土 壌 の 気 相 環 境 の 研 究 (4)

土壌内 CO_2 濃度分布とその日変化について

伊藤 実*

岩手大学農学部*

本論文では土壌内の CO_2 濃度分布を、拡散係数に基づく土壌構造との関係で明らかにし、かつ、ハウス内 CO_2 濃度の日変化がある時、土壌内の CO_2 濃度分布の変化についても研究を行った。

拡散係数が均一な土壌柱では、 CO_2 濃度分布を深さと濃度との関係で表わすと、その分布形は上に凸形を形成する。しかし下層に向けて拡散係数がしだいに低下していくような土壌柱では、 CO_2 濃度分布形は深さとともに直線状に濃度が増加するパターンになる。拡散係数の小さい層が下層に厚く、その上に拡散係数の大きな土層が占めている土壌柱では、 CO_2 濃度分布形のパターンは、上層部で上に凹、下層部で凸形を示す。また上層部で拡散係数が小さく、下層部で大きいような土壌柱の場合には、そこで形成される CO_2 濃度分布形は上に凸形になることがわかった。このように、土壌内での CO_2 濃度分布形は、拡散係数に基づく土壌構造によって決まり、①上に凸、②直線状、③上部凹・下部凸の三つのパターンがあることがわかった。またハウス内での CO_2 濃度の日変化がある場合でも、土壌構造が変化しないかぎり、土壌内の CO_2 濃度分布のパターンは変わらないことも明らかにした。最後に、ハウス内 CO_2 濃度環境を調節するにさいして、土壌から発生する CO_2 量のとり方、すなわち CO_2 量を1日中一定とするか、あるいはハウス内 CO_2 濃度と土壌面での濃度との差に比例した量とするかで換気時間に差がでてくることもあることを明らかにした。

1979年4月14日受付

1. は し が き

土壌内での CO_2 濃度分布についての従来の研究によれば、深さ～濃度曲線で表わした分布形には三つのタイプがあることが報告されている。しかしその理由については必ずしも物理的には明らかにされていない。一方、筆者はすでに実験を通して、土壌内での一次元 CO_2 濃度分布を求めるシミュレーションの方法について明らかにしてきた²⁾。ここでは、はじめに土壌構造との関係で CO_2 濃度分布のパターンについてシミュレーションで明らかにし、さらに濃度分布パターンの日変化の解明へと論を進めていくことにした。

ハウス内 CO_2 濃度を一定以上に保つために、換気や CO_2 施肥の方法がとられているが、その他に、土壌から

の CO_2 発生も重要な役割を果している。これに関して、すでに筆者はシミュレーションによって明らかにしてきた³⁾。しかしその研究では、土壌面からの CO_2 発生量が一日中一定であると仮定しての結論であるが、 CO_2 発生量は、物理的にみると土壌表面の CO_2 濃度とハウス内 CO_2 濃度との差に比例することから、一定発生量とすることには問題がある。

ハウス内では換気による内外の空気交換、さらに作物が CO_2 を日中光合成で消費し、夜間呼吸で排出することによって、ハウス内 CO_2 濃度は日変化を生ずる。この日変化に伴って土壌面からの CO_2 発生量や土壌表面の CO_2 濃度の日変化がおこる。このハウス内 CO_2 濃度と土壌面からの CO_2 発生量の変化が、土壌の CO_2 濃度分布のパターンにどのような影響を与えるかをシミュレーションで明らかにしていくことにした。なお CO_2 環境に温度が関与することは明らかであるが、本研究では、既報^{2,3)}と同じく地温、気温とも一定とし、温度因子を捨象した。またハウス内 CO_2 濃度も均一であると仮定した。

Minoru ITO*: Studies on the Gaseous Environment in Soil (4). The Distribution of CO_2 Concentration in a Soil and Its Diurnal Change.

* Faculty of Agriculture, Iwate University, Morioka 020, Japan.

