

2.4 貯留変化量

CO₂ storage change

純生態系 CO₂ 交換量 (NEE: Net Ecosystem CO₂ Exchange) は一般に植生面上における CO₂ フラックス観測とフラックス測定高度 - 地表面間の空間に貯留する CO₂ 量の時間変化量 (CO₂ 貯留変化量) を測定し、それらの和として表す。

$$NEE \equiv F_c + F_s = \overline{w' \rho_c'} + \int_0^{z_f} \overline{\frac{\partial \rho_c}{\partial t}} dz \quad (2.4-1)$$

ここで、 F_c : 測定高度における CO₂ フラックス [mg m⁻²s⁻¹], F_s : CO₂ 貯留変化量 [mg m⁻²s⁻¹], w : 鉛直風速 [ms⁻¹], ρ_c : CO₂ 密度 [mgm⁻³], t : 時間 [sec], z : 高度 [m], z_f : フラックス測定高度 [m] であり、ダッシュは変動値、上線は平均値を表す。

CO₂ 貯留変化量は、作物群落などの背丈の低い植物群落においては値が小さいが、森林のような背丈の高い植物群落においては CO₂ フラックスに対して無視できない量となる (Baldocchi *et al.*, 2001)。とくに日の出後の数時間はフラックスと同等かそれより大きな値になることがある。CO₂ 貯留変化量は積算するとゼロに近づくため、日積算値 (24 時間の積算) では無視できるという報告もある (Baldocchi *et al.*, 2000) が、時間 (30 ~ 60 分) 単位の NEE 評価に関しては、必須の測定項目である。

Tips!

式 (2.4-1) の導出では水平・鉛直移流項と水平乱流フラックス項を無視しているため、鉛直乱流フラックスと貯留変化量のみで NEE が表現されている。現在のフラックス観測では、技術的な制約等から“水平一様”を仮定し、水平成分の輸送項を無視する場合がほとんどである。また鉛直移流項に関しても、評価が難しいため、現時点では含めない場合が多い。このため、この式 (2.4-1) に含まれる仮定がなるべく成立するような観測サイトの選定が重要となる。

鉛直移流項に関する研究は、Lee (1998) によってなされている。また、水平・鉛直移流項を観測によって評価しようとする研究も見られるようになってきた (Aubinet *et al.*, 2003; Aubinet *et al.*, 2005; Leuning *et al.*, 2008)。

Tips 2.4-1

測定方法

CO₂ 貯留変化量は、フラックス測定高度より下層における空気の CO₂ 濃度の時間変化から求める。植生内の鉛直空間の CO₂ 濃度分布は一様ではないため、複数高度の CO₂ 濃度測定を行う必要がある。

1 台のクローズドパス型 CO₂ 分析計を用いた場合、ポンプと電磁弁を用い、複数の地点の吸引口から流路切り替えを行いながら、それぞれの高度の濃度を順次測定する方法と、複数高度から吸引した空気

を混ぜ合わせた空気の濃度を測定する方法が考えられる。前者は各地点の CO_2 濃度分布の情報も得られるメリットがある一方、流路切り替えシステムの制御がやや複雑になること、それぞれの地点の測定間隔が長くなるデメリットがある。複数台の CO_2 分析計を用いた測定の場合、これらのデメリットは解消されるが、器差による誤差が生じるため、器差を解消するために頻繁に校正を行うなどの工夫が必要となる。

測定地点・点数の設定

CO_2 濃度測定高度数は多いほど対象とする空間の平均的な値が得られるので望ましいが、各測定高度の濃度を順次測定する場合には、測定点が多いほどそれぞれの地点の測定間隔（測定周期）が長くなるため、測定点数の決定にはこれらのことを勘案して決定する必要がある。

土壌表面付近と葉群（森林の場合樹冠）付近は、大きな濃度変化を示す。したがって、植生の群落構造に配慮して適切な高度と数の測定点を設置する必要がある。測定高度や測定点数が算出される CO_2 貯留変化量に及ぼす影響については、Yang *et al.* (1999) や Yang *et al.* (2007) で報告されている。

測定システム

一例として、1 台のクローズドパス型 CO_2 分析計を用いて、複数の測定高度のサンプル空気を順次切り替えて吸引し計測し記録するシステムについて説明する。測定システムの概要を Fig. 2.4-1 に示す。ここでは、測定高度と同数のポンプを使用している。

