

チャンバー法によるガス交換速度の測定

渋谷俊夫

1. チャンバー法の基本的な考え方

チャンバー法とは、チャンバー（小さな部屋）の中に植物を入れて、植物のガス交換によってどれくらいチャンバー内のガス濃度が変化したかを手がかりにしてガス交換速度を求める方法である。まず、密閉されたチャンバーに植物を入れた場合を考える。図1は密閉チャンバー内において植物があるガス成分を吸収しているときのガス濃度の時間変化を概念的に示したものである。植物がガス成分を吸収することによって、ガス濃度は時間の経過にともなって減少する。チャンバー内外ではガス交換はおこなわれていないので、チャンバー内におけるガス成分の減少速度は植物のガス交換速度（ここでは吸収側を正と考える）と等しいと考えることができる。このチャンバーのように外部との物質やエネルギーの交換がおこなわれていないシステムを閉鎖系といい、この原理によってガス交換速度を求める方法を閉鎖式チャンバー法という。

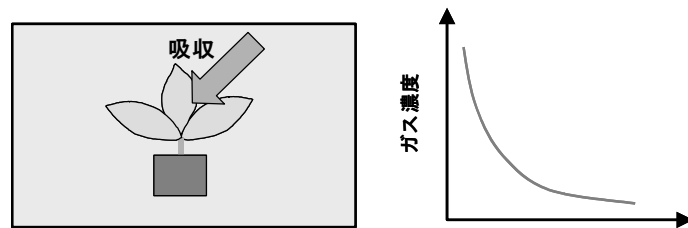


図1 密閉チャンバーに植物を入れた場合のガス濃度変化の概念図

チャンバーが密閉でなく通気している場合（開放系）でも、チャンバー内外のガスの流入出速度を十分に把握できていれば、チャンバー内の植物のガス交換速度を求めることができる。たとえば図2のように、チャンバーに空気の流入口と流出口があり、チャンバー内で植物がガス成分を吸収しているとき、ガス流出量はガス流入量よりも小さくなる。このとき、ガス成分の流出速度と流入速度との差を植物のガス交換速度と考えることができる。ただし、このときチャンバー内のガス濃度は定常状態（物理量が時間によって変化せず一定に保たれる状態）である必要があり、非定常状態の場合はチャンバー内におけるガス成分量の時間的な変動を考慮しなければならない。

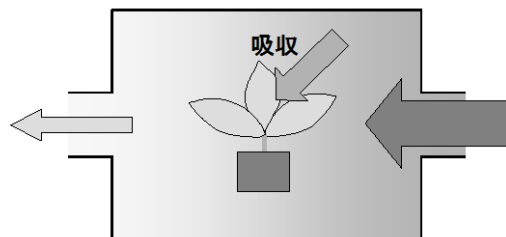


図2 開放式チャンバー法の概念図

以上をまとめると、チャンバーのガス収支は次式のように表すことができる。

$$\text{【ガス交換速度】} = \text{【ガス流入速度】} - \text{【ガス流出速度】} + \text{【チャンバー内でのガス減少速度】}$$

① ② ③ ④

完全閉鎖の場合は、②と③はゼロとなり、①＝④、すなわち、

$$\text{【ガス交換速度】} = \text{【チャンバー内でのガス減少速度】}$$

となる。

定常状態の場合は、④はゼロとなり、①＝②－③、すなわち、

$$\text{【ガス交換速度】} = \text{【ガス流入速度】} - \text{【ガス流出速度】}$$

となる。

チャンバー法でガス交換速度を計測するとき、それぞれの仮定が正しいかを十分確認する必要がある。例えば、完全閉鎖と仮定しているときに②と③はゼロであるのか、定常状態と仮定しているときに④はゼロであるのか、ガスの流入出が流入出口以外の場所でおこっていないかなどが考えられる。

ここから先は具体的なチャンバー法を用いたガス交換速度の計測方法について解説する。この実習では植物の蒸散および光合成によるCO₂吸収を中心に述べるが、チャンバー方法の考え方は、植物による汚染ガス吸収や土壌呼吸速度の計測など、さまざまな分野に応用できる手法である。

