

2.2 オープンパス型 CO₂ / H₂O 分析計

Open-path CO₂/H₂O analyzer

2.2.1 オープンパス型分析計による CO₂ 濃度変動測定

概要

オープンパス型 CO₂ 分析計は、二酸化炭素 (CO₂) 分子が赤外域の波長を吸収することを利用して、オープンパス内 (開光路内) の CO₂ 分子数を測定する測器である。従って、分析計の一次出力値は、赤外線減衰率であり、これを製品会社・ユーザが決定した校正係数により、単位体積あたりの CO₂ 分子数 (CO₂ 密度, 単位は mol-CO₂m⁻³) に換算する。測定される物理量が CO₂ 密度であり、校正用ガスやフラックス算出過程で用いられる混合比 (単位は ppm や mol-CO₂mol-dry-air⁻¹) ではないことに注意が必要である。

オープンパス型 CO₂ 分析計 (以下、オープンパスと記す) の特徴として、2.3 節のクローズドパスと比較すると、一般に、1) 応答速度が速い、2) 消費電力が小さい、3) システム構成がシンプル、4) 測定高さの占有体積が大きい、5) 校正の自動化が困難、6) パス内の温度・圧力測定が困難であり、WPL 補正 (Webb *et al.*, 1980) と呼ばれる補正項が大きいなどの項目が挙げられる。通常、項目 1~3 はオープンパスの長所、項目 4~6 はオープンパスの短所と捉えられている。

測器の種類

これまでに商品化されたオープンパスの主な製品を Table 2.2-1 にまとめた。測定原理 (CO₂ 分子が持つ赤外線の吸収特性を利用) は、全製品に共通である。また、Table 2.2-1 の全ての分析計は、水蒸気 (H₂O) 分子の赤外線吸収帯の干渉フィルタを持ち、単位体積あたりの H₂O 分子量 [mol-H₂O m⁻³] も同時に測定できる。一般的なオープンパスの測定原理の詳細や構造は、後述する相互感度の詳細とその確認方法を含めて、Kohsiek (2000) にまとめられている。

オープンパスで CO₂ を測定する場合、H₂O の存在が CO₂ 分子の赤外線吸収特性を変化させ、CO₂ 密度測定に影響を与える効果 (相互感度または cross-sensitivity と呼ばれる) を考える必要がある (Kohsiek, 2000)。相互感度の影響は、LI-7500 (米国 LI-COR, Inc.) については、測器の演算部で処理をしているが (LI-COR, 2004)、E-009 (株アドバネット) と OP-2 (英国 ADC BioScientific Ltd.) は処理をしていない。Leuning and King (1992) と Leuning and Judd (1996) は、室内実験により E-009 の相互感度を調べているが、同じ製品 (E-009) でも、製品番号が異なれば相互感度の諸特性値も異なることが示されている。従って、E-009 と OP-2 を使用する場合は、室内実験 (例えば、Kohsiek, 2000) やコスペクトルの形状を調べて (文字, 2003)、相互感度の程度を確認し、必要に応じてその補正をする必要がある。

Table 2.2-1 オープンパス型 CO₂ 分析計。

機種	メーカー	開光路長	外径寸法* [cm]	重量 [kg]	出力信号
LI-7500	LI-COR	12.5cm	φ 6.5 × 30 (H)	0.75	0 ~ 5 V ,RS-232C ,SDM**
E-009***	アドバネット	20cm	φ 11 × 45.5 (H)	-	-5 ~ 5 V
OP-2	ADC	多重型 (20cm × 4)	φ 7.6 × 37 (H)	1.1	-5 ~ 5 V

* 外形寸法と重量は、センサヘッド部の数値。

** Campbell 社の通信プロトコル。

*** 現在は、製造を終了。

オープンパスの製品は、通常、センサヘッド部、制御・演算部、電源部より構成され、校正用のセンサフードが付属する。その他に、専用ソフトウェアなどのアクセサリが付属する製品もある。センサヘッド部と制御・演算部間のケーブルや測定値の出力信号ケーブルの長さに制限を持つ製品もあるので、製品選択の際に留意が必要である。なお、LI-7500 は、製品番号により、出力信号の遅れ時間が異なったり、測器の設置方法などに制限があるので、製品番号を把握しておく必要がある（詳細は Appendix 2.2-1 を参照）。

Tips!

