

収量予測・情報処理・環境

バッファーチャンバー方式ガス収支測定法の検証と装置の設計指針

小田正人

(国際農林水産業研究センター)

要旨：バッファーチャンバー法は、閉鎖式チャンバーを測定チャンバーとバッファーに分割し、ガスを循環させ、バッファーのガス濃度変化を測定するガス収支測定法である。センサーの応答速度や測定物のガス放出速度に合わせた測定時間の調整が可能のため、幅広い対象を高精度に測定できるとされる。しかしながら、バッファーチャンバー法には測定チャンバーとバッファーのガス濃度に応答ラグが生じるという構造上の問題がある。そこで、センサーの応答ラグ、バッファーおよびチャンバーのガス濃度変化を、ガスの置換過程として記述した数理モデルを用い、バッファー容積のチャンバー容積に対する倍率（バッファー倍率）、チャンバー内のガスの1秒当りの置換率（置換率）を変化させて、測定装置の応答特性を調べた。その結果、測定時間の調整機能が發揮されるためには、バッファー倍率に見合った置換率が必要であることが分かった。また、実際に測定装置を作成し、作物の光合成を測定することによりその性能を検証し、装置の設計指針を作成した。

キーワード：光合成蒸散、チャンバー法、土壌呼吸。

近年、地球温暖化関連研究の高まりとともに、土壌呼吸や光合成蒸散測定が盛んに行われている。しかし市販の研究用測定装置を見渡すと、まだまだ高額であり、メンテナンス要求性も高く、測定対象が限られるなどの課題があり、こうしたことが研究の足かせとなっていることは否めない。このような問題に対し、安価でメンテナンスフリーの民生用ガスセンサーを活用した、測定対象の広い新しい閉鎖式チャンバー法として「バッファーチャンバー方式ガス収支測定法」が提案されている（注：特許第3968728号）。

バッファーチャンバー方式ガス収支測定法は、閉鎖式チャンバーを測定物格納チャンバー（以下チャンバー）とバッファーに分割し、双方内部のガスを循環させバッファー内のガス濃度の変化を測定する方法である（第1図）。チャンバー内部のガスは強制吸排気によって、全体が換気される。他方、バッファー内のガスは測定物が無いため、測定物に影響を与えることなくファンにより均一に攪拌し濃度ムラを解消出来る。閉鎖式のため、外気の影響はなく、かつ測定開始時に外気を取り入れることにより自然環境に近い条件での測定が可能である。バッファーチャンバー法は循環方式のため、原理的に気圧差は生じないことから、装置の気密要求性も低い。また、測定時間はバッファーのサイズにより調節できるため、測定操作に十分な時間をとることが出来る。例えば光合成蒸散測定は、チャンバー内の気体の濃度ムラを抑えるためにチャンバーを小さくすることが推奨されるが、チャンバーを小さくすると蒸散による湿度の上昇速度が大きくなり短時間で結露を生じてしまうため測定が難しかった。しかし、バッファーを設けるとチャンバーのガス濃度変化を低減できることから

光合成蒸散測定も可能となる。また、測定時間は、センサーの応答速度に合わせることが出来る。つまり、安価な民生用の室内空気環境測定センサーを使って高精度の測定が可能となる。このとき、チャンバーとバッファーの比率を維持したままでチャンバーおよびバッファーを拡大縮小することにより、例えば光合成測定であれば葉の一部から個葉、作物個体ないしは群落に至るまで、柔軟に対応することができる。

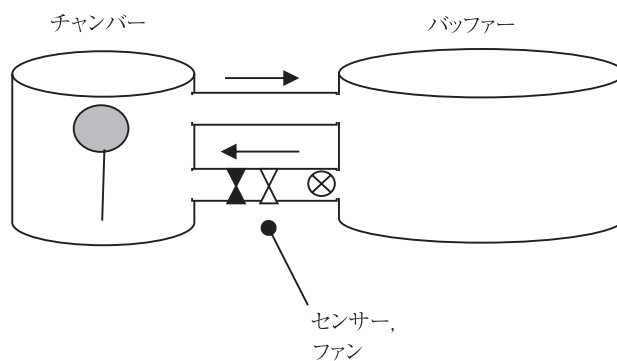
しかしながら、バッファーチャンバー法について詳しく検証した文献は見あたらないことから、その測定原理を理論的、実証的に検証することとした。

材料と方法

1. 試験 I 数理モデルによる理論的解析

(1) 数理モデル

一般にセンサーには応答ラグがある。これに加え、バッ



第1図 バッファーチャンバーの構造。

ファーチンバー法では、測定物を格納したチャンバーのガス濃度変化に対しバッファのガス濃度変化にも応答ラグが生じている。そこでこれらの応答ラグが測定条件によってどのような変化を見せるのかを数理モデルにより解析した。

まず、センサーの表示値であるが、検証に使用した後述の装置のCO₂センサー (TESTO 435-2) は、測定値を安定させる機構として測定プローブ内の空気がスリッドを通して徐々に外気と交換される構造になっており、これが応答ラグを規定している。この方式は拡散サンプリング方式と呼ばれ、各種ガスセンサーに広く採用されているものである。その応答特性は一般に次の式で表される。

$$\frac{da(t)}{dt} = c(b - a(t)) \quad (1)$$

したがって、

$$a(t) = b - (b - a(0))e^{-ct} \quad (2)$$

a: プローブ内の測定対象ガス濃度 (センサーの表示値),
b: 外気の測定対象ガス濃度, c: 置換率 (プローブ内の空気の1秒当りの置換率), e: 自然対数の底

