

2.3 クローズドパス型 CO₂ 分析計

Closed-path CO₂ analyzer

概要

クローズドパス型 CO₂ 分析計を用いた渦相関法は、長期間安定した測定が可能なオープンパス型 CO₂ 分析計が普及していなかった時代が開発された手法である (Leuning and Moncrieff, 1990; Leuning and King, 1992; Suyker and Verma, 1993 など)。これは超音波風速計によって風速変動を観測し、クローズドパス型 CO₂ 分析計によって大気中の CO₂ 濃度変動を観測し、渦相関法によって CO₂ フラックスを求める方法である。現在は 2.2「オープンパス型 CO₂ / H₂O 分析計」に示された LI-7500 (米国 LI-COR, Inc.) の市販・普及とともにクローズドパス型渦相関法を新規に採用する観測サイトは減少していると思われる。しかし、クローズドパス型は次のような利点がある (AsiaFlux 運営委員会, 2003): 1) 受感部が外気や降水に直接さらされないため長期安定した測定が可能, 2) サンプル空気の流れの切り替えにより標準ガスを自動的に導入できるため自動校正が可能, 3) 密度変動補正の補正量が小さい。このような魅力的な点がある一方で, 4) 測定システムが複雑 (煩雑) になる, 5) CO₂ 濃度変動がサンプリング時に減衰するといった欠点がある。観測条件によっては、クローズドパス型分析計を用いた渦相関法のほうが適しているという報告もあるため (小野ら, 2007), この方法を実施するための技術を理解し、測定方法の選択肢の一つとする。とよい。

なお、最近のクローズドパス型 CO₂ 分析計は、サンプル空気中の CO₂ 濃度と H₂O 濃度を同時に測定することができるが、本節ではおもに CO₂ 濃度測定についてのみ記すことにする。

(1) システム概要

Fig. 2.3-1 にクローズドパス型 CO₂ 分析計による空気サンプリングのシステム図を示す。また Photo. 2.3-1 にシステムの写真を示す (相当品)。クローズドパス型乱流観測では、測定位置の空気をチューブを用いて分析計に送り、CO₂ 濃度測定を行う。サンプル空気はエアポンプによって吸引するが、測定位置からポンプまでのチューブ長は、分析計の設置される位置によって決まる。

サンプル空気の流れ

Fig. 2.3-1 をもとにして、サンプル空気の流れを説明する。サンプル空気は測定位置からポンプによって吸引される (負圧)。その後、ポンプから押し出された空気は樹脂膜型エアドライヤによって除湿され、マスフローコントローラによって流量制御された後、CO₂ 分析計 (例えば LI-COR 製 LI-6262 や LI7000) の測定セル内 (サンプルセル) に送られる。ここで濃度測定が行われた空気は、分析計の外へ排気される。Fig. 2.3-1 のシステムでは空気が除湿されているが、H₂O 濃度も同時に測って水蒸気フラックスを求めたい場合は、除湿は行わない。そのときは、システム図のドライヤの部分削除し、チューブで直結すればよい。但し、システム経路内の温度・圧力変化による結露が起こる可能性が高まるので注意が必要である。

サンプル空気の吸引流量はチューブ長・径やポンプの性能で決まる。ポンプ後の押し出し空気流量は、第一に、CO₂ 分析計の許容最大流量によって決められる。例えば LI-6262 の場合は 10Lmin^{-1} (LI-6262 マニュアル, LI-COR) であるが、LI-7000 の場合は特に規定されていない (Unlimited とされている)。図のシステムでは、ポンプ後のサンプル空気流量が 2.0Lmin^{-1} に設定されている。これは樹脂膜型エアドライヤによる除湿効率を高めるための措置である。システムの構成によっては、分析計の許容最大流量を大きく上回るポンプの空気吐出流量を得ることが出来る場合がある。この場合、ポンプと分析計の間で余剰流量分を系外に排気する方法がある (サブサンプリング: Suyker and Verma, 1993, Tips 2.3-13 参照)。この方法を用いることで、空気取り入れ口からポンプまでの流路での吸引空気流量を大きくとることができるので、出力濃度変動の遅れ時間を短縮することが出来る。

サンプル空気の流量制御は、流量調節機能付の流量計などでもできるが、マスフローコントローラを使用することを推奨する。設定流量調節が極めて安定しており、またポンプの脈動による圧力変動を抑えることができるからである。