製品会社から、ファームウェアのバージョンアップなどの情報がユーザへ送られてこないことがあるので、3~6ヶ月に一度、製品会社の Web サイトを訪れ、所有製品の情報を確認しておくが良い。

Tips 2.2-1

日本国内では、世界に先駆けて商品化された、国産メーカーの製品（アドバネット、E-009 シリーズ、1985 年に販売開始）が長らく用いられていた。しかし、2000 年に、LI-COR が LI-7500 の販売を開始してからは、徐々に LI-7500 のユーザが多くなり、現在（2008 年）では、国内外を問わず、LI-7500 が事実上の標準測器と成りつつある。

測定方法

(1) オープンパスの設置方法

オープンパスを設置する場合の注意点は、1) 超音波風速温度計 (SAT) の測定に影響を与えないように、かつ、2) SAT との距離を短くする (フラックスの高周波域の損失を小さくするため) ことである。この2点は、相反する関係であり、また、観測サイトごとの特徴 (主風向とその取り得る範囲) も考慮する必要があるため、標準・定式化した設置方法を述べることは困難である。ここでは、実際の設置例を示しながら、分析計の設置方法の原則を提示する。

センサヘッドの設置方法

Photo 2.2-1 に、農業環境技術研究所のグループが設置したオープンパスを示す。SAT の形状が指向性を持つ場合、その開口部 (前面) を主風向方向に向けて設置する。オープンパスは、SAT の測器の

後ろの位置を避け、また、主風向方向の反対側に設置する。つまり、オープンパス型 CO₂ 分析計を通過した空気塊が SAT を通過する頻度が少ない位置に設置する。この方式は、主風向が比較的一定な観測サイトで有効である。

💡 Tips!

SAT の「測器」の後ろの位置は避けるが、「測定パス」の若干後ろの位置に設置するのが良い。Photo2.2-1 や Campbell のマニュアル (Campbell, 2006) の Figure 3 (p. 5) を参照。

Tips 2.2-2



Photo 2.2-1 オープンパス (LI-7500) の設置状況 (真瀬水田フラックスサイト)。写真奥は、SAT (ソニック (旧カイジョーソニック), DA-600)。観測サイトの主風向は、東～南。SAT の開口部は南方向に向けてある。そのため、東から風が吹く場合 (紙面裏から表に向かう方向) でも、LI-7500 が風速測定に及ぼす影響は小さい。北風 (DA-600 の後面方向から吹く風) や西風 (LI-7500 の設置方向から吹く風) の頻度は少ない。

一方、米国 Campbell Scientific, Inc. は、オープンパスの設置位置として、SAT のパスの下方位置に、分析計を水平にした形で設置することも推奨している (Campbell, 2006)。この方式の場合、オープンパスが風速測定に及ぼす影響は小さくなり、風向の変化幅が大きい観測サイトで、(SAT の測定にとっては) 有効な設置方法である。ただし、オープンパスを水平にした場合、分析計の測定パスに平行した向きの風向では、センサヘッド端が測定の干渉をする。そのため、オープンパスにとっては、有効な測定風向範囲が狭くなるという短所も持つ。また、この位置関係におけるコスペクトル (フラックスと同義) の周波数応答特性の理解が充分でなく、高周波域のフラックス損失の補正の適用方法が制限されるという特徴も持つ (高周波域のフラックス損失については、Appendix 2.2-2 を参照)。

センサ間距離

オープンパスと SAT のセンサ間距離は、15～20cm が望ましく、30cm を上限の目安とするべきであ

る。センサ間距離を 15cm より短くすると、センサヘッドが風速測定に及ぼす影響が大きくなるため、避けるべきである。一方、センサ間距離が 30cm より長い場合は、高周波域のフラックスの損失量が大きくなり（特に草地のような植生高の低い生態系）、損失量補正の不確実性が増すため、これも避けるべきである。

センサ間距離の測定は、オープンパスの測定パスの中心と SAT の測定パスの中心の距離を測る。このとき、パス中心間の距離の絶対値だけではなく、SAT のパス中心から、東西方向に何 cm、南北方向に何 cm 離れているかの情報も記録する（あるいは SAT のパス中心を基準として、どの方位にオープンパスが位置しているかを記録する）。これらの情報は、高周波域のフラックス損失の補正やデータの品質管理に必要となる。両パスの中心が、高さ方向に離れている場合は、その情報も記録した方がよい。現在は、高さ方向のパス間距離に起因するフラックス損失の研究（周波数応答特性や損失量の補正方法など）は充分でないが、将来、研究が進み、損失量の補正が必須となり、適切な補正方法が提示されるかもしれない。