2. 閉鎖式チャンバー法によるCO₂交換速度の計測

図3は閉鎖チャンバー内において植物があるガス成分を吸収しているときのガス濃度の時間変化を概念的に示したものである。植物がガス成分を吸収することによって、ガス濃度は時間の経過とともに減少していく。チャンバー内外ではガス交換はおこなわれていないので、チャンバー内におけるガス成分量の変化速度は植物のガス交換速度と等しいと考えることができる。すなわち、CO₂収支は次式のように表すことができ、植物のCO₂交換速度はチャンバー内におけるCO₂量の変化速度から求めることができる。

$$\text{[CO}_2\text{ 交換速度]} = \text{[チャンバー内における CO}_2\text{ 量の変化速度]}$$

(molCO₂ s⁻¹) (molCO₂ s⁻¹)

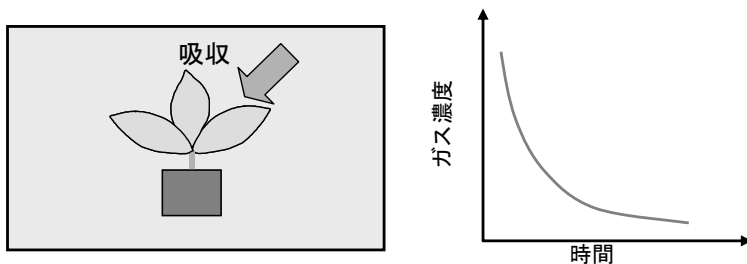


図3 閉鎖チャンバーに植物を入れた場合のガス濃度変化の概念図

チャンバー内における CO₂ 量 (molCO₂) は、チャンバー内の CO₂ 密度 (molCO₂ m⁻³) とチャンバー容積 (m³) との積から求めることができる。したがって、チャンバー内における CO₂ 量の時間変化、すなわち植物の CO₂ 交換速度は次式から求めることができる。なお、この場合に求めることのできるのは t₁ から t₂ にかけての平均の CO₂ 交換速度である。ある時点における CO₂ 交換速度を求める場合には、CO₂ 濃度の時間変化を指数関数で近似して、その曲線の微分係数を求める。

$$P_n = \frac{V \cdot C_1 - V \cdot C_2}{t_2 - t_1} \cdot \frac{1}{A}$$

$$= V \cdot \frac{C_1 - C_2}{t_2 - t_1} \cdot \frac{1}{A}$$

P_n : 葉面積あたりの植物の CO₂ 交換速度 (molCO₂ m⁻² s⁻¹)

C₁, C₂ : 時刻 t₁, t₂ におけるチャンバー内の CO₂ 密度 (molCO₂ m⁻³)

t₁, t₂ (t₁ < t₂) : 時刻 (s)

V : チャンバーの空気容積 (m³)

A : 植物の総葉面積 (m²)

一般の CO₂ 分析計は CO₂ 濃度 (μmol mol⁻¹=ppm) の値を出力するので、次式によって CO₂ 濃度から CO₂ 密度へ換算する必要がある。

$$\text{CO}_2 \text{ 密度 } (\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-3}) = \frac{\text{CO}_2 \text{ 濃度 } (\mu\text{mol mol}^{-1})}{\left(0.0224 \cdot \frac{273 + T}{273}\right) (\text{m}^3 \text{ mol}^{-1})}$$

T は気体の温度 (°C)

計測装置

計測装置の模式図を図 4 に示す。ガラス製容器をチャンバーとして用いる。チャンバー内に植物を設置し、赤外線式 CO₂ 分析計をチャンバー内に挿入する。赤外線式 CO₂ 分析計には空気のサンプリングが必要なものと必要でないものがあるが、この実験では空気のサンプリングが必要でない拡散式のタイプを用いる。空気をサンプリングする場合は、サンプリング空気を再び容器内に戻し、またサンプリング流路での空気の漏れを最小限にする必要がある。ファンを用いてチャンバー内の空気を攪拌する。これはこの計測法が、チャンバー内の CO₂ 濃度が均一であることを前提としているためである。温湿度センサをチャンバー内に設置する。容器と容器の蓋との隙間やセンサやファンのケーブルを入れる穴はパテを用いて密閉する。チャンバーの上に照明ランプを設置する。