2. シミュレーションの方法

ハウス内の CO_2 濃度の時間的変化を求める式はつぎのように書ける。

$$V \frac{dC_h}{dt} = Q(C_{out} - C_h) + S_{CO_2} \cdot A_s + R_p \cdot A_L - P_p(I, C_h) \cdot A_L \quad (1)$$

つぎに、土壌内 CO_2 の濃度の時間的変化を求める関係式はつぎのとおりである。

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(x) \frac{\partial C_s}{\partial x} \right) + P_{CO_2} \quad (2)$$

上式を解くための土壌表面 ($x=0$) および深部 ($x=l$) での境界条件は

$$D(x) \frac{dC_s}{dx} = -H_{sf}(C_{sf} - C_{out}) \quad x=0 \quad (3)$$

$$D(x) \frac{dC_s}{dx} = -F \quad x=l \quad (4)$$

が成立つ。ただし、 V : ハウスの容積(m^3)、 Q : 換気量(m^3/hr)、 C_h , C_s , C_{sf} , C_{out} : ハウス内、土壌内、土壌面および外気の CO_2 濃度(mgCO_2/m^3)、 S_{CO_2} , P_{CO_2} : 土壌単位表面積および単位体積当り発生する CO_2 量($\text{mgCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$, $\text{mgCO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$)、 R_p : 作物の夜間呼吸量(mgCO_2/m^2 (葉面積) $\cdot \text{hr}$)、 $P_p(I, C_h)$: 作物の光合成速度(mgCO_2/m^2 (葉面積) $\cdot \text{hr}$)、 I : 光強度(lux)、 $D(x)$: 土壌の CO_2 拡散係数(m^2/hr)、 H_{sf} : 土壌表面での CO_2 拡散速度(m/hr)、 F : 土壌深部への CO_2 流出($\text{mgCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)、本研究の場合有底として $F=0$ とする、 A_s , A_L : 土壌および作物葉の面積(m^2)。

(1) 式の右辺の第 1 項はハウス内に新鮮空気によって補給される CO_2 量である。第 2 項は土壌表面から発生する CO_2 量で、土壌表面とハウス内の CO_2 濃度差に比例した量で、 S_{CO_2} は (3) 式を用いて

$$S_{CO_2} = H_{sf}(C_{sf} - C_h) \quad (5)$$

と表わせる。第 4 項は光合成の項で、このうち $P_p(I, C_h)$ は次式を用いることにした。

$$P_p(I, C_h) = K_2(I)[1 - e^{-K_1(I)(C_h - C_c)}] \quad (6)$$

ただし、 C_c : CO_2 補償点

なおこの(6)式や式中に含まれているパラメータ K_1 および K_2 についてはすでに明らかにした⁹⁾。(1)式の計算は時間刻み 1 分とし、第 4 次の Runge-Kutter 法で行った。

土壌内の CO_2 濃度はハウス内 CO_2 濃度と対応することから、(1)式でハウス濃度が決定された後、(2), (3) および (4) 式からの差分形式を用いて Gauss の消去法によって土壌内の各深さでの CO_2 濃度を算出した。この計算での時間刻みも 1 分間隔である。

土壌内 CO_2 濃度分布のパターンは土壌構造、すなわ

ち拡散係数によってもたらされていることから、この拡散係数の値はつぎのようにした。前報²⁾での実験でみたように、土壌内の O_2 の拡散係数は、通気係数が大になるにつれて、一定の大きさにとどまっていることから、この値に相当する CO_2 拡散係数として $0.034 (\text{m}^2/\text{hr})$ を最大値にとることにした。つぎに、先の実験^{3,4)}での O_2 拡散係数 D_{O_2} として $0.01 (\text{cm}^2/\text{sec})$ 以下の試料を求めることは困難であったことから、また、仮りに、 $D_{O_2}/D_{O_2,A} = 0.668\epsilon$ (ただし $D_{O_2,A}$: 自由大気における O_2 の拡散係数、 ϵ : 空気率) の式⁹⁾ が成り立つとして、 $D_{O_2} \leq 0.01 (\text{cm}^2/\text{sec})$ をうるには $\epsilon \leq 0.07$ 以下でなければならない。そのような土壌を畑状態で見出すことは特殊な条件下ということになる。それ故、土壌内での O_2 の最小拡散係数としての $0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$ に対応する数値より幾分小さな数値である $0.0026 \text{ m}^2/\text{hr}$ を CO_2 拡散係数の最小値とした。土壌としては前報²⁾での円筒容器内土壌を対象とし、その各層の拡散係数がこの最大値と最小値との範囲内で変化するとき、土壌内に生ずる CO_2 濃度分布のパターンをシミュレーションで求めることにした。それには (1) 式での右辺の第 3 項、第 4 項は 0 であり、(5) 式での H_{sf} は $0.36 \text{ m}/\text{hr}$ とした。