オープンパスは、主に校正のために、センサヘッドの一時的な取り外し・取り付けが行われる。そのような取り外し・取り付けを行っても、SAT との位置関係が変わらないような設置方法を採用するのが良い。その場合、フラックスの損失量の特性がセンサヘッドの取り外し・取り付け前後で変化しないこと、センサ間距離の測定が一回だけで良いことなどの利点がある。

センサヘッドの固定方法と設置角度

上記に述べた SAT に関連した注意点の他に、オープンパスの固定方法と設置角度も考慮する必要がある。LI-COR (2004) は、オープンパスのセンサヘッドが特定の周波数で振動した場合、測定に影響を及ぼすことを述べている。そのため、センサヘッドの振動を抑えるように確実に固定する必要がある。

Tips!

LI-7500 は、センサヘッドに取り付け用の軸とボルトが付属している (LI-COR, 2004)。しかし、取り付け用の軸とボルトを用いて接続するだけでは、固定の力が弱い。Campbell (2006) で示されている取り付け器具 (crosscover Nu-Rail fitting) や Photo2.2-1 で使用している取り付け金具 (デベマウント)、U 字ボルト等で確実に固定すると良い。

Tips 2.2-3

オープンパスの設置角度の選択肢として、1) 垂直、2) わずかに傾ける (10~15 度)、3) 傾ける、4) 水平、がある。著者は、「2) わずかに傾ける」を推奨したい。この設置角度を採用した場合のメリットは、以下の通りである。

オープンパスの測定に関する気流の乱れが小さい (水平方向に関しては、指向性がない)。

雨滴が流れやすい (パス端のレンズに雨滴が溜まりにくい)。

測定パスの平滑化に関する周波数応答特性の知識が確立されている (センサヘッドは近似的に

垂直に設置されていると見なす)。

LI-7500 を使用した場合、センサヘッドが垂直に設置されていると見なすと、Burba *et al.* (2008) が提示している分析計の熱源問題の補正式が適用できる(熱源問題の詳細は、Appendix 2.2-3 を参照)。

また、デメリットは、以下の通りである。

オープンパスの方向から風が吹く場合、SAT の測定に干渉する(ただし、主風向を考慮して適切な位置に設置すれば、このデメリットは小さくなる)。

LI-7500 を使用した場合、製品番号 0282 以前の製品では、直達日射が測定に影響を及ぼす(Appendix 2.2-1 を参照)。

設置角度として、1) 垂直を選択すると、パス端のレンズに雨滴が溜まりやすくなる。設置角度として、3) 傾けるや 4) 水平を選択すると、(相互の位置関係にもよるが) SAT の測定に干渉する程度は小さくなり、また、分析計の熱源問題が緩和される可能性がある。しかし、オープンパスを水平にした(あるいは傾けた)状態の(コ)スペクトルの周波数応答特性は不明な部分が多く、高周波域のフラックス損失補正の適用がしにくくなるデメリットがある(Appendix 2.2-4 を参照)。

(2) 出力信号の記録方法

出力信号をアナログの電圧値で記録する場合は、ノイズの影響に注意し、必要に応じて、ローパスフィルタの使用やデジタルフィルタの適用を行う。LI-7500 を使用している場合は、Campbell の通信プロトコル(SDM)による記録を強く推奨する。アナログ出力のようにノイズの影響を懸念しなくて良いだけでなく、分析計の動作情報も同時に記録できるからである。特に、AGC(Automatic Gain Control)という、測定パス内の干渉物(雨滴やレンズに付着した埃、花粉など)に対応して変化する値は、データ取得後の品質管理の際に有用な情報となる。