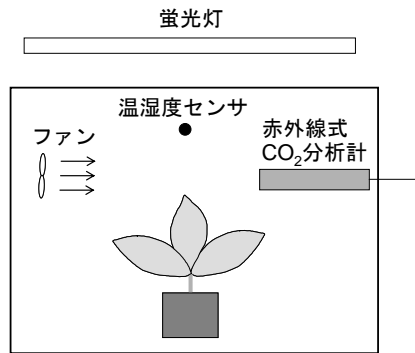


図4 閉鎖式チャンバー法によるCO₂交換速度の計測装置

計測項目

下記の項目を計測する。

- ・ チャンバー内のCO₂濃度 ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)
- ・ チャンバー内の気温 (°C) と相対湿度 (%) (各光強度でははじめとおわりだけでよい)

実験終了後に下記の項目を計測する。

- ・ 植物の葉面積 (m^2 、CO₂交換速度を葉面積あたりに換算するため)
- ・ チャンバーの容積 (m^3)
- ・ チャンバー内の光合成有効光量子密度 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

計測手順

- ・ 呼気によってチャンバー内CO₂濃度を $800 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 程度まで高める。
- ・ チャンバー内CO₂濃度の時間変化を10秒間隔で計測する。
- ・ チャンバー内CO₂濃度の時間変化からCO₂交換速度を算定する。
- ・

計測条件

- ・ 光強度3段階 (暗黒を含む、遮光カーテンやランプとチャンバーの距離によって調節する) で測定する。
光強度として、光合成有効光量子束密度 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) を測定する。
- ・ 各光強度において、CO₂濃度 $750\text{-}650 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 、 $400\text{-}300 \mu\text{mol mol}^{-1}$ でのCO₂交換速度を求める (図5)。
- ・ 暗黒条件のときは、CO₂濃度の増加速度から呼吸速度を求める。

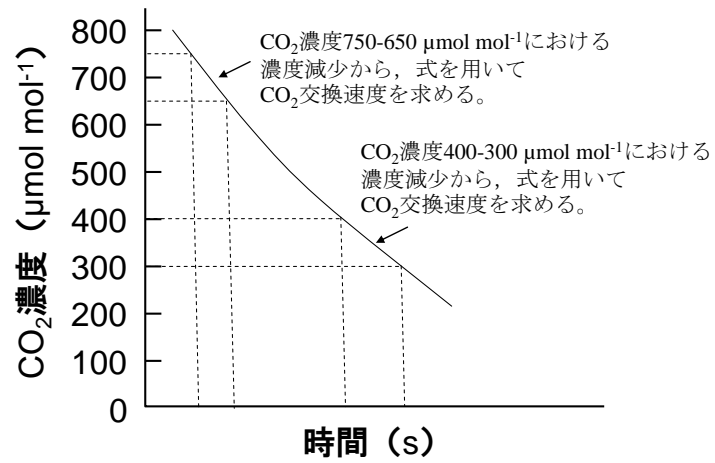


図5 それぞれの濃度でのCO₂交換速度の求め方

算定項目

上記の計測値から、各計測条件における葉面積あたりのCO₂交換速度 (molCO₂ m⁻² s⁻¹) を算定すること。この実験ではチャンバーは完全密閉と仮定する。

3. 開放式チャンバー法による CO₂ 交換速度の計測

図6のような開放式のチャンバーにおいて、植物が CO₂ を吸収しているとき、チャンバー内の CO₂ 収支は次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \text{【CO}_2\text{ 交換速度】} &= \text{【CO}_2\text{ 流入速度】} - \text{【CO}_2\text{ 流出速度】} + \text{【チャンバー内における CO}_2\text{ 減少速度】} \\ (\text{molCO}_2\text{ s}^{-1}) & \quad (\text{molCO}_2\text{ s}^{-1}) \quad (\text{molCO}_2\text{ s}^{-1}) \quad (\text{molCO}_2\text{ s}^{-1}) \\ \text{①} & \quad \quad \quad \text{②} \quad \quad \quad \text{③} \quad \quad \quad \text{④} \end{aligned}$$