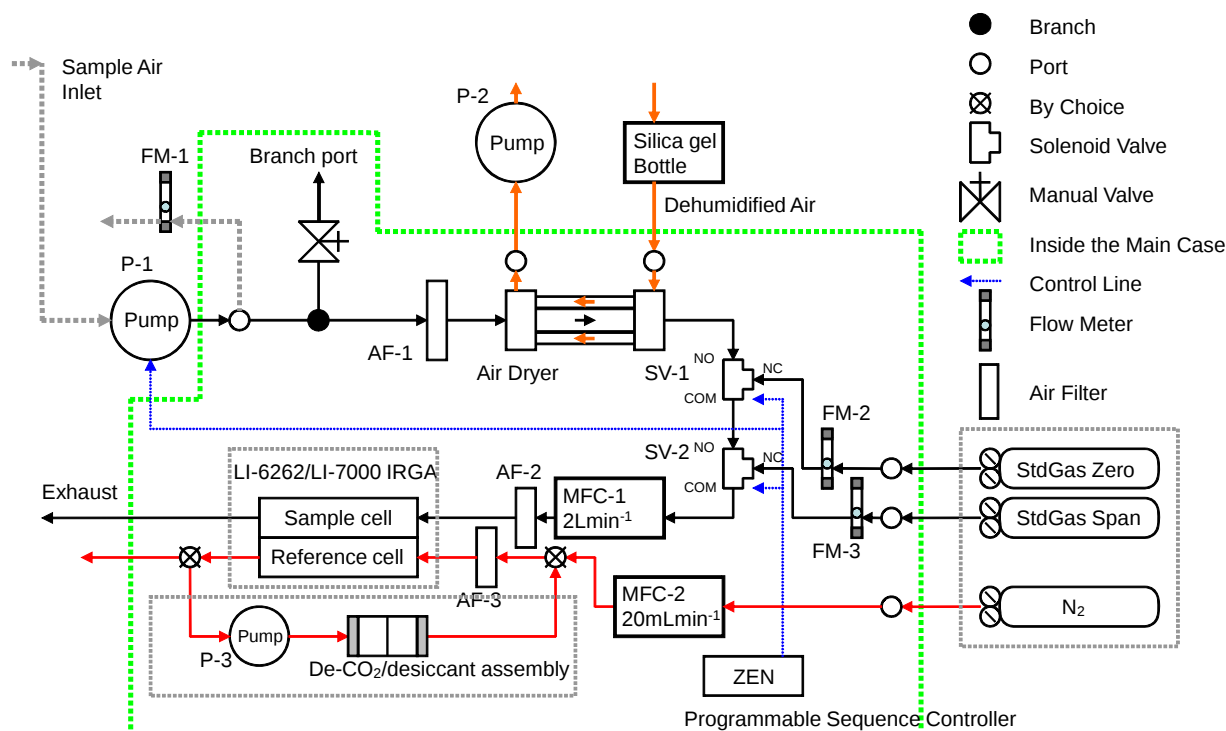


Fig. 2.3-1 クローズドパス型 CO₂ 分析計による空気サンプリングのシステムの例。

(Ohtani et al., 2001 の図を一部改変)

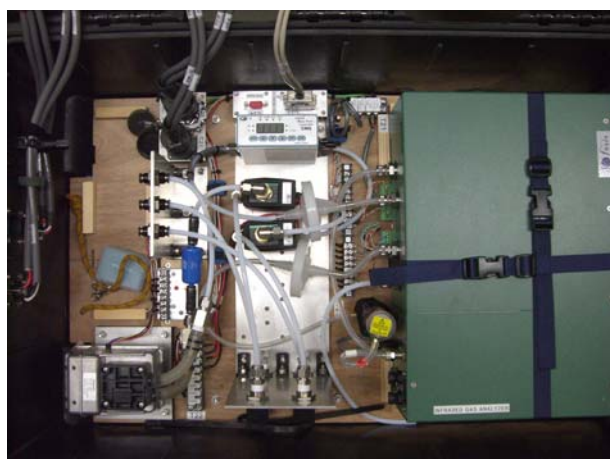


Photo 2.3-1 Fig. 2.3-1 に示したクローズドパス型 CO₂ 分析計による空気サンプリングシステム。

💡 Tips!

空気中に含まれる虫や粉塵、システム内のポンプから発生するダストなどから、システム配管内や分析計セル内の汚れを防ぐためには、エアフィルタを使うとよい。チューブ吸引口およびポンプ直後と CO₂ 分析計の直前に取り付けると、よりよいと思われる。LI-COR 製の分析計に付属のエアフィルタは孔径 1 μ m の PTFE メンブレンフィルタである。LI-COR 以外でも、同等のフィルタは市販されているので、取り回しのよいものを使用するとよい（例えば東洋濾紙㈱製など）

Tips 2.3-1

💡 Tips!

除湿を行うと空気中の H₂O 濃度をモニターできなくなるため、クローズドパス型分析器を用いて水蒸気フラックスを算出することができなくなる。除湿の利点としては、WPL 補正の必要がなくなること、測定セルの汚れにくくなることなどが挙げられる。ただし、LI-7000 は測定セルの分解・清掃が可能なので、除湿を行わなくても長期間の測定が出来るようである。

Tips 2.3-2

リファレンスセル

CO₂ 分析計 (LI-6262 / 7000) では、サンプルセルとリファレンスセル内に充満している空気の赤外線吸光の差から CO₂ 濃度 (または H₂O 濃度) を求める。このため、CO₂ 濃度を絶対値で測定したい場合は、リファレンスセル内を CO₂ フリーのガスで満たしておく必要がある (LI-6262 マニュアル, LI-COR)。