つぎにチャンバーおよびバッファの測定対象ガス濃度については、チャンバー・バッファ共に内部のガスは常時均一で、チャンバーの測定対象ガス濃度が変化する都度、その一定割合が置換されるものとして扱い、つぎの連立微分方程式により表した。

$$\frac{da_c}{dt} = c_c(a_b - a_c) + b_c \quad (3)$$

$$\frac{da_b}{dt} = \frac{c_c}{D}(a_c - a_b) \quad (4)$$

a_c: チャンバーの測定対象ガス濃度, a_b: バッファの測定対象ガス濃度, b_c: 対象物の呼吸や光合成によるチャンバーの測定対象ガス濃度変化量, c_c: チャンバー内のガスの1秒当りの置換率, D: バッファ倍率 (チャンバー容積に対するバッファ容積 (0<))

この連立微分方程式を数値的に以下の式によって計算した。

$$a_c(t + \Delta t) = a_c(t) + \{c_c(a_b(t) - a_c(t)) + b_c\} \Delta t \quad (5)$$

$$a_b(t + \Delta t) = a_b(t) + \left\{ \frac{c_c}{D}(a_c(t) - a_b(t)) \right\} \Delta t \quad (6)$$

なお、数値計算では、系の時定数の1/10以下の計算間隔が望まれることから、置換率1でも十分な精度が得られるよう $\Delta t = 0.1$ で計算した。ただし、後述のチャンバーのガス濃度変化低減効果だけは、置換率10まで計算する必要があったため、 $\Delta t = 0.01$ で計算した。

センサーの表示値は、式 (1) において外気 $b = a_b(t)$ とすることにより、次式で表される。

$$a(t + \Delta t) = a_c(t) + \{c(a_b(t) - a(t))\} \Delta t \quad (7)$$

なお、閉鎖式チャンバーは $c_c = 0$, $b = a_c(t)$ として、チャンバー内にセンサーがあるものとして計算した。

(2) 検討条件および検討項目

検討条件は光合成測定を想定し、CO₂ 初期濃度を 350 $\mu\text{L L}^{-1}$, CO₂ 減少速度を毎分 35 $\mu\text{L L}^{-1}$, 測定操作手順は「120 秒間測定→測定対象取出し→120 秒間測定」として、バッファ倍率 (0~9999), チャンバーのガスの置換率 (0~1) をそれぞれ変化させて試算した。

上記の条件の下、(1) 装置の表示値のずれの収束値, (2) チャンバーのガス濃度変化速度の影響, (3) バッファ倍率とチャンバーの置換率の影響, (4) チャンバーのガス濃度変化低減効果を検討した。加えて気密要求性の検証の観点から、(5) 外気混入の影響も検討した。

ここで、「チャンバーのガス濃度変化低減効果」に関して説明しておく。チャンバーのガス濃度変化低減効果は、例えばバッファ容積がチャンバー容積の2倍であればチャンバーのガス濃度変化速度は3分の1になるといったように、バッファ倍率+1に反比例するのが理想である。しかし、現実にはガスの置換に伴うずれが生じるため、バッファの倍率通りの効果は得られない。そこで、閉鎖式チャンバーに対するバッファチャンバー方式におけるチャンバーのガス濃度変化を「対閉鎖式ガス濃度変化率」として以下の式で定義し、「チャンバーのガス濃度変化低減効果」を検討した。「対閉鎖式ガス濃度変化率」はバッファ倍率1から255のケースについて、置換率0.038 (センサーの置換率) から約10まで $\Delta t = 0.01$ s で計算した。

$$= \frac{\text{バッファチャンバー方式のチャンバーのガス濃度変化量}}{\text{通常の閉鎖式チャンバーのガス濃度変化量}} \quad (8)$$

ただし、計算はセンサーの99%応答時間における値を用いた。

2. 試験 II 測定装置による検証

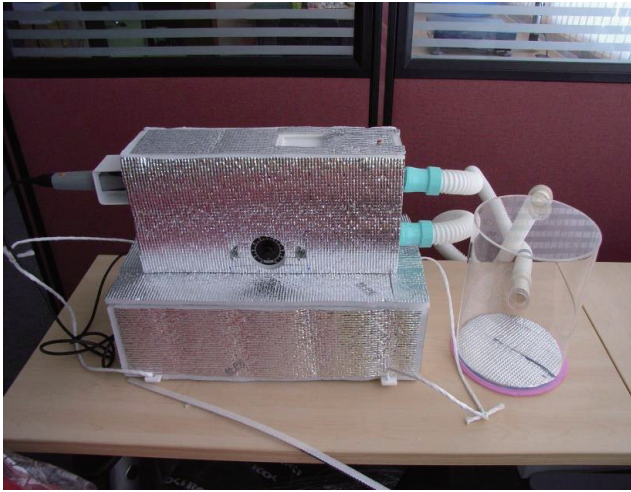
(1) 装置の構成

チャンバー: 6 L (高さ 23.6 cm, 直径 18 cm, 透明アクリル性), バッファ: 26 L (本体, パイプ等を含むチャンバー以外の全空間), パイプ内径: 30 mm, チャンバー置換率 0.32 s⁻¹, センサー: TESTO 435-2 (Testo AG 社, Lenzkirch, 室内環境測定用センサー; CO₂, H₂O 各 90% 応答時間 60 秒および 20 秒, 分解能 1 ppm および 0.1%) で装置を構成した (第2図)。

なお、90%応答時間を時定数で表現する場合、0.4343 を乗ずればよく、本装置のセンサーの時定数は CO₂, H₂O 各 26.058 秒, 8.686 秒となる。