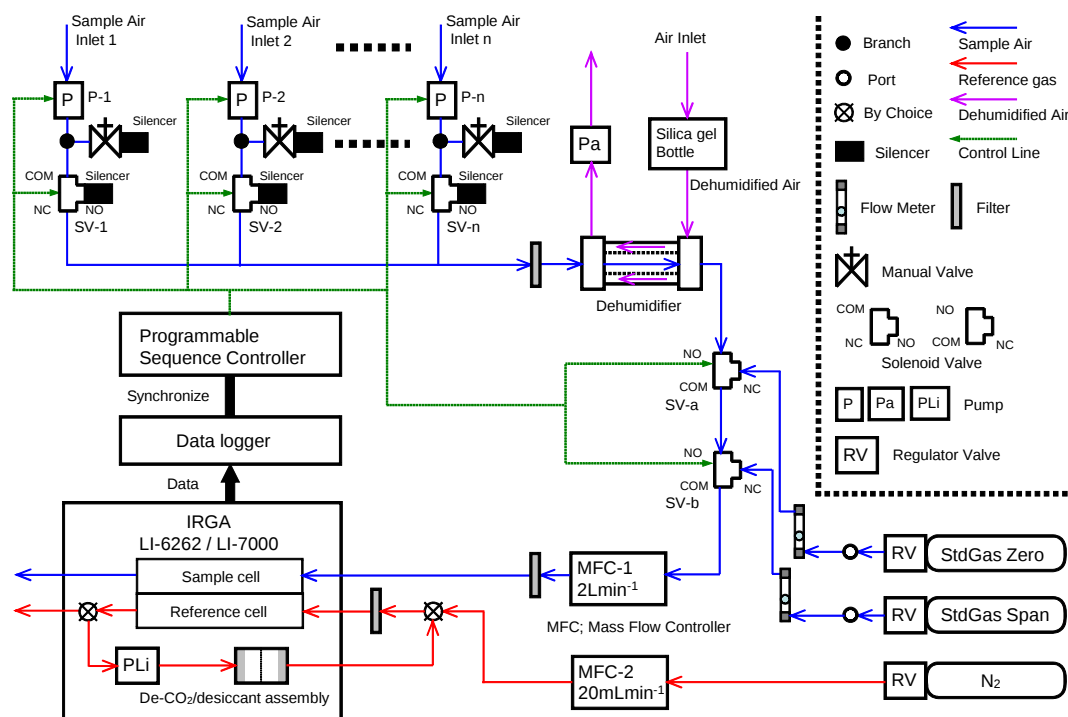


Fig. 2.4-1 CO_2 濃度プロファイルの測定システム例。

配管は、次の 3 系統に大別される。

1. CO_2 分析計サンプルセルへのサンプル空気および校正ガス供給経路 Fig. 2.4-1 青線）
 - ・ 本線：サンプル空気

- ・ 途中合流：校正ガス（ゼロ，スパンガス）
- 2. CO₂ 分析計リファレンスセルへのガス供給経路（Fig. 2.4-1 赤線）
- 3. 除湿用乾燥空気（Fig. 2.4-1 紫色線）

Fig. 2.4-1 のサンプル空気および校正ガスの経路（青線）を辿りながら説明および注意点を示す。

サンプル空気取り入れ口

- ・ チューブの先端には雨滴の侵入を防ぐため下向きに固定する（Tips 2.4-2 および photo 2.4-1~2.4-3 を参照）。
- ・ 吸引口は水滴・ゴミや昆虫などの吸引を防ぐための工夫を行う。

吸引チューブ（配管）

- ・ 屋外の配管には耐候性のある素材のチューブを使用する：PTFE（商品名としてテフロンとも呼ばれている）など。
- ・ 制御システム内の狭い空間での配管には可撓性のある素材（ポリウレタンなど）が扱いやすい。

ポンプ

- ・ ポンプより上流の経路には、負圧がかかり、下流の経路は加圧される。
- ・ 負圧がかかる経路は、リークに特に注意する。
- ・ 加圧される経路は、継ぎ手など部品の耐圧に注意する。

手動バルブ

- ・ 空気取り入れ口から測定セルまでの到達時間を短くするために、空気吸引速度は速いほどよいが、電磁弁、CO₂ 分析計の測定セルの耐圧、ポンプへの負荷、マスフローコントローラ部での結露防止等を考慮し、電磁弁の手前で余分な空気を排気すると良い。
- ・ 手動バルブを設けることで、流量調整が可能となる。
- ・ セットアップ時に流量計で確認しながらバルブ開度を決める。この段階でこの先に送る空気の流量をマスフローコントローラの設定流量に近づける。
- ・ 手動バルブを開きすぎて流量低下を招かないように注意する。
- ・ バルブは年 1 回程度分解掃除をする。
- ・ 排気口にサイレンサを取り付ける場合、目詰まりによる余剰空気の排気能が低下を防ぐため、定期的に交換する（年 1 回程度）。