出力信号の記録時には、信号の遅れ時間にも注意する必要がある。LI-7500 は、センサヘッド部で測定を行った後、制御・演算部での処理に時間を要し、出力形式に応じた遅れ時間が生じる。製品マニュアル(LI-COR, 2004)によれば、電圧出力時は 0.240 秒、SDM と RS-232C 使用時は 0.186 秒の遅れ時間があり、専用ソフトウェアにより、0.0065 秒単位で遅れ時間を増加させることができる。つまり、出力信号を、SDM 形式、0.1 秒間隔で記録している場合、遅れ時間を 17 単位(0.0065 秒×17=0.1105 秒)増加させれば、出力信号の総遅れ時間は 0.297 秒(0.186 秒 + 0.1105 秒)となり、データ数として 3 個分(0.297 秒 / 0.1 秒)の遅れとなる。従って、SAT の遅れ時間がゼロの場合は、LI-7500 のデータ時系列を 3 個移動させれば、両者の測定時刻が(ほぼ)一致する(0.3 秒 - 0.297 秒 = 0.003 秒のずれ。この 0.003 秒のずれは、ほとんどの観測サイトで無視できる値である。)このように、LI-7500 を使用した場合、信号の出力形式、SAT の遅れ時間、データの記録間隔に応じて遅れ時間を調整し、システムとして適切な総遅れ時間を決定する必要がある。

E-009 と OP-2 は、製品マニュアルに出力信号の遅れ時間の記述は見られない。従って、オープンパスの遅れ時間はゼロとするか、クローズドパスのようにオープンパスと SAT の出力信号を移動させながら相関係数が最大となる時系列の組み合わせを求めるか、どちらかを採用して解析する。後者を採用した場合、風向方向のセンサ間距離に起因するフラックス損失補正(の一部)を適用したことに相当するので、フラックス計算時に過補正とならないように注意する。

以上に述べた出力信号の遅れ時間がフラックス計算に及ぼす影響は、コスペクトルの高周波域の寄与が大きい観測サイト（例えば、草地など）で大きいので、そのような観測サイトでは、特に注意が必要である。

(3) メンテナンス

オープンパスのメンテナンスは、特に難しいことはない。定期的に観測サイトを訪れ、下記の項目を確認する。

信号出力が正常な範囲内かどうかをセンサの表示パネルや記録計で確認する。異常な場合は、測定パスのレンズの汚れ（下記参照）、ケーブルや信号線の接触不良、供給電源・電圧の異常、ヒューズの断線、制御・演算部の周辺環境の異常（高温、雨滴等の水の侵入）、ケーブルや信号線の断線、乾燥剤等の薬剤を使用している場合は薬剤の劣化、LI-7500 の場合はセンサの診断情報（SDM 使用時は Diagnostic value を確認。または、センサとパソコンを専用ソフトウェアを用いて接続する。）を確認する。

測定パスのレンズを水とキムワイプ（米国 Kimberly-Clark Corporation）等を使用して清掃する（レンズの埃を取り除く）。目視では、レンズが汚れていないように見えても、細かい埃が測定に影響を与えている可能性があるため、汚れの有無に関わらず、10日～1ヶ月に1回程度の定期的な清掃を推奨する（測定パスのレンズの汚れが測定に及ぼす影響については、Appendix 2.2-5を参照）。レンズには必要に応じて、撥水コート（例えば、米国 Pennzoil-Quaker State Company の Rain-X など）を塗布すると良い。

(4) その他

オープンパスを使用して CO₂ フラックスを算出する場合、CO₂ 密度の絶対値（時間平均値）が必要となる。オープンパスでも CO₂ 密度の絶対値測定は可能である。しかし、オープンパスは測定パスが大気中に解放されているため、測定パス端のレンズが汚れやすい。このレンズの汚れは、CO₂ 密度の絶対値測定に影響を与える（詳細は、Appendix 2.2-5を参照）。従って、可能であれば、クローズドパスで CO₂ 密度（または CO₂ 混合比）の絶対値を測定することが望ましい。時間平均の絶対値を測定することが目的なので、応答時間は遅くても構わないが、絶対値が信頼できる分析計を用いる。次善の策として、別の湿度センサ（例えば、フィンランド VAISALA, Oyj. 製の HMP45 など）で測定した水蒸気量とオープンパスで測定した H₂O の時間平均値の時系列を比較しながら、レンズの汚れの程度を推定し、CO₂ 密度の絶対値のオフセットを補正する方法も提案されている（Serrano-Ortiz *et al.*, 2008）。

校正

本節冒頭でも述べたが、オープンパスの測定量は CO₂ 密度 [mol-CO₂m⁻³] である。一方、通常、校正に用いられるボンベは混合比 [ppm] の単位を使用している（Appendix 2.2-6を参照）。従って、使用したボンベの混合比を、オープンパスの測定セルの温度と圧力を用いて CO₂ 密度に単位換算し、その値とオープンパスの出力を比較して、分析計の校正係数や感度、オフセットを決定する必要がある。LI-7500 は付属の校正用フードにサーミスタが付いており、制御・演算部内に配置された圧力計を用いて校正用ボンベの単位換算が容易に行える（別途、圧力計を用意すれば校正用フード内の圧力測定