(2) 装置の検定方法

「注射器で 2 mL の純 CO₂ ガスを 1 分間かけて注入→1 分間静置」の操作を 4 回繰り返し、センサーの表示値と注入量を比較して、装置の測定精度を検定した。また、数理モデルによる計算値をセンサーの表示値と比較して、装置の応答を正しく表現できていることを確認した。なお、注射器のピストンは万力を用いて一定速度で押し込んだ。



第2図 バッファーチャンバー光合成蒸散測定装置。



第3図 光合成蒸散測定の様子。

(3) 測定例

測定は2006年9月12日の7時52分～8時19分にかけて、石垣島にある国際農林水産業研究センター島嶼研究拠点において屋外で行った。供試作物は、チリトウガラシ、キュウリ、ナスで、高さ21 cm、口径21 cm 底径15 cm のポリポットで育成した(第3図)。供試作物の葉面積はチリトウガラシ、キュウリ、ナスそれぞれ222, 611, 407 cm²であった。なお、葉面積測定は光合成蒸散測定直後に葉を切り離し、青色ボードに並べてデジタルカメラで撮影した後、画像処理ソフトLIA32(山本一清, 2005)で面積を測定した。測定手順は、空の状態でも120秒間循環し、安定したところでファンを停止して測定物をチャンバーに入れ、10秒間隔で120秒間測定後ファンを停止して測定物を取り出し、さらに40秒間測定した。

光合成速度ならびに蒸散速度はそれぞれ下記の式により算出した。

$$A(t) = P_{CO_2}(t) - P_{CO_2}(t-1) \times C_s \quad (9)$$

$A(t)$: 測定時の光合成速度 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), $P_{CO_2}(t)$: 測定時のCO₂分圧 ($\mu\text{mol mol}^{-1}$), C_s : 気圧・温度・体積・面積・測定時間(10秒)に関する補正

$$C_s = \frac{PV}{R(T_0 + 273.15)} \times \frac{1}{L} \times \frac{1}{10} \quad (10)$$

P : 大気圧 (Pa), V : 装置容積 (L), R : 気体定数 ($8.31447 \times 10^3 \text{ Pa L K}^{-1} \text{mol}^{-1}$), T_0 : 測定開始時の気温 (°C), L : 葉面積 (m²)

$$Tr(t) = (E(t) - E(t-1)) \times \frac{1}{1013} \times C_s \quad (11)$$

$Tr(t)$: 測定時蒸散速度 ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), $E(t)$: 測定時の水蒸気圧 (hPa)

なお、一般に光合成速度は光飽和に達しない範囲ではCO₂濃度に比例し、また蒸発量は飽差に比例する。そこで、次式によりチャンバー内の濃度変化が無かったとした場合の値に補正した結果も比較した。

$$A_{adj} = A(t) \times \frac{P_{CO_2}(0)}{P_{CO_2}(t)} \quad (12)$$

A_{adj} : 補正光合成速度 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

$$Tr_{adj} = Tr(t) \times \frac{E_s(0) - E(0)}{E_s(t) - E(t)} \quad (13)$$

$Tr_{adj}(t)$: 補正蒸散速度 ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), $E_s(t)$: 測定時の飽和水蒸気圧 (hPa)

飽和水蒸気圧は Tetens (1930) の下記式により求めた

$$E_s(t) = 6.11 \times 10^{\frac{7.5T(t)}{T(t) + 273.3}} \quad (\text{hPa}) \quad (14)$$

$T(t)$: 測定時の気温 (°C)

結 果

1. 試験 I 数理モデルによる理論的解析

(1) 装置の表示値のずれの収束値

外気濃度が一定の場合、センサーの表示値のずれは式(2)に従って時間とともに減少する。しかしチャンバー内のガス濃度は常に変化している。測定対象からのガス放出(吸収)速度が一定の場合、チャンバー内の実際のガス濃度とセンサーの表示値のずれは徐々に大きくなり、やがて一定値に収束し、ガス放出(吸収)が止まると時間とともに減少する(第4図)。

表示値のずれの収束値を求めるには、式(1)において $b = a_{c0} - b_c$ を代入すれば良い。

a_{c0} : チャンバー内のガス濃度初期値, b_c : チャンバー内の単位時間当たりガス濃度変化量

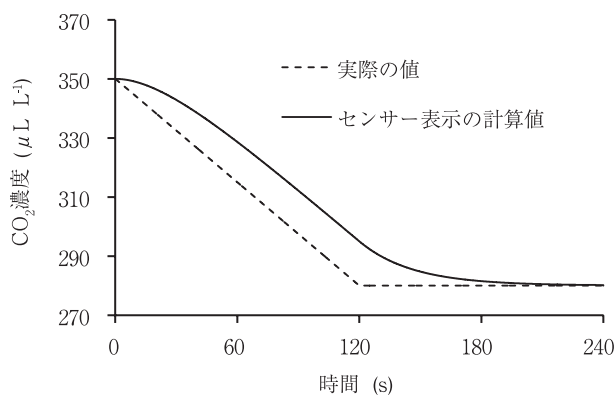
$$\frac{da(t)}{dt} = c(a_{c0} - b_c t - a(t)) \quad \text{より}$$

$$a(t) = a_{c0} - b_c t - b_c(e^{-ct} - 1)/c$$

従ってチャンバーのガス濃度とセンサーの表示値のずれ $\{a_{c0} - b_c t - a(t)\}$ は

$$a_{c0} - b_c t - a(t) = b_c(e^{-ct} - 1)/c$$

$$\text{ゆえに } \lim_{t \rightarrow \infty} \{a_{c0} - b_c t - a(t)\} = \lim_{t \rightarrow \infty} (b_c(e^{-ct} - 1)/c) = -b_c/c$$