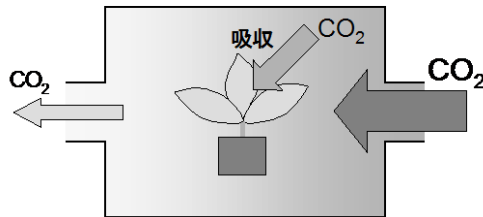


図6 開放式チャンバーにおける CO₂ 収支の概念図

ここで、チャンバー内の CO₂ 濃度が定常状態の場合は、④はゼロとなり、CO₂ 収支は次式のようになる。

$$\begin{aligned} \text{【CO}_2\text{ 交換速度】} &= \text{【CO}_2\text{ 流入速度】} - \text{【CO}_2\text{ 流出速度】} \\ (\text{molCO}_2\text{ s}^{-1}) & \quad (\text{molCO}_2\text{ s}^{-1}) \quad (\text{molCO}_2\text{ s}^{-1}) \\ \text{①} & \quad \quad \quad \text{②} \quad \quad \quad \text{③} \end{aligned}$$

CO₂ 流入速度(molCO₂ s⁻¹)は、流入口における CO₂ 密度 (molCO₂ m⁻³) と空気流量 (m³ s⁻¹) の積から、CO₂ 流出速度(molCO₂ s⁻¹)は、流出口における CO₂ 密度 (molCO₂ m⁻³) と空気流量 (m³ s⁻¹) の積からそれぞれ求めることができる。したがって、植物の CO₂ 吸収速度、すなわち CO₂ 交換速度は次式から求めることができる。

$$\begin{aligned} P_n &= v \cdot C_{in} - v \cdot C_{out} \\ &= v(C_{in} - C_{out}) \end{aligned}$$

P_n : CO₂ 交換速度 (molCO₂ s⁻¹)

C_{in} 、 C_{out} : 流入口および流出口におけるチャンバー内の CO₂ 密度 (molCO₂ m⁻³)

v : チャンバーに通気する空気流量 (m³ s⁻¹)

一般の CO₂ 分析計は CO₂ 濃度 (μmol mol⁻¹=ppm) を計測するので、次式によって CO₂ 濃度から CO₂ 密度へ換算する必要がある。

$$\text{CO}_2\text{ 密度} \quad (\mu\text{molCO}_2\text{ m}^{-3}) = \frac{\text{CO}_2\text{ 濃度} \quad (\mu\text{mol mol}^{-1})}{\left(0.0224 \cdot \frac{273+T}{273}\right) \quad (\text{m}^3\text{ mol}^{-1})}$$

T は気体の温度(°C)

計測装置

計測装置の模式図を図7に示す。ガラス製容器をチャンバーとして用いる。チャンバー内に植物を設置する。ポンプを用いて容器内に空気を送る。空気流量は流量調節器を用いて調節する。流入口と流出口の空気をサンプリングして、赤外線式 $\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 分析計に送る。流入口と流出口のサンプリングの切換には流路切換器を用いる。サンプリングにはポンプを用い、流量調節器を用いてサンプリング流量を調節する。ファンを用いてチャンバー内の空気を攪拌する。温湿度センサをチャンバー内に設置する。容器の蓋とセンサやファンのケーブルを入れる穴はパテで密閉する。