リファレンスセル内を CO₂ フリーに保つ方法は、おもに 2 通りある (Fig. 2.3-1 参照)。一つは、CO₂ が入っていない乾燥ガス (例えば純窒素) を流す方法である。セル内を常に窒素ガスで満たすためにはガスを流し続けなければならないが、流量は少量で構わない。図の例では、20mLmin⁻¹ と設定している。

もう一つの方法は、薬品を使用する方法である (LI-6262 マニュアル, LI-COR)。LI-6262 ではソーダライムと過塩素酸マグネシウムを用いて、CO₂ と H₂O を除去した空気を作り出す。リファレンスセルの出入り口を薬品の入ったボトルに直結すればよいだけなので、薬品交換の手間はあるが、短期間の測定や標準ガス用のボンベ搬入が難しい場所では手軽な方法ではある。LI-6262 の場合、測定対象が CO₂ の場合は、リファレンスセルに薬品ボトルをつなげるだけで良いようであるが、H₂O 濃度も測定対象となる場合はポンプによる強制循環が必要である (LI-6262 マニュアル, LI-COR)。LI-7000 でも、LI-6262 と同様の薬品 (ソーダライム (あるいはアスカライト) と過塩素酸マグネシウム (あるいはドライヤライト)) を用いて、CO₂ と H₂O を除去した空気を作り出す。リファレンス内の空気は LI-7000 内に格納されたポンプによって循環可能である (LI-7000 マニュアル, LI-COR)。

Tips!

薬剤使用とリファレンスガス使用の、両方法とも長所・短所があるが、双方に共通しているのは、ガスが無くなった場合あるいは薬品の効果が切れた場合は、交換が必要となることである (切れる前に交換!)。ガスは大きなボンベを使うことにより交換期間を長くすることができる。薬品は分析計の使用条件に依存するが、メーカーは 1 週間での交換を推奨している。ただ実際は、2 週間 ~ 1 ヶ月は持つようである (分析計の置かれた環境条件による)。

Tips 2.3-3

(2) 電磁弁

クローズドパス型分析計を用いることの利点の一つは、分析計の自動校正が行える点である。そのためには、サンプル空気の経路を分岐させ、校正ガスを流すための流路を作成する必要がある (Fig. 2.3-1 参照)。この流路分岐に役立つものが電磁弁である。この装置は、電圧を与える (電気を流す) ことにより弁を開閉することができる。Fig. 2.3-1 のように三方弁を使うと便利である。三方弁は COM, NO (ノーマルオープン), NC (ノーマルクローズ) の三つのポートを持っている。電圧がかかっていない状態 (非通電時) では COM ポートと NO ポートが接続され、通電時には COM ポートと NC ポートが接続される。この装置の場合、COM ポートを分析計側に接続し、NO ポートをサンプル空気取り入れ口側に接続する。校正ガスは NC ポートに接続する。2 種類の校正ガス (ゼロガスとスパンガス) を用いた校正を行う場合は、2 つの三方弁を直列に接続し、上流側のバルブの COM ポートを下流側のバルブの NO ポートに接続する。定常的な大気サンプリングでは、バルブに通電しない。この状態では、サンプル空気取り入れ口から取り込まれた空気がポンプを通過して分析計に導入される。校正ガスを導入する場合は、導入するガスの接続されたバルブに通電すると、通電されたバルブの NC ポートが開き校正ガスが分析計に導入されるとともに、NO ポートが閉じてサンプル空気取り入れ口からの空気の流れが遮断される。この手順で、ゼロガスとスパンガスを流せば (異なる CO₂ 濃度による 2 点校正)、分析計の校正が可能である。自動校正の場合は、パソコンやロガー等で自動的に電磁弁を制御する。校正ガスが流れているときのデータを後でチェックし、データ計算時に校正データを反映させる。

 Tips!

電磁弁は本体材質等によって価格が変わってくる。反応性のある気体成分を対象とする場合や外気を連続通気する用途においては化学的に安定で耐候性に優れたテフロンなどフッ素樹脂系素材を用いた部材が使われる場合が多いが、測定対象を CO_2 とした場合には、素材への反応性が低いので接ガス部の素材として金属を用いた電磁弁などを用いても良い。また、流量に照らし合わせて適切なサイズの弁を用いることが好ましい。カタログに記載された「オリフィス径」「 C_v 値」を目安に選択すると良い。それぞれの値が大きいほど大きな流量に対応できるが、サイズの大きな電磁弁は動作電力が大きく、内容積が大きいため流路切り替えの際の置換効率が低下することを考慮する。なお、電磁弁には交流型と直流型があり、定格電圧もいくつか用意されているので、測定システムの電源に合わせて選定するとよい。

電磁弁のメーカーはいくつもあると思われるが、筆者はCKD(株)の電磁弁をよく使用している。材質以外にも弁の数(二方・三方)やNO/NCの組み合わせで、種類は多数販売されているので、メーカーからカタログを取り寄せると良い。CKD以外にも、高砂電気工業(株)やSMC(株)、(株)コガネイなどからも販売されている。

Tips 2.3-4

(3) ポンプ (特徴・構造)