も可能である)。E-009, OP-2 を用いる場合は、付属の校正用フード内(あるいはフード外壁面)に温度センサを取り付けて温度を測定し、圧力計で測定した校正場の圧力(あるいは 101.3 kPa などの定数)を用いて校正用ポンベの単位換算を行う。

校正の頻度も重要なポイントである。農業環境技術研究所の観測グループは、Table 2.2-1 に示したオープンパスの十分な使用経験を持ち、それらの使用の情報蓄積から、E-009 と OP-2 は、1~3 ヶ月に 1 回の校正、LI-7500 は、年に 1~2 回の校正が、総合的に考えて、適当な校正頻度である(各オープンパスの校正結果の安定性などは、小野ら(2003)や小野ら(2007)に示されている)。オープンパスの校正は、慣れると、分析計の暖気時間も含めて 5~6 時間程度で終わることができる。つまり、オープンパスを夕方持ち帰り、夜間に校正を行い、翌日の朝に観測サイトに取り付けることができる。しかし、校正に慣れていない場合は、校正のやり直しなども必要となるため、校正に 1~2 日要すると考えた方がよい。校正期間中は、データが欠測となるので、フラックスデータの重要な時期を考慮し、計画的に校正を行うべきである。

校正の頻度にも増して重要なのは、測定パスのレンズの清掃である(測定方法(3)メンテナンスおよび Appendix 2.2-5 を参照)。特に、LI-7500 を使用した場合は、分析計自体の感度やオフセットの変化よりも、レンズに付着した汚れに起因するオフセットの変化が大きいため、定期的なレンズの清掃を心がける必要がある。

以下では、LI-7500 の使用を念頭に H₂O の校正も含めて、(1)校正に必要な機器と(2)校正の作業手順を示し、最後に、(3)E-009 と OP-2 の校正について述べる。なお、本節では、感度は、測定量(校正用ポンベの混合比値)の変化に対する指示量(出力値)の変化の割合で、単位は無次元または V(mol-CO₂m⁻³)⁻¹、オフセットは、ゼロガス供給時の指示量(出力値)で、単位は ppm, mol-CO₂m⁻³ または V を意味することとする。

(1) 校正に必要な機器

校正用標準ガス

CO₂ について、ゼロ CO₂, 300~350ppm 程度、500~700ppm 程度の 3 種類のポンベを用意する(3 種類より多くてもよい。少なくともゼロ CO₂ と 500~700ppm(森林では 400~500ppm)程度の 2 種類を用意する)。通常、標準ガスの H₂O 含量はゼロなので、いずれのポンベもゼロ H₂O と兼用できる。またバランスガスの種類は窒素よりも Air バランスのポンベを使用した方がよい。

Tips!

CO₂ の標準ガスとは定量(検定)された CO₂ 濃度を持つガスである。CO₂ 以外の充填ガスをバランスガスと呼ぶ。一般的なバランスガスとして、窒素(N₂ バランス)や空気(Air バランス)が挙げられるが、大気中の CO₂ 濃度測定においては、空気をバランスガスとした標準ガスの使用が良い。これはバランスガスの差異によって赤外線吸収特性が変わるからである。

Tips 2.2-4

ゼロ CO₂ およびゼロ H₂O については、薬剤によるゼロ生成ガスを用いてもよい。用いる薬剤として、

何種類か候補が挙げられるが、それらの特徴は、LI-COR (2003) にまとめられている。LI-COR (2003) では、ゼロガス (CO₂ と H₂O) として、ソーダライムと過塩素酸マグネシウムの組み合わせを推奨している (薬剤を通過する空気の流れは、ソーダライムが先、過塩素酸マグネシウムが後である)。

圧力調整器

ポンペからのガス圧を 0.1MPa (= 1.1kgfcm⁻², 15psi) 程度に調整できる 2 次圧調整用ネジが付属する物が良い。使用するチューブに合わせた適切なフィッティングを揃える。

チューブ

通常、フッ素樹脂製 (テフロンなど) の外径 6mm, または外径 1/4inch のチューブが用いられる。チューブの長さは、配管時の取り回し作業に支障がないように、適切な長さにする。H₂O 校正用のチューブは、チューブ内の結露を避けるため、できるだけ短くする。

