMAS and HILL, 1948, HOOVER, JOHNSTON and BRACKETTE, 1933, GAASTRA, 1959)。しかし園場条件下で長期間にわたり CO₂ を施用栽培した報告は少なく、この場合にはたして同様の結果を得られるかどうかまづびらかでない。フダンソウは生育温度に対して適応性が強く、実験の目的から供試材料として選んだもので、著者らの処理濃度ならびに処理時期を変えた三つの実験結果は、かなりの長期間大気中の CO₂ 濃度を高めても、どの処理時期においても処理濃度に応じて生育が促進されており、とくに作物体の新鮮重および乾物重の増加が著しく、ついで葉面積、草丈の順であつた。なかでも乾物重の増加は夏期実験において 10 倍区は標準区の 5 倍、冬期実験の 20 倍区では 2.5 倍に達しているが、日本の自然条件下では生育箱内の入射量は戸外のその約 50 % であつたにもかかわらず上記のような結果を得たことは CO₂ の供給がフダンソウの光合成に対し一つの制限因子であることを示しており、作物への CO₂ 施用の観点からはなほだ興味深い。また夏期は冬期の乾物生産量に比較して著しく高かつたが、処理期間の積算日射量と乾物重の増加の関係を求めたところ両者は指数関係にありグラフに表わせば同一線上にのることがわかつた (今津、矢吹、織田, 1965)。ゆえに処理時期による生育量の差は日射量の差によつて生じたものといふことができる。

作物の乾物生産量は純同化率と葉面積とに支配されるが、Table 2 および Table 3 に示された結果は CO₂ 処理によつて純同化率が高まり、また葉面積も増大することにより乾物重が幾何級数的に増大することになる。なお本実験の標準区における夏期の純同化率の値は、普通の園場条件下での値に比べ、やや低いと推察されるが、これは昼間生育箱の気温が外気温にくらべて相当に高かつたためと考えられる。

次に本実験では自然光下で標準大気の 100 倍まで CO₂ 濃度を高めたにもかかわらず、なお生育促進がみられた点に関し、同じく自然光下でイネ、コムギ (村田, 1960)、インゲン (LUNDEGARDH, 1922) では標準大気の 3 倍の CO₂ 濃度、パレショでは 5 倍 (CHAPMAN and LOOMIS, 1953) および 6 倍 (LUNDEGARDH, 1922)、トマトの 8 倍、テンサイの 12 倍 (THOMAS and HILL, 1949) で、それぞれ CO₂ 飽和に達したと報告がある。これについては各研究者の実験条件が異なつているため比較検討することが困難であるが、本実験の結果はフダンソウ

自体の特性によるほか、間引を行なつて植物体を群落よりは個体に近い条件を与えたこと、生育箱内が毎分 1 回の割合で換気され CO₂ 濃度落差が少なく、かつ隙耕によつて無機栄養および水の供給が十分であつたことなどが CO₂ 飽和点を高めた理由と考えられる。また THOMAS および HILL (1949) の報告にあるような高 CO₂ 濃度にもとづく作物の生育障害は本実験ではまったく認められなかつた。同様、近年 DAUNICHT (1960) はキュウリで 8,000 ppm, また LAKE (1963) はトマトで 30,000 ppm の高濃度でそれぞれ健全な生育をしたことを報告している。

CO₂ 施用により第 1 および第 2 実験とも N, P, K の吸収率において、とくに差異が認められなかつた。しかし生育促進によつて各処理区は濃度に応じた株当たりの吸収量が増加しているので、今後の CO₂ 施用栽培を行なう際、施肥量について考慮しなければならぬことが起こり得ると考えられる。

以上、CO₂ 施用は光合成能率を高め、その処理濃度に応じてフダンソウの生育を著しく促進すると同時に収穫までの所要日数を短縮するので、これも CO₂ 施用の大きな特色といえよう。