つぎに、ハウス内に作物があり、日中光合成・夜間呼吸をしている過程で土壌内に形成された CO_2 濃度分布のパターンがどのように変化していくかをシミュレーションで求めた。この場合、根系を含めての土壌内 CO_2 濃度分布のパターンは、根系からの CO_2 発生量について不明であるため、今後の検討にまたなければならないが、ここでは畝間の、いわゆる根系の入らない、土壌でかつ一次元の CO_2 濃度分布のパターン変化を求めることにした。なお作物としては既報と同じ大豆を対象にし、必要な定数、条件なども同一にした。なおハウス内や土壌面上での風速など考慮していないので、 H_{sf} として既往の結果⁹⁾より小さな $36 \text{ m}/\text{hr}$ をとることにした。

3. 土壌構造と CO_2 濃度分布形との関係

3-1. 下層から上層へしだいに拡散係数の低下が拡がっていく場合

Fig. 1-a の ●印であらわされるような、土層全体が拡散係数の最大値で一定であるような場合、土壌からの CO_2 発生量 P_{CO_2} が $2.1 \text{ g}/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$ 一定であるとした時に形成される土壌内 CO_2 濃度分布は Fig. 1-b での ●印のようになる。このような土壌が下層から、たとえば地下水位上昇などに伴って、拡散係数の低下が上層へ拡がっていく場合、すなわち土壌の拡散係数の分布が Fig. 1-a での $\Delta \rightarrow \times \rightarrow \square \rightarrow \nabla$ へと推移していくと、それぞれに対

Fig. 1-a Relations between the CO₂ diffusion coefficient, $D(x)$ and depth, x .
The process of $D(x)$, gradually decreasing from the lower to upper layers, is shown as ●→△→×→□→▽→○.

Fig. 1-b Distributions of CO₂ concentration $C_s(x)$ in various soils having the $D(x)$ shown in Fig. 1-a.
Symbols are the same as in Fig. 1-a.

応して形成される CO₂ 濃度分布は Fig. 1-b での △, ×, □, ▽ のパターンを形づくる。そして最後に最小拡散係数の均一な土層の CO₂ 濃度分布(○)となる。

均一な拡散係数の土層では CO₂ 濃度分布は上に凸形を形成する。しかし下層に向って拡散係数がしだいに低下するような場合には CO₂ 濃度分布形は直線状になる。さらに下層部から最小拡散係数の層が厚くなるにつれて、拡散係数の大きい上層部での CO₂ 濃度分布形は上に凹の形であるが、下層での CO₂ 濃度分布形は最小拡散係数均一層での同じ層厚の下端部に類似してくることがわかる。これらの結果の逆順は、たとえば上層から乾燥していくような過程である、上層から下層へしだいに拡散係数が大きくなる場合に相当する。

3-2. 上層から下層へしだいに拡散係数の低下が拡がっていく場合

土層全体が最大拡散係数からなる均一な状態にあったものが、たとえば灌水によって、上層で拡散係数の低下が生じた時に、土壌内での CO₂ 濃度分布がどのようになるかのシミュレーションを行った。

上層から下層への拡散係数の低下の拡がりの形式を Fig. 2-a の ●→△→×→□→▽→○ のように推移するとした。これらの土壌からの CO₂ 発生量を 3-1 と同じく $P_{CO_2} = 2.1 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$ としたとき、それぞれの土壌内 CO₂ 濃度分布は Fig. 2-b のようになった。

これをみると、上層の土壌が最大の拡散係数から、たとえば灌水などで、最小の拡散係数に低下すると、その

Fig. 2-a Relations between the CO₂ diffusion coefficient, $D(x)$ and depth, x .
The process of $D(x)$, gradually decreasing from the upper to lower layers, is shown as ●→△→×→□→▽→○.

Fig. 2-b Distributions of CO₂ concentrations $C_s(x)$ in various soils having the $D(x)$ shown in Fig. 2-a.
Symbols are the same as in Fig. 2-a.