第4図 閉鎖式チャンバーの、チャンバー内の実際のガス濃度とセンサーの表示値。

CO₂ 初期濃度を 350 μL L⁻¹、減少速度は毎分 35 μL L⁻¹ とし、120 秒間測定→対象を取り出し→120 秒測定した場合。

つまり表示値のずれは $-b_c/c$ に収束することがわかる。

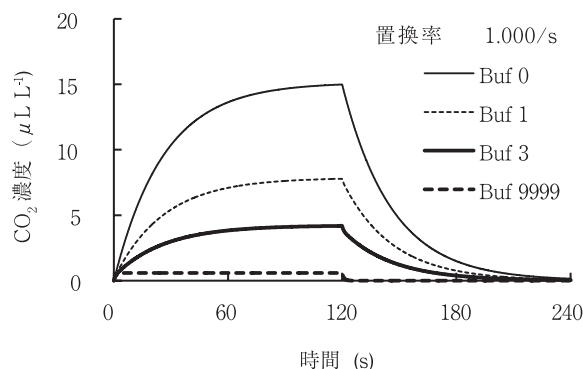
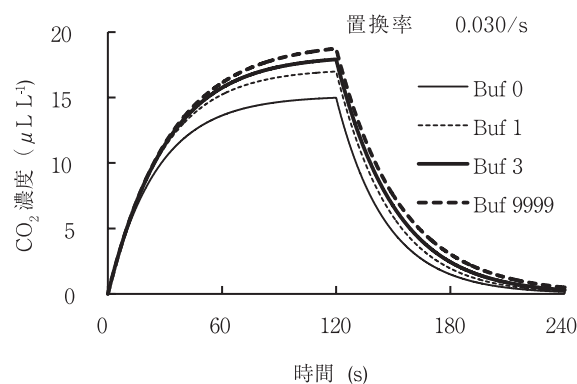
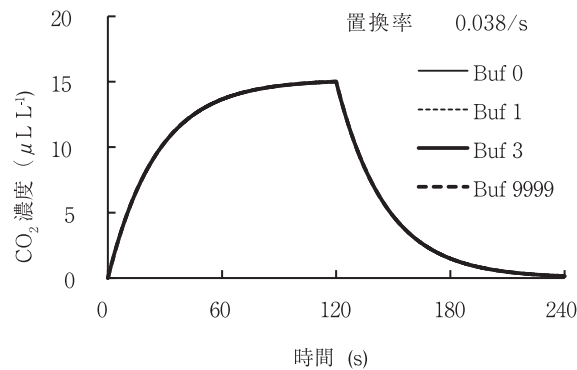
測定対象からのガス放出(吸収)速度が一定でないときは、センサーの表示値のずれは計算できない。この場合、測定物を取り出した後、応答ラグの収束を待ってセンサーの表示値をよみとらなければならない。目安としては90%応答時間からその2倍の99%応答時間の間に一定の読み取り時間を設定すれば良いであろう。通常の閉鎖式チャンバーでは、測定物を取り出す際に混入する外気の影響が大きく、正確な測定は困難であるが、バッファーチャンバー法では、ガスの循環を止めればバッファーへの外気混入の影響は小さいと考えられる。

(2) チャンバーのガス濃度変化速度の影響

上記で見たとおり表示値のずれは $-b_c/c$ に収束する。ここで、経過時間に対する収束率は置換率 c に規定される。したがって、濃度変化速度 b_c が一定の場合、チャンバーとバッファのガス濃度の差は濃度変化速度 b_c に比例する。例えば植物 A に比べ B の光合成速度が2倍であれば、B の測定時のチャンバーとバッファのガス濃度の差は A に比べて2倍生じていることになる。

(3) バッファー倍率とチャンバーの置換率の影響

第5図は装置の応答ラグ、すなわちセンサーの表示値とチャンバー内ガス濃度の差を表した図である。置換率 0.038 の図を見ると、測定対象が CO₂ を吸収し続ける間その差は拡大し、120 秒時点でチャンバー内の実濃度に対しセンサーの表示値のずれは約 15 μL L⁻¹ 高い値にほぼ収束している。測定対象が除かれるとずれは徐々に小さくなり、240 秒時点でチャンバーの値とほぼ等しくなっている。置換率 0.038 はセンサーの置換率である。チャンバーの置換率がセンサーの置換率と等しい場合、バッファー倍率にかかわらずチャンバーのガス濃度とセンサーの表示値との差は閉鎖式と等しくなる。センサーの表示値は7式のように示されることから、チャンバーの濃度とセンサーの表示値の差は



第5図 センサーの表示値とチャンバー内ガス濃度の差。

条件は第4図に同じ。

置換率 0.038/s はセンサーの置換率。

$$a_c(t+\Delta t) - a(t+\Delta t) = a_c(t) - a(t) + \{c_c(a_b(t) - a_c(t)) + b_c\}\Delta t - \{c(a_b(t) - a(t))\}\Delta t$$