ポンプの構造や種類は多い。ここでは、フラックス観測にしばしば用いられるダイヤフラムポンプについて説明する。ダイヤフラムポンプはゴム製のダイヤフラム(隔膜)を用いて、吸気弁・吐出弁を連動させ、流体を供給・抽出するポンプである(株)榎本マイクロポンプ製作所製など)。ポンプの駆動方式には、電磁式とモータ式の2種類があるが、モータ式のほうが流量や圧力を大きくとれるので、クロードパス型測定にはモータ式ダイヤフラムポンプを使うほうが良いであろう。モータ式では、モータによってダイヤフラムを振動(凹凸)させることにより、ポンプ室の容積を増減させる。ポンプの吸気口にはポンプ室方向へのみ空気を通す弁(逆止弁)がついており、また排気口にはポンプ室外へのみ空気を通す弁がついている。これによって、ダイヤフラムの振動とともに空気が一定方向に流れる。ダイヤフラムポンプは流体(この場合は空気)と接する部分に機械的な摺動部がないため、流体の漏れがないというメリットがある。なお、ポンプの駆動電圧(定格電圧)はさまざまあるので、試験地で確保できる電源の状況によって選択する。

一般の小型ポンプに用いられるDCモータは内部の電気接点にブラシを用いたものが多い。このタイプのモータからは電氣的なノイズが発生しやすく、長期連続運転を行う場合にはブラシの摩耗による動作不良が起こりやすい。DC駆動のポンプを用いる場合は、選択可能であればブラシレスDCモータを用いたものを推奨する。

ダイヤフラムポンプはその構造上、流量に脈動を生じやすく、これによる圧力変動が分析計の測定値に影響を与える場合がある。ポンプを分析計の上流に配置する場合は、ポンプと分析計の間にマスフローコントローラや樹脂膜ドライヤなど抵抗物を設けることで脈動の影響を大幅に緩和可能なこともある。また分析計の下流にポンプを設置してサンプル空気を吸引する場合には、分析計とポンプの間にバ

ッファタンクのようなものを設けることで脈動の影響を軽減出来る。

ダイヤフラムポンプを分析計の上流に配置する場合は、内部のダイヤフラムから発生するダストが分析計のセル内を汚染することが多いので、必ずポンプの排気側にフィルタを設けるべきである。

メンテナンスの方法

ダイヤフラムは消耗部品であるため、定期的な交換が必要である。ダイヤフラムにひび割れ等の破損が生じると流量が低下したり、空気漏れが生じたりする。ダイヤフラムや弁はポンプの消耗部品として別売りされているので、予備でいくつか持っておくと良い。流量低下が見られた場合には、まずダイヤフラムを交換することを薦める。このとき同時に吸気・排気口の弁も交換するとよりよい。ダイヤフラム交換後も流量が回復しない場合は、ポンプ自体の寿命が疑われるので、ポンプを交換したほうがよい。

Tips!

ダイヤフラムの消耗は使用条件によって変化すると思われるが、流量低下等症状が見られない場合も定期的に交換するとよいだろう（例えば、年 1 回は必ず交換する等）。また、ポンプの耐用時間も使用条件によって変わると思われるが、メーカーが示す耐用時間があるので参考にすると良い（ただし、多くの場合、メーカー提示の耐用時間以上に使用可能であると思う）。

ダイヤフラムポンプのメーカーは多数ある。榎本マイクロポンプやアルバック機工(株)、のものを使用した経験がある。これらのメーカーは消耗品部材のみの販売にも対応している。（ドイツ KNF Neuberger GmbH や米国 Gast Manufacturing, Inc. についても消耗品の入手が可能である。）

Tips 2.3-5

Tips!

ダイヤフラムの劣化やポンプの元々の構造上の問題で、ポンプの内部で漏れを生じる場合があり、その結果ポンプ設置場所周辺の空気を引き込んでしまう場合がある。漏れの簡易的な確認方法として、微小な漏れは検知できないが、ポンプ入口に米国 Swagelok Company のキャップ等をつけて密閉し、出口側に流量計を付けてポンプを起動すると、漏れが大きい場合はポンプ内部のリーク部分から周辺空気を吸い込むため、流量計の指示がゼロにならず、このことで漏れの程度を確認することができる（但し、長時間このような操作を行うとポンプに負荷を与えるので要注意）。

Tips 2.3-6

(4) チューブ

クローズドパス型 CO₂ 分析計を用いた渦相関法では、チューブを用いた空気のサンプリングを行うが、使用されているチューブの種類はさまざまである。また適用されるチューブ長も数 m から 50m 超まで、試験地によっていろいろである。

チューブの種類の代表的なものには、PTFE、ポリエチレン、ステンレス、ポリエチレン外被のアルミニウム（例えば、ハギテック(株)のデカボンなど）、樹脂製（例えば、米国 Thermoplastic Processes, Inc. の