Fig. 3-a, 3-b Relations between the relative CO_2 concentration, $RC(x)$ and depth, x .
Three distinct distribution patterns for the CO_2 concentration are evident:
1) convex, 2) straight, 3) convex following concave.
Symbols in a and b are the same as those in Fig. 1-a and 1-b, respectively.

ときの土壌内の CO_2 濃度分布形は上層部では最小拡散係数均一土壌での CO_2 濃度分布形と同じになる。つぎにそれ以下の層では、そこでの拡散係数の大きさによるが、下層部に近づくにつれて、最大拡散係数均一土壌の CO_2 濃度分布形に類似してくることがわかる。この上層から下層へしだいに拡散係数の低下が拡がっていく過程では、 CO_2 濃度分布形はいずれも上に凸になっている。

土壌内の CO_2 濃度分布形の表現として、相対 CO_2 濃度分布 $RC(x)$ で行うことについてすでに述べた²⁾が、ここでも 3-1 および 3-2 の結果について $RC(x)$ で表わすと Fig. 3-a および Fig. 3-b となる。

これをみると、土壌構造の変化に伴って、 CO_2 濃度分布形の変化の推移をとらえることはできにくい、分布形が上に凸、凹あるいは直線的なものなどの関係をよりはっきりとらえることができる。

4. ハウス内土壌の CO_2 濃度分布の日変化

土壌が最大拡散係数の均一層からなっている、ハウス内での地上、地下部の CO_2 濃度および土壌表面からの CO_2 発生量の日変化をシミュレーションした結果が Fig. 4 に示してある。

これをみると、ハウス内の地上部の CO_2 濃度と土壌表面の CO_2 濃度とはその日変化は同形であるが、地中深くになるにつれてそこでの CO_2 濃度の日変化はハウス内 CO_2 濃度の形からしだいにくずれ、また日変化の振幅も小さくなっていく。これを午前 0 時、6 時、12 時での相対 CO_2 濃度 $RC(x)$ でみたのが Fig. 5 である。

ハウス内の CO_2 濃度は、Fig. 4 でみられるように、日中小さく、夜間大きいのに対し、土壌末端部での CO_2

Fig. 4 Diurnal changes in CO_2 concentration in the greenhouse, C_h , amount of CO_2 generated from the soil surface, S_{CO_2} , and the CO_2 concentrations in a soil (as for the homogeneous soil column shown as ● in Fig. 1-a).

濃度は大きくない上に、その振幅も小さいため、土壌表面での $RC(0)$ は日中 12 時では小さく、午前 6 時では大きな値となって変化している。

Fig. 5 Distributions of the relative CO_2 concentration, $RC(x)$, at 12 p.m. (Δ), 6 a.m. ($\square$), and 12 a.m. ($\circ$) for the soil shown in Fig. 4.

The distribution of the CO_2 concentration keeps a convex curve at any time.

$RC(0)$ が日変化する理由は末端部濃度が表面濃度に対してそれほど大きくない、つまり、土壤全体の拡散係数が大きい場合に相当する。これに対して土壤全体の拡散係数が小さければ、 $RC(0)$ の日変化も小さくなる。いずれにしても、 $RC(0)$ の日変化に大小があっても、その分布形は土壤均一層としての形のもので、Fig. 3-a および Fig. 3-b のような、他の土壤構造の分布形に変わるような変化はしていないことがわかる。土壤構造を変えた場合も同じことが Fig. 6 からいえる。

以上の結果から、土壤内での CO_2 濃度の分布形が土壤構造によって決まることから、日変化のある場合でもその分布パターンには変化が生じないといえる。

ハウス内 CO_2 環境を換気で制御する時、既報³⁾ では、土壌面からの CO_2 発生量を一日中一定として必要換気時間を算出した。しかし、すでに述べたように、土壌面からの CO_2 発生量は(5)式で起ることから、 CO_2 発生量を一定として換気時間を算出することは物理的には正しくない。土壌面からの CO_2 発生量は、Fig. 4 でわかるように、夜間では平均値よりも小さく、日中は大きいといった現象になっている。この CO_2 発生量に変化がある場合(II)と、その日平均値で一定発生量とする場合(I)とでの、必要換気時間を算出した結果 Table 1 のようになった。

ハウス内への CO_2 補給量は土壌面からの CO_2 量と換気率に比例した量との和である。この量が少ない場合には、ハウス内 CO_2 環境を保持するために、8 時間以上も連続換気を行うことになる。このため、葉面積指数 2.0、

Fig. 6 Distributions of the relative CO_2 concentration, $RC(x)$, at 12 p.m. (Δ), 6 a.m. ($\square$) and 12 a.m. ($\circ$) for the soil shown as $\square$ in Fig. 1-a.