従って $c_c = c$ の時

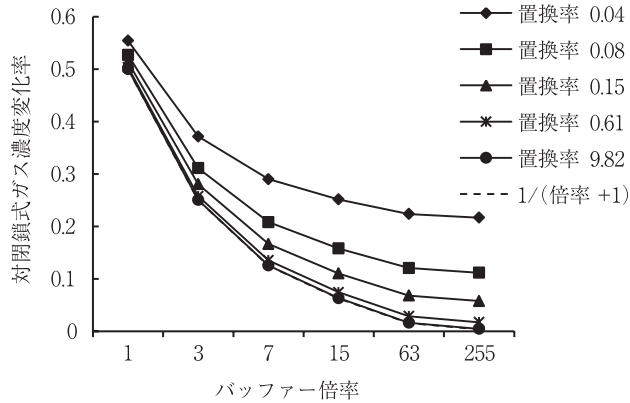
$$a_c(t+\Delta t) - a(t+\Delta t) = a_c(t) - a(t) + \{c(a(t) - a_c(t)) + b_c\}\Delta t$$

となり、バッファー倍率の影響が無くなるためである。

センサーの置換率に比べてチャンバーの置換率が小さい場合は、センサーの表示値とチャンバー内ガス濃度の差は閉鎖式より大きくなり、チャンバーの置換率が大きい場合は、センサーの表示値とチャンバー内ガス濃度の差は閉鎖式より小さくなる。

(4) チャンバーのガス濃度変化低減効果

試算結果を第6図に示す。破線は $1/(\text{バッファー倍率} + 1)$



第6図 閉鎖式に対するチャンバー内ガス濃度の変化率。
センサーの99%応答時間における値。Δt=0.01sで計算。
置換率9.82は1/(倍率+1)と殆ど重なっている。

のライン（置換率9.82とほぼ重なっている）で応答ラグが無い場合である。応答ラグを計算すると、バッファー倍率が大きくなるほど置換率の影響が大きくなる。例えばバッファー倍率255の場合、チャンバーのガス濃度は1/256に下がるべきところが置換率が0.04だと1/4程度にしか下がらなかった。したがって、チャンバーのガス濃度変化速度を調節するには、バッファー倍率だけでなく、倍率に見合った置換率を確保しなければならない。バッファー倍率に見合った低減効果を仮に8割程度、上述の例で言えば1/256/0.8とすると、必要な置換率は、バッファー倍率1, 3, 7, 15, 63, 255に対し、それぞれ毎秒約0.04, 0.08, 0.16, 0.6, 2.5, 9.8であった。これは測定時間内でバッファーの8割のガスを置換するのに必要な置換率を意味している。

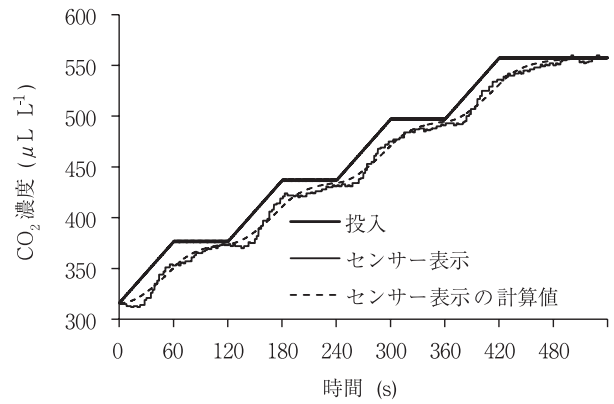
(5) 外気混入の影響

一定量の外気が測定装置に混入する場合、混入した外気の体積のシステムの体積に対する割合を混入率とすると、混入率分のガスが測定装置から放出されることになる。放出されたガスの濃度が測定装置のガス濃度と等しいと仮定すると、式(3)におけるチャンバー濃度変化量は $b_c \times (1 - \text{混入率})$ となる。つまり5%の混入率であれば変化量は実際の値より5%小さくなる。

2. 試験Ⅱ 測定装置による検証

(1) 測定装置精度の検定結果

第7図はチャンバー内の実際のCO₂濃度、センサーの表示値、試験Ⅰで用いた数理モデルを使って求めたセンサーの表示値の計算値を重ねた図である。センサーの90%応答時間の2倍、すなわち99%応答時間に相当する、120秒、240秒、360秒、480秒の各点でセンサーの表示値は実際のCO₂濃度に一致しており、装置の精度が十分であることが示された。また、前述の数理モデルによるセンサーの表示値の計算値は、実際の表示値にほぼ一致していた。



第7図 測定装置のセンサーの表示値とモデルの計算値。

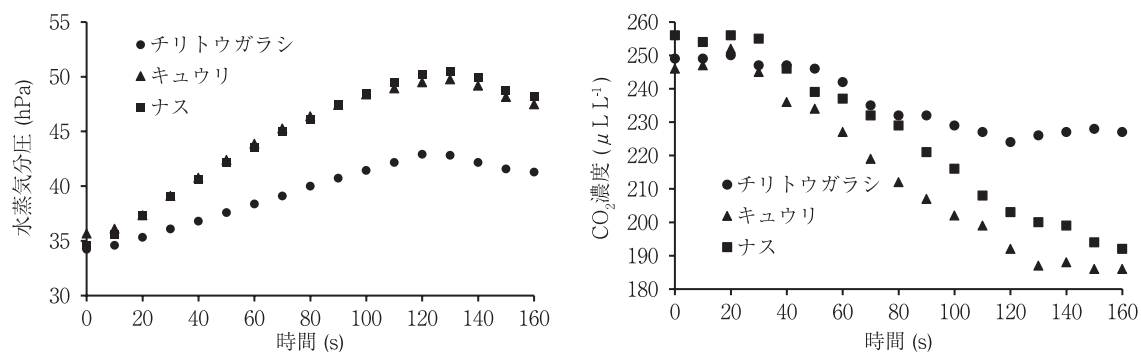
投入：CO₂が均一化したと仮定した場合の装置内のCO₂濃度、
センサー表示：バッファーに設置したセンサーの表示値、
センサー表示の計算値：数理モデルによるセンサーの表示値の
計算値。チャンバーに純CO₂ガスを注射器で1分間かけて注
入→1分間静置を4回繰り返した。