Bev-A-Line) 等の各チューブがある。バックグラウンド大気のコ₂観測では内壁への吸着や浸透の影響の小さいステンレス管が用いられるケースが多いが、タワーを用いたフラックス観測においては敷設時の作業性が悪いためあまり用いられていない。クローズドパス型のフラックス観測では、PTFE 製チューブを使った配管が多く見られる。チューブ内径(直径)は4~8mm 程度のものが使われる。PTFE 素材は、耐化学薬品性、耐熱性、耐候性にすぐれており、また吸湿性・吸水性がない。野外に配管を敷設する必要のあるタワーフラックス観測に関していえば、耐熱・耐候性および非吸湿性のような性質は、紫外線や大気中のオゾンなどの反応性気体に長時間暴露される可能性がある環境では非常に有利であると言える。ポリエチレンチューブはPTFE よりも弾力性があり、扱いやすいチューブであり、さらに価格も安い。しかし、耐候性はPTFE 製チューブよりも劣るため、定期的なチェック・交換が必要となる。

チューブ長は、農地や草原などの背の低い植物群落上での観測の場合は短く、森林などの背の高い群落上での観測では長く設定されることが多い。森林での測定でも、観測タワーの途中に図のような測定システムを設置できる場合は、チューブ長を短く抑えることができる。タワー下に観測小屋がある場合は、小屋内に測定システムを設置したほうが、メンテナンス等がし易くなるが、チューブ長は長くなる。

Tips!

チューブの接合には必ずチューブコネクタを使用する。設置後に取り外しが考えられる箇所にはワンタッチコネクタ(たとえば株式会社 PISCO 社製)を使うと便利であるが、取り外しが少ないと思われる箇所には Swagelok のチューブ継ぎ手などを用いた恒常的な接合を選択したほうがよい。また、チューブコネクタのネジ止め時(コネクタとポンプあるいはコネクタと弁との接合)には、漏れ防止のためシールテープを接合部に巻くことを薦める。

Tips 2.3-7

Tips!

PTFE 製チューブなどは長いチューブ長のものが買いにくい場合がある。筆者の経験では、内径 6mm 外径 8mm の PTFE 製チューブを買おうとしたとき(サンプル空気吸引用)、50m 巻きの次のサイズは 100m 巻きであった。必要長は 53m であったため、47m 分が無駄になってしまった。(もちろん捨てずに他の用途で使用する)。フッ素樹脂製チューブのうち、PFA チューブは、周囲のガスの透過性も低く、また透明であるためチューブ内の汚れを確認することも可能である。

Tips 2.3-8

 Tips!

Tips 2.3-7 に関して、ねじ込み式のチューブコネクタで広く用いられているネジ規格には、ISO (JIS) 規格の PT ネジと ANSI 規格の NPT ネジ (いずれもテーパネジ) があるが、ネジ山角度やピッチ等が異なり、混用すると漏れの原因となるため、必ず規格を確認し、オス・メスで規格を一致させる必要がある。チューブのインチサイズとミリサイズについても注意が必要。

Tips 2.3-9

(5) マスフローコントローラ

マスフローコントローラは、サンプル空気の流量を一定に保つ流量制御装置である。詳しい原理は省略するが、この装置はぜひ設置したい。一時的な流量調節は、ニードルバルブ付の浮子式 (フロート式) 流量計を用いて手動でも行えるが、時間の経過にともなう流量の変化は避けられない。これに対して、マスフローコントローラを用いると、設定流量にぴったりと調節することが可能であり、またポンプによる脈動 (圧力変動) を抑えることができるという、一石二鳥の優れものである。

 Tips!

マスフローコントローラを使用すると、流量調整に関する負担が著しく軽減する。アナログもしくはデジタル出力付きのフローコントローラも販売されているので、流量モニターも可能である。筆者はこれまで (株)堀場エステックや(株)山武のものを使用した経験がある。初めてマスフローコントローラを手にしたときは、ポンプの脈動による流量変動が見事に消え (流量計の浮子が止まった!), 感動したのを覚えている。

Tips 2.3-10

 Tips!

マスフローコントローラは、各機種で流量が制御できるマスフローコントローラ出入口間の最低差圧が決まっているので、その条件を満たすようにポンプの設定や逃し弁の開閉を決める必要がある。(但し、圧力を高くしすぎるとポンプの負荷が大きくなったり、配管中で結露しやすくなったりするため、最低差圧より若干高めにする程度がよい。)

Tips 2.3-11

(6) エアドライヤ (サンプル空気の除湿)

サンプル空気を除湿したい場合は、空気の流れを滞らせずに除湿する必要がある。このとき、Nafion (米国 DuPont) など半透膜素材のチューブを使った PermaPure dryer に代表される分析用ガス乾燥用の

除湿器を用いるとよい。この除湿器は、二重のチューブとなっており、内側の管は水蒸気を選択的に透過する膜素材で出来ている。半透膜型ドライヤには単管の半透膜チューブを用いたタイプと、半透膜チューブの束を用いたタイプがあり、前者は小流量のガスを後者は大流量のガスを乾燥することに適している。クロードパス型分析計を用いた渦相関法による観測システムに用いる場合は、前者の単管を用いたタイプ（パーマピュア MD シリーズなど）を使用する。このタイプの除湿器は内側の管にサンプル空気（湿潤空気）を流し、外側の管に乾燥空気（パージガス）を流すことで、サンプル空気の水蒸気が半透膜の両側の水蒸気分圧差に従ってこれを透過し、除湿される。サンプル空気が除湿器の管を流れているときに除湿が高速で行われるため、空気の流れは妨げられない。ただし、サンプル空気の流量が多すぎると除湿効率が落ちる。またパージガスの流量はサンプル空気の 2~5 倍とすることが推奨されている。パージガスとしてはボンベガスや乾燥剤（シリカゲルなど）を通過させた空気などを用いることができる。またヒートレスドライヤ（例えば CKD 製 HD-0.5）を用いると数年間メンテナンスフリーで乾燥空気を精製することができる。