電磁弁（各測定高度のサンプル空氣の切り替え） SV-1, SV-2 ... SV-n

- ・ 各測定高度のサンプル空氣の切り替えを行う。
- ・ 空氣取り入れ口から測定セルまでの遅れ時間を短くするため、事前に、電磁弁まで空氣を吸引（チューブ内滞留空氣除去のための事前吸引）しておくが良い。この場合、ポンプと電磁弁の間に余剰空氣排氣用の分岐を設け、電磁弁が開くまでは、この部分から空氣は排氣される。
- ・ 電磁弁の寿命を把握しておく。
- ・ 電磁弁についての詳細は前節（2.3「クローズドパス型 CO₂ 分析計」（2））参照。

エアフィルタ

- ・ 経路内における汚れの付着によるトラブルを防ぐためエアフィルタをつける。
- ・ 頻繁に交換が必要なので、廉価なものが良く、交換作業を行いやすいようにする。
- ・ 空氣の汚れ具合にもよるが2週間～1ヶ月に1回程度交換する。
- ・ エアフィルタは、ポンプへの負荷の一因となるため、設置の数やフィルタの孔径の選定には注意を要する。

エアドライヤ（除湿装置）

- ・ CO₂ のみの測定を行う場合、測定システム内での結露によるトラブルの軽減という観点からも、サンプル空氣の除湿をすることを推奨する。
- ・ ドライヤに供給するパージガス（乾燥空氣）は、シリカゲルやヒートレスドライヤ等で作る（2.3「クローズドパス型 CO₂ 分析計」参照）。
- ・ エアドライヤの型によっては、配管との接合部が外れやすいので注意する。

電磁弁（校正ガスの合流） SV-a, SV-b

- ・ CO₂ 分析計校正ガスの合流点。
- ・ 校正用ガスボンベには圧力調整器（レギュレータ）を取り付ける。
 - ・ 圧力調整器の取扱説明書に従って使用する。圧力調整器に付いている圧力計によって最高使用圧力は異なるため、フルスケールが使用予定圧力の1.5～2倍の圧力計を選ぶ。例えば入口（一次）側圧力計、出口（二次）側圧力計が付いているタイプの圧力調整器において入口側の最大加圧が15MPa、出口側の供給圧が0.1MPaでの使用を想定した場合、それぞれの圧力計のフルスケールが25MPaおよび0.2MPa程度の仕様の物を選ぶ。
 - ・ 二次圧力調整バルブでシステムに負荷をかけない程度まで減圧する。
 - ・ 圧力調整バルブ開閉のミスによる配管への負荷を避けるため二次圧力調整バルブの圧力レンジは下流側の配管の耐圧に見合ったものを選ぶ。汎用性を考えて耐圧の大きい仕様を選ばない。

マスフローコントローラ

- ・ 流量設定は CO₂ 分析計セルの許容流量に配慮する。

フィルタ

- ・ ゲルマンフィルタには方向性があるので注意する。

ガスアナライザサンプルセル

- ・ セル内へのガスの流入量，制限圧力は必ずマニュアルで確かめておく。

ガスアナライザから排気

- ・ 流量が少ない場合，外気の影響を受けないよう排気管を設ける（経験的に 30cm 前後）。

💡 Tips!

吸引口はロートおよび茶こし（Photo 2.4-1），フィルムケース（Photo 2.4-2），サイレンサ（Photo 2.4-3）等を利用する。フィルムケースを利用する場合，昆虫等の侵入を防ぐため，少量の化繊綿をフィルムケース内に詰めると良い。

Tips 2.4-2



Photo 2.4-1 空気取り入れ口（ロートおよび茶こし）（富士吉田森林気象試験地）



Photo 2.4-2 空気取り入れ口（フィルムケース）（富士吉田森林気象試験地）



Photo 2.4-3 空気取り入れ口（サイレンサ）（富士北麓フラックス観測サイト）

リファレンスガスの経路（赤線）も上述の注意点を参考にする。

（１） システム制御の方法

システムの制御項目は次の２点に大別される。

1. 各測定高度のサンプル空気の吸引の制御
 - ・具体的にはポンプ，電磁弁の制御（Fig. 2.4-1 における P-1 ～ P-n および SV-1 ～ SV-n の On / Off）
2. 校正ガスの制御
 - ・具体的には電磁弁の制御（Fig. 2.4-1 における SV-a，SV-b の On / Off）