(2) 光合成蒸散の測定結果

測定中の外気の環境は、気温36.1~37.1℃、気圧1011 hPa、相対湿度54~59%、CO₂濃度247~254 μL L⁻¹であった。バッファー内の変化（センサーの表示値）は、気温が最大+0.7℃、気圧は変化無し、水蒸気分圧は最大+13.6 hPa（相対湿度では+18%）、CO₂濃度は最大-61 μL L⁻¹であった（第8図）。

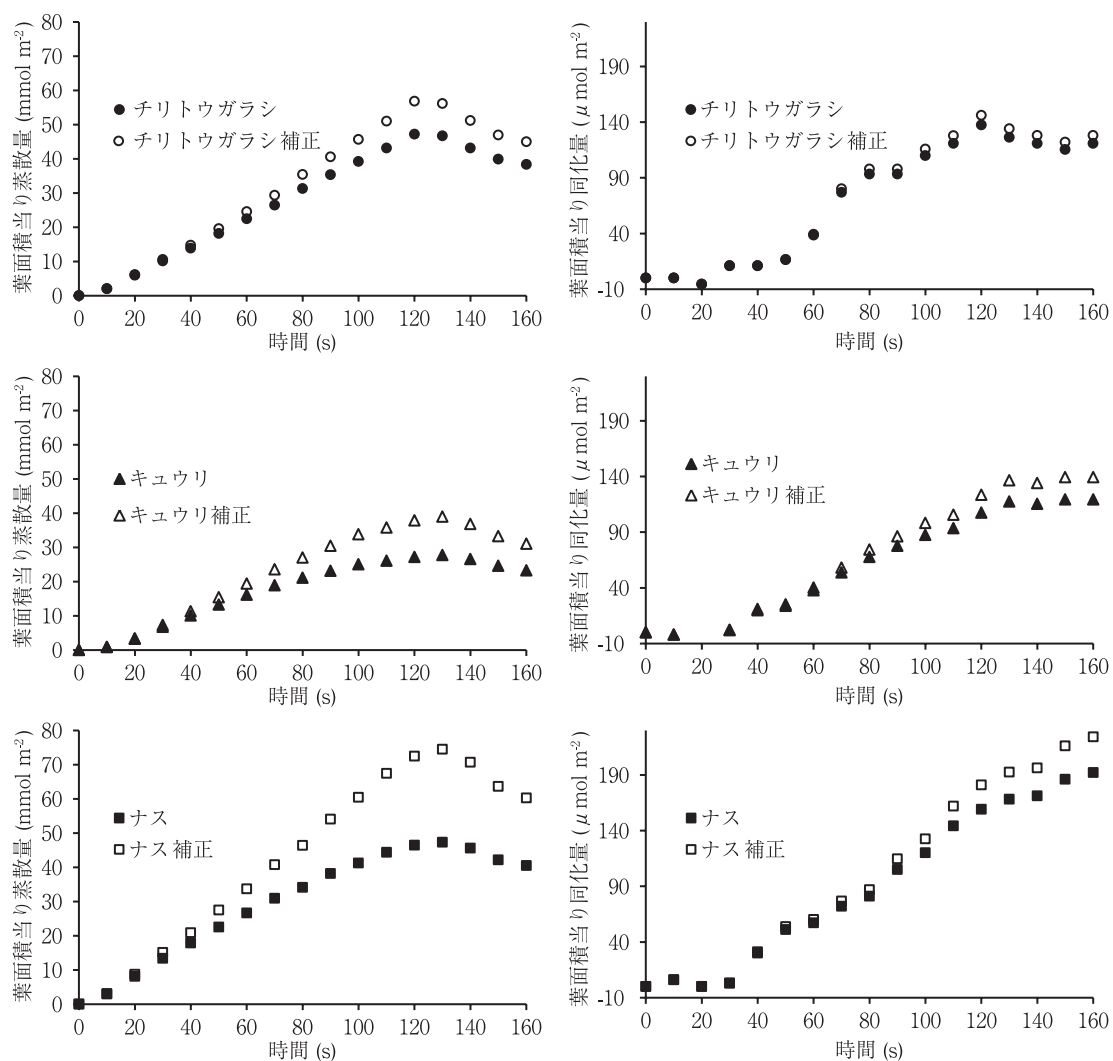
第9図は葉面積当りの光合成と蒸散量の推移である。蒸散量についてみると、チリトウガラシ、キュウリ、ナスの蒸散量はそれぞれ補正前が38, 23, 40 mmol m⁻²、補正後が45, 31, 60 mmol m⁻²であった。いずれも測定開始約10秒後から大きく立ち上がっている。測定値はチリトウガラシがほぼ直線的に増加しているのに対し、キュウリとナスは漸減傾向が見られる。一方、蒸散に伴うチャンバー内の飽差の減少の影響を補正した結果では、ナスも直線的な増加を示している。蒸散測定においては飽差補正が必須であると思われる。供試作物の葉面積はチリトウガラシ、キュウリ、ナスそれぞれ222, 611, 407 cm²であり、チャンバー内の総蒸散量はそれぞれ0.84, 1.41, 1.63 mmolとなることから測定値と補正值の開きは、蒸散量が大きいほど大きくなっていることが分かる。ナスよりも開きの小さい、キュウリの蒸散量の増加速度が補正後も漸減していることは、実際の蒸散速度が漸減していることを意味していると考えられる。測定物を取り出した後、積算蒸散量が下がっているのは、外気の混入によると考えられる。

つぎに光合成量について見ると、チリトウガラシ、キュウリ、ナスの葉面積当り光合成量はそれぞれ補正前が121, 119, 192 μmol m⁻²、補正後が128, 139, 224 μmol m⁻²であった。グラフの立ち上がりまで30~40秒を要しており、蒸散量とは対照的に大きな表示値のずれが生じていることが分かる。これはセンサーの時定数が湿度センサーの3倍で



第8図 光合成蒸散測定例におけるセンサーの表示値.