現在のクロードパス式 CO_2 分析計は、 CO_2 と H_2O が同時に測定できるので、除湿をする必要はない場合もある。しかしながら、水蒸気フラックス測定が他の測定方法で行える場合は、 CO_2 密度変動に及ぼす水蒸気密度変動の影響を除外できることから、半透膜チューブによる除湿を行い、クロードパス型測定を CO_2 測定に限定することを推奨する。

Tips!

半透膜チューブを利用した除湿器を用いた場合でも、サンプル空気を完全に除湿することはできない。除湿効率を高めるためには、サンプル空気流量とパージガス流量の調整のほか、除湿器を複数本接続するという方法もある。いずれにしても、水蒸気濃度がゼロになることはないが、サンプル空気中の水蒸気濃度を減少させ、かつ水蒸気濃度の変動をほぼ無くすることが可能となる（ CO_2 密度変動に及ぼす水蒸気密度変動の影響を除外できる）。

Tips 2.3-12

(7) システム制御の方法

クロードパス型渦相関法における最低限の測定システム制御は、校正ガス導入のための電磁弁切り替えによる流路変更である。サブサンプリング法を適用した場合は、校正ガス導入時にサンプル空気の排気路が確保されているため、ポンプの電源を切る必要はない。サブサンプリングでない場合は、電磁弁の切り替えとともに、ポンプを止める必要がある（あるいは排気口を確保する必要がある）。 CO_2 分析計からの出力信号は、校正ガス導入時もサンプル空気測定時と同様にデータロガーで収録し続ける。

電磁弁の切り替え（あるいはポンプの ON / OFF）は、定刻に行えるようする。これは、パソコンを用いてリレー制御を行えば可能であるが、最近では、プログラムリレー（オムロン㈱）のような安価なマイコン搭載型のリレーが販売されており、観測者が作成するプログラムによって、パソコンを用いなくても簡単にリレーの時間制御が行える。

パソコンやプログラムリレーによる制御はデータロガーと独立しているため、データ収録と完全には同期できない。プログラム制御可能なデジタル出力をもった米国 Campbell Scientific, Inc. 製のデータロガ

ー（たとえば CR1000 や CR3000 など）を利用すると同期の問題は解決する。Campbell 製データロガーのコントロールポートは、ON のときに 5V が出力される。これを使うことによりリレーを制御し、電磁弁を開閉することができる。このデータロガーを用いると、データ収録と電磁弁制御を 1 台で同時に行うことができる。なお同様の機能を持つデータロガーであれば、上記と同じ制御が可能である。

💡 Tips!

サブサンプリング法とは、サンプル空気の吸引口からポンプまでの間の流量を最大に設定するための方法である。ポンプの後に排気口を用意し、余剰ガスを排気することで大きな流量を確保することができる。これによりサンプル空気のチューブ内輸送にともなう遅れ時間が、CO₂ 濃度変動の減衰を抑制することが可能である（Suyker and Verma, 1993）。

Tips 2.3-13

💡 Tips!

Photo 2.3-2 に CR1000 のコントロールポートと機械式リレーを使用した電磁弁制御の様子、Fig. 2.3-2 に制御ソフト CR - Basic によるプログラム例を示す。筆者の実験では電磁弁制御に成功しているが、すべてを保証しているわけではないことを記しておく。単なる一例として参考にしてほしい。プログラム例は、コントロールポート 1（C1）を使って、11:50～12:00 と 23:50～24:00 の各 10 分間に C1 ポートを ON（電磁弁に ON 状態にする）にするプログラムである。なお、最近のフォトモスリレーを使うと、コントロールポートで直接リレーを制御できる場合もあるようである。

Tips 2.3-14

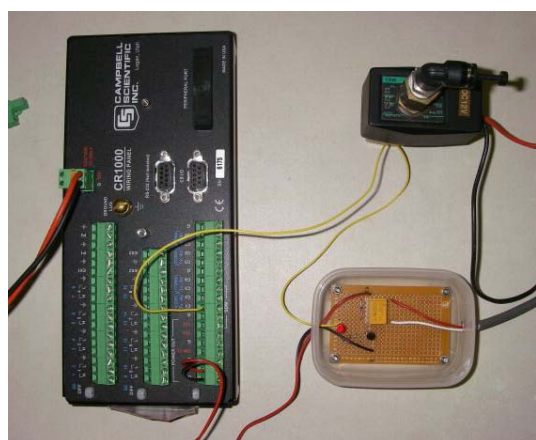


Photo 2.3-2 CR1000 のコントロールポートと機械式リレーを使用した電磁弁制御の回路例。

```
'CR-Basic for CR1000
'Main Program
...
BeginProg
...
If IfTime (710,1440,Min) Then PortSet (1,1)
If IfTime (720,1440,Min) Then PortSet (1,0)
If IfTime (1430,1440,Min) Then PortSet (1,1)
If IfTime (1440,1440,Min) Then PortSet (1,0)
...
EndProg
```