制御の例を Fig. 2.4-2 に示す。この制御例において次に測定する地点のポンプを事前に'On'にしているのは，次のサンプル空気をあらかじめ分析計の直前まで引いておくことにより，測定点切り替え時の対象サンプル空気の到達時間遅れを最少にするためである。

```

hh:mi(P1, SV1, P2, SV2, P3, SV3, P4, SV4, P5, SV5, SVa, SVb)
hh:mi(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)
(0/1:off/on) Pn(n=1~5), ポンプ; SVn (n=1~5, a, b), 電磁弁

・通常のサンプルエア吸引切り替え(測定点: 5 高度)
hh:mi(P1, SV1, P2, SV2, P3, SV3, P4, SV4, P5, SV5, SVa, SVb)
hh:00( 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) Sample1 吸引
hh:02( 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) Sample2 吸引
hh:04( 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0) Sample3 吸引
hh:06( 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0) Sample4 吸引
hh:08( 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0) Sample5 吸引
hh:10( 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) Sample1 吸引
hh:12( 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) Sample2 吸引
.
.
.

・ゼロガス校正
hh:mi( 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0)

・スパンガス校正
hh:mi( 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1)

```

Fig 2.4-2 Fig 2.4-1 の測定システム制御例。

(測定点: 5 高度, 測定高度切り替え: 2 分, プロファイル測定周期 10 分とした場合)

CO₂ 濃度プロファイル測定システム構築に当たっては, 自動制御はもちろんのこと手動でも制御出来るよう構築することで, メンテナンスや異常発生時の対応がし易くなる。

出力ポート付きのデータロガー (たとえば米国 Campbell Scientific, Inc. CR1000) を用いると, CO₂ 分析計の出力値の記録と測定地点の切り替えが同時に行えることから, データロガーの時刻と測定地点切り替えシステムの時間のずれを気にする必要がなくなる。測定地点切り替えシステムとロガーがリンクしていない場合は, 電磁弁の電圧を CO₂ 分析計の出力値と同時に記録し, 実際の測定地点を把握する必要がある。

(2) その他のシステム例

上記の測定システムでは測定高度数と同数のサンプル空気吸引用のポンプを使用しているが, 吸引ポンプを流路切り替えの下流に配置すれば, 1 台のポンプで濃度プロファイル測定を実行できる。ただし, 次に測定する高度の空気を事前に吸引できないため, サンプル高度切り替え時の時間遅れが大きくなる。

これに対して, Xu *et al.* (1999) は, 2 台のポンプを用いて濃度プロファイルの高速サンプリングが行えるシステムを考案した。また大谷ら (2005) は, 濃度プロファイル測定を行わず, CO₂ 貯留変化量測定に特化したシステムを提案した。このシステムは, 森林群落内 6 高度から同時に空気を吸引し, 各吸引点が代表する空気層の厚さに応じた量の空気を混合して群落内平均 CO₂ 濃度を求め, その時間変化から群落内の CO₂ 貯留変化量を求めるものである。

このように, 測定システムはいろいろと工夫することができる。

計算方法

CO₂ 貯留変化量は, 理論的には, フラックス平均化時間の始めと終わりの瞬間の CO₂ 濃度の差から貯留変化量を求めるのだが, この方法では算出値が大きく振れてしまうことが報告されている (Finnigan, 2006)。30 分平均値の差から貯留変化量を求める場合もあるようだが, これでは貯留変化量が過小に評価されるといった問題が指摘されている (Finnigan, 2006)。Badocchi *et al.* (2000) では, 測定周期 120 秒の濃度プロファイル (4 高度) の差分から貯留変化量を求めている。

濃度プロファイル測定では, フラックス平均化時間の始めと終わりの CO₂ 濃度プロファイルを正確には知ることができないので, Yang *et al.* (2007) は各高度の測定値をスプライン補間して貯留変化量を計算している。このときランダムエラーを減少させるため, 平均化時間の始めと終わりの 3 分平均値を使用している。

Tips!

このように CO₂ 貯留変化量 F_s の計算方法には, それぞれの観測グループによるやり方があるようで, 統一された確かな計算方法はまだないようにも思われる。しかし, 以下の式で算出していることは共通している。

$$F_s = \int_0^{z_f} \frac{\partial \rho_c}{\partial t} dz = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \rho_{c_i}}{\Delta t_f} \Delta z_i$$

ここで, Δt_f : フラックス平均化時間, $\Delta \rho_{c_i}$: 平均化時間内における空気層 i での CO₂ 濃度変化, Δz_i : 空気層 i の厚さ, n : 測定高度数。

Tips 2.4-3