When compared with Fig. 5, it is clear that the distribution has the same form unless the soil structure changes.

換気率 10 回/時でみられるように、土壌面からの CO_2 発生量を一日中一定とした場合(I)と、(5)式をもとにした場合(II)とで求める換気時間には差がほとんどない。

CO_2 補給量が多い場合には、換気の on-off 動作が日中短時間間隔で行われる。このような場合も、葉面積指数 1.0、換気率 50 回/時でみられるように、I、II で求める換気時間にあまり差がない。ただ土壌面からの CO_2 発生量が大きくなると、(5)式に基づく土壌面からの CO_2 発生量は日中その日平均値よりも大きいため、IIの方が1回の換気時間は短くなり、それ故、1日の換気時間も幾分短くなる。

葉面積指数に対して CO_2 補給量が多くない場合には、すでに述べたように、日中連続換気をすることになるが、それでも土壌面からの CO_2 発生量がしだいに増加すると、(5)式に従って発生する CO_2 量は日中平均値以上になることから換気開始時刻の遅れや換気停止時刻が早まってくる。このために、たとえば葉面積指数 1.0、換気率 25 回/時、 CO_2 発生量 $802 \text{ mgCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ のように、IIの換気時間の方がIよりも短くなる。

CO_2 発生量がさらに増加すると、IIで求める換気時間には、日中換気の on-off 動作のサイクリングが生ずることから、1日の換気時間が短くなる。一方、一定発生量と仮定したIの場合には、日中連続換気となり、換気時間もそれに応じて長くなる。この結果、たとえば葉面積指数 1.0、換気率 10 回/時、 CO_2 発生量 $1532 \text{ mgCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ 以上のように、IIの換気時間の方がIよりもかなり短くなる。

Table 1 Ventilation hours required to control the CO₂ concentration in the greenhouse by an on-off action under the two ways of the adoption of S_{CO_2} .

Leaf area index	1.0						2.0					
Ventilation rate (Times/hr)	10		25		50		10		25		50	
Adoption of S_{CO_2} *	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
Constant or mean value (case of II) of S_{CO_2} (mgCO ₂ /m ² ·hr)	hr:m	hr:m	hr:m	hr:m	hr:m	hr:m	hr:m	hr:m	hr:m	hr:m	hr:m	hr:m
218	9:56	9:59	9:40	9:43	4:09	4:10	10:29	10:32	10:20	10:23	10:13	10:14
364	9:30	9:33	9:14	9:15	3:57	3:52	10:18	10:21	10:08	10:11	9:58	10:01
510	9:06	9:09	8:46	8:48	3:22	3:21	10:08	10:11	9:58	10:01	9:46	9:49
656	8:43	8:43	8:19	8:17	3:08	3:02	9:57	10:01	9:48	9:51	9:37	9:40
802	8:15	8:14	7:47	6:45	2:42	2:25	9:48	9:51	9:38	9:41	9:23	9:25
948	7:50	7:48	5:07	4:13	1:58	1:53	9:36	9:39	9:25	9:27	9:11	9:14
1094	7:21	7:15	3:41	3:17	1:40	1:32	9:25	9:28	9:16	9:18	8:58	9:01
1240	6:51	6:40	2:56	2:29	1:24	1:14	9:13	9:16	9:04	9:07	8:46	8:49
1386	6:21	6:01	2:18	1:52	1:10	0:56	9:03	9:06	8:54	8:57	8:33	8:28
1532	5:41	4:57	1:42	1:16	0:54	0:40	8:53	8:56	8:42	8:45	8:21	7:43
1678	5:04	2:24	1:12	0:48	0:38	0:26	8:43	8:45	8:31	8:31	8:05	6:03
1825	2:12	0:54	0:48	0:21	0:26	0:12	8:33	8:33	8:18	8:20	6:02	5:02

* I : S_{CO_2} , amount of CO₂ generated from the soil surface, constant during the whole day.