Fig. 2.3-2 制御ソフト CRBasic によるプログラム例。

(8) 校正

CO₂ 分析計の校正は、濃度の異なる CO₂ ガス（標準ガス）をサンプルセル内に導入することによって行う。通常は、2 つの異なる濃度を持つガスを使うことが多い。校正では、ゼロ点（オフセット）とスパンのずれをチェックするため、CO₂ の含まれていないガス（ゼロガス）と測定される空気の CO₂ 濃度よりも少し高い濃度のガス（スパンガス）を使用する。ゼロオフセットは、ゼロガス供給時のデータから検出できる。また、ゼロガス導入時の出力値とスパンガス導入時の出力値の差から、スパンドリフトを算出することができる。これらのチェックは、データ収録後のフラックス計算時に行う。より詳細に分析計の校正を行うためには、2 つのスパンガスを使用する方法がある。一つは、試験地において観測される CO₂ 濃度よりも少し低い CO₂ 濃度を持つ標準ガス、もう一つは観測される CO₂ 濃度よりも少し高い CO₂ 濃度を持つ標準ガスである。校正方法はゼロガスを用いた場合と同じであるが、校正する濃度幅を観測対象に合わせることができるため、より正確な校正が可能となる。このように、クローズドパス型 CO₂ 分析計を用いると自動校正が可能となるが、測定前あるいはメンテナンス時に、分析計のゼロ・スパンを調整しておかなければいけない。

 Tips!

どんなに頻繁に CO₂ 分析計の濃度校正を行ったとしても、校正に用いる標準ガスの精度が悪ければ意味がない。自分で使う CO₂ 分析計の精度以上の検定精度で値付けされた標準ガスを用いることが望ましい。使用する標準ガスの濃度値の確からしさ以外に標準ガスの経時的な安定性も重要となる。一般にポンベの残圧が低下するにつれて濃度が上昇するので、残圧が低くなりすぎないうちに（できれば 3MPa 以下にならないうちに）、ガスポンベを交換する必要がある。

CO₂ ガスのバランスガス（ここではベースガスやキャリアガスと同意）は空気（Air balance）が良い。バランスガスとしては、窒素も使われるが、空気中の CO₂ 濃度測定の場合には空気バランスの標準ガスの使用を薦める。詳細は Pearman(1977), Pearman and Garratt(1975), Griffith(1982), Griffith *et. al.*(1982), 中澤 (1982), 村山 (2001)を参照。

Tips 2.3-15

 Tips!

H₂O 濃度を同時に測定するときは、当然、H₂O の濃度校正が必要になる。CO₂ 校正で用いる標準ガス（あるいは純空気ガス）は含有水蒸気量がほとんど無いため、これを H₂O のゼロガスとして使用することができる。スパン調整は、露点発生器（例えば LI-COR 製 LI-610）を使うことで行える。露点発生器は任意の露点を持つ空気を作り出す装置であり、LI-610 を用いると現場での校正も可能となる（ただし、露点温度の設定は、現場の気温よりも低くすること）。

Tips 2.3-16

(9) 分析計からのデータ出力

分析計によって測定された濃度の値は、デジタルやアナログ信号によって出力される。LI-6262 の場合は、デジタル出力は RS-232C、アナログは電圧出力が用意されている。アナログ出力は生の電圧出力と DAC 出力の 2 通りがある。生の電圧出力は一切の補正・計算がなされていない出力で、濃度値に変換するときは校正係数を用いて変換する必要がある。DAC 出力では、濃度値 0~5V の電圧信号に変換されている。LI-6262 には、データのスムージング機能が付いており、出力信号を平滑化することができる。しかし、渦相関測定においては不要であるので、スムージング機能を OFF にしておく必要がある（設定を 0 秒とする）。

LI-7000 でも同様に RS-232C によるデジタル出力（より新しいバージョンの機器では USB 接続も可能）とアナログ電圧出力（ただし DAC 出力のみ）が用意されている。アナログ（DAC）出力は DAC1 から DAC 4（1~4 チャンネルに相当）に対して適当な測定値を出力に割り付けることが可能である。DAC1 と DAC2 では 0~5V もしくは -5~+5V のいずれかをフルスケールとして、ユーザによる任意のレンジ設定が可能である（例えば CO₂ 濃度の 300~500ppm を 0~5V とする、など）。さらに DAC3 と DAC4 では例えば 0~2.5V や +0.625~-0.625V というように、より小さい電圧範囲をフルスケールとして選択できる。デジタル・DAC 出力データはともに LI-6262 と同様、スムージング（フィルタ）機能によって平滑化も可能であるが、基本的には渦相関測定においてこの機能は不要である。