2006年9月12日7時52分～8時19分にかけて国際農林水産業研究センター島嶼研究拠点において屋外で測定. 測定間隔10秒で120秒間測定後対象を取り出しさらに40秒測定. 測定中の外気(バッファー内)の環境変化は気温36.1～37.1℃(最大+0.7℃), 気圧1011 hPa(変化無し), 相対湿度54～59%(最大+18%), CO₂濃度247～254 μL L⁻¹(最大-61 μL L⁻¹).



第9図 葉面積当り光合成蒸散量の推移.

10秒ごとの測定値を積算して表示. 他は第8図に同じ.

第1表 装置の構成例.

要素	値	単位	備考
CO ₂ センサー 90%応答時間	60 s		
CO ₂ センサー分解能	1 ppm		
湿度センサー 90%応答時間	20 s		
湿度センサー分解能	0.1 % RH		
測定時間	120 s		最も応答速度の遅いセンサーの 90%応答時間の 2 倍
CO ₂ の想定濃度変化	10%		測定開始時の濃度に対する割合
CO ₂ 濃度の初期値	350 $\mu\text{L L}^{-1}$		
絶対湿度初期値	18 g H ₂ O m ⁻³		気温 30℃ で相対湿度 60%相当
チャンバー容積	6 L		高さ 23.6 cm, 直径 18 cm
バッファース倍率	4		装置容積-チャンバー容積
チャンバー換気率	0.32 s ⁻¹		湿度センサーの 90%応答時間を考慮

あることの反映である。測定当日は日射が安定していなかったこともあり、光合成速度の振れが大きかった。しかしながら、測定物取り出し後は比較的測定値が安定しており、表示値のずれが解消されていることがわかる。ナスは例外的に安定しかかった後増加しているが、これは光合成量が大きく、チャンバーとバッファースの濃度差が大きかったためと考えられる。なお、CO₂ の濃度補正はチリトウガラシの場合ほとんど影響が無かったが、ナスでは 1 割程度の誤差になっていた。これはナスの葉面積がチリトウガラシのおよそ 2 倍でかつ葉面積あたりの光合成速度も大きく、チャンバー内の CO₂ の減少が大きかったことによる。

考 察

1. 装置の設計指針

装置の設計は、(1) 測定時間、(2) 想定濃度変化、(3) 装置の総容積、(4) バッファース倍率、(5) 置換率を決定するという手順になる。以下各々について、得られた結果から、装置の設計指針を検討する。

(1) 測定時間

まずセンサーの応答時間を考える。90%応答時間の 2 倍の時間が経過すれば 99% 表示値のずれが収束するため、これが測定時間の基準となる。濃度変化速度が一定であればこの時点より測定を開始し、濃度変化の傾きを読めば、実際の濃度変化速度となる。測定物を取り出した後、センサーの表示値の安定を待つ場合は、目安としては 90% 応答時間からその 2 倍の 99% 応答時間の間に一定の読み取り時間を設定すれば良いであろう。なお、測定物の出し入れ時間も考慮する必要がある。

(2) 想定濃度変化

センサーの精度が得られる濃度変化を基準にする。例えば、1 ppm の分解能をもつセンサーで相対誤差 3% のオーダーで測定するには 34 ppm の濃度差が必要である。ただし、測定中の測定対象によるガスの濃度変化が、例えば「結露を生じない」など、測定に関する許容条件を満たす範囲であることも必要である。

(3) 装置の総容積

装置の総容積は、測定中の測定対象によるガスの濃度変化が想定濃度変化の範囲にほぼ一致するようにする。

(4) バッファース倍率

チャンバー容積は、測定物が収まるサイズとし、チャンバー以外の部分をバッファースとする。

(5) チャンバーの置換率

第 6 図を参考に、バッファース倍率に見合った置換率を確保する。応答ラグがなかった場合の 8 割の対閉鎖式ガス濃度変化率を得るために必要な置換率は、バッファース倍率 1, 3, 7, 15, 63, 255 に対し、それぞれ毎秒約 0.04, 0.08, 0.16, 0.6, 2.5, 9.8 である。

2. 装置の構成例と測定対象別アレンジ方法

測定装置の構成例として試験 II で使用した装置の構成を、第 1 表に示した。CO₂ センサーの 90% 応答時間は、拡散サンプリング方式で最も一般的に見られる 60 秒、H₂O センサーの 90% 応答時間は 20 秒である。測定時間は最も応答速度の遅いセンサーの 90% 応答時間の 2 倍である 120 秒とした。CO₂ の想定濃度変化 10% は、初期濃度を 350 $\mu\text{L L}^{-1}$ とすると 1 ppm の分解能のセンサーで 3% オーダーの測定が可能である 35 $\mu\text{L L}^{-1}$ である。チャンバー容積は 6 L、バッファース倍率は 4 倍、チャンバーの換気率はバッファース倍率に対して十分なチャンバーのガス濃度変化低減効果が得られる 0.32 s⁻¹ としている。

第 2 表は同装置を用いて光合成、水面蒸発、地表面蒸発、森林の土壌呼吸速度を測定する場合の最適な測定面積、すなわち 120 秒間の測定で測定対象ガスのチャンバー内濃度変化が測定開始時の 10% になる面積を示したものである。光合成測定は 178、水面蒸発が 30、地表面蒸発が 78、森林の土壌呼吸速度は 299 cm² となる。本稿の光合成測定例でいえば、チリトウガラシが 222 cm² でありほぼ適正面積であった。

上記の面積は装置の総容積 30 L における最適面積である。この装置を、測定対象の大きさに応じてアレンジする

第2表 構成例装置による最適測定面積.