V. 摘 要

空気中の CO₂ 濃度とフダンソウの生育の関係を検討するため、CO₂ 濃度を調節できる生育箱を製作し、夏 (1963 年、4~7 月) および冬 (1964 年、1~3 月) に、それぞれ 9 週間、自然光下で標準大気区とその 2 倍、3 倍、5 倍、10 倍および 20 倍に CO₂ 濃度を高めた区を設け、両時期における CO₂ 施用効果について検討した。また 1963 年 8 月末から 9 月始めの 24 日間、標準大気区とその 10 倍、50 倍および 100 倍区の高 CO₂ 濃度処理がフダンソウにおよぼす影響について実験を行なつた。なお、すべての栽培は隙耕法によつた。

1. 夏と冬の処理時期の異なつた実験では、処理後 1~2 週間より処理濃度に応じて草丈の伸長や葉身の肥大がみられ、4~5 週間よりはさらに顕著な生育促進を示した。

2. 実験打ち切り日の 9 週間めにおける茎葉の新鮮重および乾物重ともに CO₂ 濃度に比例して増加し、夏の実験では標準区にくらべ、10 倍区ではそれぞれ約 5 倍に達し、冬の実験では 10 倍区でそれぞれ約 1.7 倍、20 倍区では新鮮重が 3.4 倍、乾物重では 2.5 倍であつた。なお上記の乾物生産量における差異は季節による日射量の差異によるものであつた。

3. 実験打ち切り日における葉面積および草丈は夏の実験の 10 倍区では標準区に比べそれぞれ 2.5 倍と 1.8

倍，冬の実験では10倍区がそれぞれ1.3倍と1.1倍，^{①-303}③20倍区では2.2倍および1.7倍であつた。

4. 乾物中のN・P・K含有率は処理による大差はみられず，株当たりの各含有量では生育量に比例して処理濃度の高い区ほど増加がみられた。

5. CO₂濃度を極端に高くした（標準大気濃度の10倍，50倍および100倍）実験では濃度に応じた生育量の増加が認められ，100倍区（CO₂3%）でも飽和に達しなかつた。また，これらの濃度下における生育障害もまづなく認められなかつた。

引用文献

1. CHAPMAN, H. W. and W. E. LOOMIS. 1953. Photosynthesis in the potato under field conditions. *Plant Physiol.* ②③: 703—716.
2. DAUNICHT, H. J. 1960. Untersuchungen zur Wirkung des Kohlendioxyd-Angebots auf den Ertrag von Treibgemüsen unter besonderer Berücksichtigung der Hydrokulture. Dissertation aus dem Institut für Gemüsebau der Technischen Universität Berlin, 56.

GAASTRA, P. 1959. Photosynthesis of crop plant as influenced by light carbon dioxide, temperature and stomatal diffusion resistance. *Meded. Landbou. Wageningen* 59: 1—68.

- ④4. HOOVER, W. H., E. S. JOHNSUTON and F. S. BRACKETTE. Carbon dioxide assimilation in a higher Plant. *Smithsonian Inst. Miss. Coll.* 87(16) 1—19.

①②⑤ 今津 正・矢吹万寿・織田弥三郎. 1965. フダンソウの生育に対する炭酸ガス濃度と日射の相互補償について. *農業気象*, 21(2) 41—46.

- ④6. LARK J. V., 1963. Try CO₂ for the summer crop. *The Grower*, April 13: 765—766.

7. 村田吉男. 1962. 空気中の炭酸ガス濃度と作物の生育. *農及園* 37(1) 5—10.

- ⑧ THOMAS, M. D. and G. R. HILL. 1949. Photosynthesis under field condition. *Photosynthesis in plants*. Edited by J. Frank and W. E. Loomis. Iowa State College Press, Ames, Iowa. 19—52.

9. 矢吹万寿・今津 正. 1965. ガラス室の炭酸ガス濃度について. *農業気象*. 20(4) 125—127.