(10) ポンプの設置位置

Fig. 2.3-1 のシステムでは、ポンプが分析計の上流部に置かれており、サンプルセル内は加圧状態となっている（ポンプ後はすべて加圧状態）。このようなポンプの設置では、サンプル空気は必ずポンプをってから分析計に到達することになり、ポンプ通過時におけるサンプル空気の攪乱は避けられない。ポンプを分析計の下流に設置し、システム全体を負圧状態にする方法もある。この場合、サンプル空気はポンプを通過する前に、濃度測定されるので、ポンプによる攪乱の影響はないと考えられる。

サンプル空気を吸引するためのチューブの長さが長くなる場合（森林等）、吸引の抵抗が大きくなるためチューブ内の気圧はより下がる（負圧が大きくなる）。負圧が大きくなると、チューブの接合部などから、周辺空気が流入しやすくなる。このため、チューブ長が長いシステムでは、ポンプをすべての分岐の一番上流に設置したほうが安全である。

観測地が農地や草原で、チューブ長を短く出来る場合は、ポンプを分析計の下流に設置してもよいが、電磁弁やチューブコネクタによる分岐・接合は最小限にとどめる。

 Tips!

CO₂濃度測定をする場合、加圧状態での若干の漏れはサンプル流量が少し減るだけなので、測定に対しての影響は大きくはない。しかし負圧状態での漏れ（周辺空気の流入）は、濃度測定に大きな影響をもたらすことになる。ポンプ吸引による負圧の力は想像以上に大きいので、接合部等には細心の注意が必要である。システム配管が複雑になる場合は、加圧状態を維持する方が、メンテナンス、長期連続運転などに関して楽であろう。

加圧系の漏れ箇所の確認のためにはスヌープ等の漏れ検知液（Swagelok）が有効である。測定時に負圧になる部分もシステムを動かす前に予め加圧して、上記方法で漏れ箇所をチェックすると良い。

Tips 2.3-17

(11) サンプル空気中の CO₂ 濃度変動の減衰

クローズドパス型 CO₂ 分析計を用いた渦相關法の最大の欠点は、測定対象の空気中（サンプル空気）の CO₂ 濃度変動が、高周波側から減衰してしまう点である。これはチューブによる空気の輸送や分析計の応答速度等に起因した問題である。変動減衰の程度は測定システムによって異なるが、観測者は得られたデータのパワースペクトルなどから、使用しているシステムの周波数応答特性を把握しておかなければならない。もし、減衰している変動成分がフラックスに寄与している場合は、補正を行う必要がある（高周波変動補正）。補正方法はいくつか提案されているが、森林サイトのように、フラックスに寄与する変動周期が比較的大きい場合は、補正方法の差の影響は少ないであろう。

過去、高周波補正に関する文献が発表されているので、そのいくつかを Appendix 2.3-1 にリストアップしておく。

 Tips!

クローズドパス型 CO₂ 分析計での測定では、サンプル空気の温度変動がチューブによる輸送中に減衰する。このため、密度変動補正（WPL 補正）の影響が小さい（補正量が小さい）。チューブ長が長くなり、温度変動が無視できるほど小さい場合、サンプル空気を除湿すると WPL 補正の必要はなくなる（Suyker and Verma, 1993）。また、水蒸気濃度を同時に測定した場合は、サンプル空気中に含まれる CO₂ の混合比が求まるので、WPL 補正の必要はなくなる（Grelle and Lindroth, 1996）。

Tips 2.3-18

Appendix 2.3-1: 高周波補正に関する文献

- Aubinet M. *et al.* (2000) Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research*, 30, 113-175.
- Lenschow D. H. and Raupach M. R. (1991) The attenuation of fluctuations in scalar concentrations through sampling tubes. *Journal of Geophysical Research*, 96, D8, 15259-15268.
- Leuning and Judd (1996) The relative merits of open- and closed-path analyzers for measurement of eddy fluxes, *Global Change Biology*, 2, 241-253.
- Leuning R. and Moncrieff J. (1990) Eddy-covariance CO₂ flux measurements using Open- and Closed-path CO₂ analysers: Corrections for analyser water vapour sensitivity and damping of fluctuation in air sampling tubes. *Boundary-Layer Meteorology*, 53, 63-76.
- Massman W. (1991) The attenuation of concentration fluctuations in turbulent flow through a tube. *Journal of Geophysical Research*, D8, 15269-15273.
- Moncrieff J. B., Massheder J. M., de Bruin H., Elbers J., Friborg T., Heusinkveld B., Kabat P., Scott S., Seogaard H., Verhoef A. (1997) A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. *Journal of Hydrology*, 188-189, 589-611.
- Philip J. R. (1963) The damping of a fluctuating concentration by continuous sampling through a tube. *Australian Journal of Physics*, 16, 454-463.
- Suyker A. E. and Verma S. B. (1993) Eddy correlation measurement of CO₂ flux using a closed-path sensor: Theory and field tests against an open-path sensor. *Boundary-Layer Meteorology*, 64, 391-407.
- Yasuda Y. and Watanabe T. (2001) Comparative measurements of CO₂ flux over a forest using closed-path and open-path CO₂ analysers, *Boundary-Layer Meteorology*, 100, 191-208.