測定対象	変化速度 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	初期量 ¹⁾ μmol	最適面積 m^2
光合成 (トールフェスク) ²⁾	22 ($22 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	469	0.0178
水面蒸発 ³⁾	8359 ($13 \text{ mm H}_2\text{O day}^{-1}$)	30000	0.0030
地表面蒸発 ³⁾	3215 ($5 \text{ mm H}_2\text{O day}^{-1}$)	30000	0.0078
森林の土壌呼吸速度 ⁴⁾	13 ($0.6 \text{ mg CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	469	0.0299

¹⁾ システム内の測定対象ガスの初期量.

²⁾ Sasaki ら 2002.

³⁾ 2006 年 9 月 11 日 13 時, 国際農林水産業研究センター島嶼研究拠点で測定.

⁴⁾ 森林総合研究所 CO_2 フラックス観測の深化とモデル化による森林生態系炭素収支量の高度評価.
(http://ss.ffpri.affrc.go.jp/information/kadaihyoka/ko_pro/2005/CO2flu.pdf).

ことを考えてみる. 例えば葉の一部をリーフチャンバーで測定するとする. 測定時間および想定濃度変化は, センサーに変更がなく, 測定内容が光合成蒸散測定で変わらないので, そのままでよい. リーフチャンバーの測定面積を 4 cm^2 とすれば, 最適装置容積は $30 \text{ L} \times (4 \text{ cm}^2 / 178 \text{ cm}^2) \div 670 \text{ mL}$ となる. チャンバー容積を仮に 10 mL とすれば, バッファは 660 mL となり, バッファ倍率は 66 倍となる. 十分な低減効果が得られるチャンバーの置換率は 2.5 程度となるので, 毎秒 25 mL の送風量が必要ということになる.

3. 民生用センサーの現状

本稿執筆時点で, 本研究で使用した室内環境測定用センサー (Testo-435-2 IAQ kit) の価格は 1900 ドル程度である. 光合成蒸散測定に使用できる民生用センサーは, 他にも数多く販売されている. 例えば, 温度, 湿度, CO_2 が同時測定でき, 15 秒~ 18 時間のインターバルで最大 5400 点のデータを保存でき, 約 450 ドルという製品もある (注: CM-0016, CO_2 Meter 社, Michigan). 蒸散測定だけであれば, 温度を分解能 0.01°C , 精度 $\pm 0.8^\circ\text{C}$, 湿度を分解能 0.03% RH, 精度 $\pm 4\%$ RH で同時測定し, 設定により 2 秒から 240 分

のインターバルで最大 15000 のデータを記録でき, しかもサイズは $100.7 (\text{W}) \times 10.4 (\text{H}) \times 21.0 (\text{D}) \text{ mm}$ というセンサーが 2 万円程度で入手できる (注: LogStick®LS350-TH, 大阪マイクロコンピュータ株式会社, 大阪). このように光合成蒸散測定は身近なものとなっている.

謝辞: 本研究にあたり, 多大なご助力をいただいた国際農林水産業研究センター島嶼研究拠点の小沢聖氏ならびに高間恵実子氏をはじめとするスタッフの方々, 執筆に際し啓発的な助言を頂いた, 農業環境技術研究所の早野美智子氏に心より感謝申し上げます. 最後に, 懇切丁寧に閲読下さった方々に最大級の敬意と感謝を申し上げます.

引用文献

- Sasaki, H., M. Fukuyama, T. Onoue, T. Suyama and A. Shoji 2002. Effects of increasing CO_2 concentration and leaf temperature on the photosynthesis of tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.). *Grassland Sci.* 48: 12–16.
- Tetens, O. 1930. Über einige meteorologische Begriffe. *Z. Geophys.* 6: 297–309.
- 山本一清 2005. LIA for Win32 (LIA32). In <http://www.agr.nagoya-u.ac.jp/%7Eshinkan/LIA32/index.html>. 名古屋大学, 名古屋.

Verification and System Design Guidelines for the Buffered Chamber Method Gas-Balance Measurement Apparatus: Masato ODA (*Japan International Research Center for Agricultural Sciences, 1-1 Ohwashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8686, Japan*)

Abstract: The buffered chamber method is a kind of closed chamber method for gas-balance measurement. The closed chamber is divided into a measurement and a buffer chamber in this method. The gas is circulated between both chambers and the gas-concentration change is measured in the buffer chamber. The measurement time can be adjusted to the gas-sensor response time or gas-change speed of the measured object. Therefore, this method can be used for accurate and widespread measurements. However, this method has a response lag between the buffer and the measurement chambers. Hence, the response lag was analyzed using a mathematical model for the sensor-response lag and the gas-concentration changes in buffer and measurement chambers. In concrete terms, the response of the apparatus was investigated for various substitution rates of chamber gas or for buffer ratios. The results showed that the adequate substitution rates for buffer ratios were needed for adjusting measurement time. In addition, an apparatus was actually assembled and tested for its performance, and system design guidelines were established.

Key words: Chamber Method, Photosynthesis and transpiration, Soil respiration.