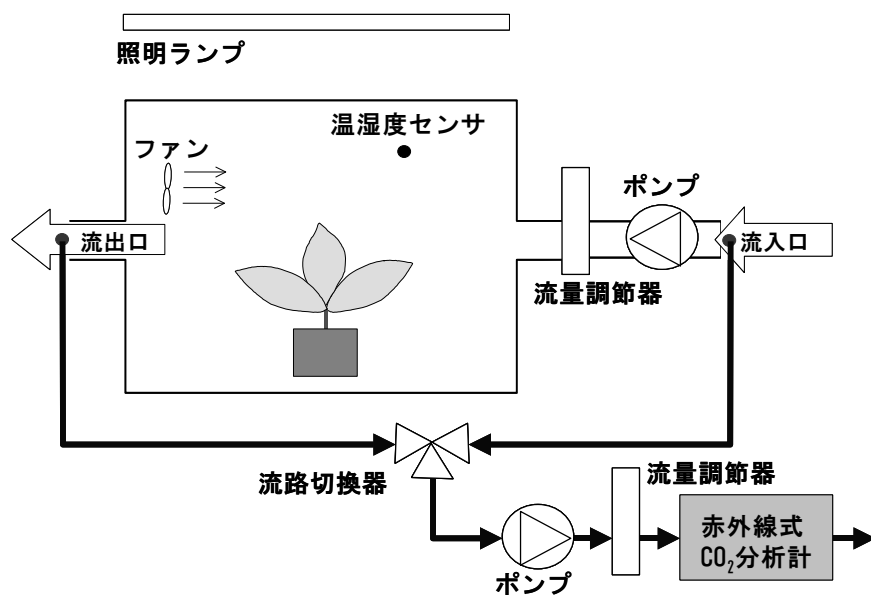


図7 開放式チャンバー法による CO_2 交換速度速度計測装置の模式図

計測項目

下記の項目を計測・記録する。

- 流入口の CO_2 濃度
- 流出口の CO_2 濃度
- チャンバー内の気温および相対湿度
- 流量

各条件下記の項目を計測する。

- チャンバー内光合成有効光量子束密度

実験終了後に下記の項目を計測する。

- 植物の葉面積 (CO_2 交換速度を葉面積あたりに換算するため)

計測手順

- ・ 流量切換器を用いて、流入口および流出口の空気を1分間隔で交互にサンプリングする。ガス分析計の指示が安定してからガス分析計の指示値を読み取る。
- ・ 流入口および流出口のCO₂濃度差が30~50 μmol mol⁻¹程度になるように流量を調節する。流量は必ず記録すること。
- ・ 流入口および流出口のCO₂濃度差が定常になるまでサンプリングを交互に繰り返す。
- ・ 安定後10分間1分ごとにCO₂濃度を記録する。
- ・ 流入口および流出口のCO₂濃度差と流量からCO₂交換速度を算定する。

計測条件

- ・ 光強度4段階（暗黒を含む、遮光カーテンやランプとチャンバーの距離によって調節する）
- ・ 閉鎖式でも測定を行う。

算定項目

上記の計測値から、各計測条件における下記の項目を算定すること。

- ・ 葉面積あたりのCO₂交換速度 (molCO₂ m⁻² s⁻¹)

5. レポート

計測原理・計測方法を分かりやすく正確に記述すること。材料や測器、植物育成方法なども詳細に記載すること。このテキストに書いてある内容を写すだけでは不十分である。結果は図や表にまとめ、そこから読みとれることを文章で説明すること。図や表は何を伝えたいのかをよく考えて作成すること。単位は正確に記述すること。下記の内容について算定・考察すること。他の項目について考察しても構わない。

計測結果の妥当性の検討

測定データを他の文献のCO₂交換速度と比較して、今回の計測結果の妥当性を検討してください。

開放式チャンバー法と閉鎖式チャンバー法の違い

開放式チャンバー法と閉鎖式チャンバー法を比較して、それぞれの特徴を具体的に述べて下さい。

6. 参考図書

- ・ 「農業環境実験法」、渡部一郎編、サイエンスハウス、1987年、3,600円
- ・ 「新訂農業気象の測器と測定法」、日本農業気象学会編、農業技術協会、1997年、4,300円
- ・ 「植物の生産過程測定法」、牛島忠広・古川昭雄・米山忠克 共立出版、1981年、2,700円