II : S_{CO_2} , proportional to the difference between the CO₂ concentrations in the greenhouse and in the soil surface.

以上みてきたように、ハウスへの CO₂ 補給量が少ないことによる連続換気の場合や、多いことによる換気の on-off 動作のサイクリングがある場合には、土壌面からの CO₂ 発生量を一定と考えるか、(5)式に従うかによる、換気時間には差がない。しかし、補給量がこの中間の場合には、(5)式をもとにして算出する換気時間の方が短くなることがわかった。このことから、十分な土壌管理を行うことによって、土壌からの CO₂ をハウス内 CO₂ 環境に寄与させ、強いては換気回数減に伴うエネルギー節約へとつながっていくことになる。

5. むすび

土壌内での CO₂ 濃度分布形のパターンをシミュレーションで求めてきた。その結果、土壌構造と CO₂ 濃度分布形との関係が明らかになり、従来の現象的な諸報告に対して、物理的な意味づけが可能となった。また土壌構造によって決定された CO₂ 濃度分布形は地上部の CO₂ 濃度の日変化があっても、そのパターンは土壌構造に変化がないかぎり不変で、他の土壌構造の CO₂ 濃度分布形に変換しないことも明らかにした。そして、ハウス内の CO₂ 濃度の日変化に対応して、土壌から発生する CO₂

による施設栽培での省エネルギー化も可能となるであろう。

おわりに、本研究での計算は東北大学大型計算機を使用したことを付記する。

文 献

- 1) 梅林正直. 1972. 施設栽培における土壌空気について. 土壌の物理性 **26**: 38-46.
- 2) 伊藤 実. 1979. 土壌の気相環境の研究 (3). 土壌内一次元 CO₂ 濃度分布のシミュレーション. 生物環境調節 **17**: 35-40.
- 3) 伊藤 実. 1977. 土壌の気相環境の研究 (2). 土壌からの CO₂ 発生がハウス内 CO₂ 環境に与える影響について—大豆の光合成速度を用いて—. 生物環境調節 **15**: 79-88.
- 4) 伊藤 実. 1976. 土壌の気相環境の研究 (1). 土壌の気体拡散係数と通気係数との関係について. 生物環境調節 **14**: 99-106.
- 5) TAYLOR, S. A. 1972. "Physical Edaphology" 352-390, W. H. Freeman and Company, San Francisco.
- 6) 内嶋善兵衛・井上君夫. 1970. 作物群落内におけるエネルギーとガス交換に関する研究 (9).—群落内の炭酸ガス環境のシミュレーション. 農業気象 **26**: 5-18.

Summary

The relation between the distributions of the CO₂ concentration in soils and soil structures, as defined by CO₂ diffusion coefficient, was investigated. Changes in the distribution when the CO₂ concentration in a greenhouse had a diurnal variation also were investigated.

In the soil column in which the CO₂ diffusion coefficient was constant, the pattern of distribution expressing the relation between the CO₂ concentration and depth was an upward convex curve.

In the soil column in which the diffusion coefficient decreased with depth, the CO₂ concentration formed a distribution pattern that increased linearly with depth.

In the soil column in which the lower layers with a small diffusion coefficient became thicker and upper layers with a larger coefficient topped on

them, the pattern was a concave in the upper and convex in the lower layer.

In the soil column which had a smaller coefficient in the upper layers and a larger coefficient in the lower ones, the pattern was an upward convex curve.

Three distinct patterns were formed in soil structures defined by the diffusion coefficient: 1) convex upward, 2) straight, 3) concave in the upper layer and convex in the lower layer.

These patterns did not vary unless the soil structures changed, even when the CO₂ concentration in a greenhouse changed diurnally.

The required ventilation hours to maintain the CO₂ concentration in a greenhouse differed depending upon whether the amounts of CO₂ generated from soil surface were constant during the whole day or were proportional to the difference between the CO₂ concentrations in the greenhouse and in the soil surface.

(Received April 14, 1979)