流量計

流量 1Lmin⁻¹ 前後の数値を確認でき、0.1Lmin⁻¹ 程度の単位で調節できる物が良い。浮き子式 (フロート式) の流量計を用いることが多い。

露点発生器

通常、H₂O の校正には、露点発生器が用いられる。フラックス観測研究分野では、LI-COR の露点発生器 (LI-610) が事実上の標準となっている。LI-610 は、装置内に浮き子式の流量計を持っているため、LI-610 と校正用フードは 1 本のチューブで接続する (途中で流量計を接続すると、結露・漏れが生じる可能性が高くなるので避けた方が良い)。

その他

LI-7500 に付属する校正用フード、専用ソフトウェア (LI7500.exe, 以下 LI-7500 ソフトウェアと記す) をインストールしたパソコン、制御・演算部とパソコンの接続ケーブル (Serial ケーブル) を準備する。校正用フード内の圧力を測定する場合は、圧力計 (気象観測に用いられる通常の気圧計が良い。例えば、VAISALA の PTB210 など) も準備する。

(2) 校正の作業手順

観測サイトで使用している LI-7500 を校正する場合の手順を示す。校正は、作業の目的に応じて、3 段階に大別でき、それぞれ、Step 1, Step 2, Step 3 とする。以下に、校正の準備・全体の注意点と、各 Step の作業手順を示す。

校正の準備・全体の注意点

校正に必要な機器を持ち込めば、観測サイトの屋外での校正も可能である。しかし、校正時の外部環境の変化など校正結果に影響する不確実な要因が増えるため、屋外での校正は避けた方が良い。LI-7500 のセンサヘッドと制御・演算部を取り外して、室内で校正することを推奨す

る。

チューブの接続部に漏れがないように注意して、校正に必要な機器を接続する。ゼロ CO₂ ガスを流しているときに、センサヘッド周辺やチューブ接続部に呼気を吹きかけ、漏れがないことを確かめる（CO₂ の出力が変化しないことを確認する）。

校正用フードを装着しない状態で、AGC の出力をパソコンで確認する。次に、校正用フードを取り付け、AGC に変化がないことを確認する（校正用フードの装着位置が不適切な場合は、AGC が増加する）。また、校正用ガスの供給の開始直後と停止直前にも AGC を確認し、校正用フードの位置がずれていないことを確かめる。なお、H₂O ガス供給時は、校正用フードが適切に装着されていても、非装着時より AGC が 10 程度増加することがある。

流量は、0.5～1.0Lmin⁻¹ 程度にする。校正用ガスの供給開始後に流量を調節した後、停止直前にも流量を確認する。

CO₂ の場合、校正用ガス供給後、5～10 分以下で出力が安定する。H₂O の場合、校正用ガス供給後、10～30 分程度（場合により、それ以上）で出力が安定する。特に、H₂O（含量）ガスを流した後に、ゼロ H₂O を流した場合、H₂O の出力が安定するまでに時間がかかることが多い。解析には、校正用ガス供給時間の最後の 1～3 分間の、出力が安定しているデータを使用する。H₂O 校正時の露点温度の設定は、チューブ内の結露を防ぐため、周辺温度より 3～5 低い値を超えないようにする。

ごくまれにだが、校正用ガスを供給し、ある程度の時間が経過した後、LI-7500 の出力が突然数 ppm 変化する。この出力の変化は、測器のクーラー電圧（Cooler Voltage）の変化に伴って生じた。校正中（特に下記 Step 2）は、出力をパソコンの表示で確認し、出力の突然の変化が生じていないことを確かめる。

LI-7500 は、検出器周辺の CO₂ と H₂O をゼロにするために、センサヘッド内部に薬剤（ソーダライムと過塩素酸マグネシウム）のボトルを 2 つ保持している。製品マニュアル（LI-COR 2004）によれば、薬剤は、年に 1 回程度の頻度で交換し、交換後は暖機運転を（少なくとも）4 時間する必要がある。これまでの経験では、薬剤の劣化の進行は遅いので、薬剤の交換は数年（2～3 年以下）に 1 回程度で充分であるが、ゼロ出力を安定させるための薬剤交換後の暖機運転は数日（1～3 日）必要と考えている。

校正の終了後に、センサヘッドの測定パス端のレンズに撥水コート（例えば、Rain-X など）を塗布して、雨滴の付着を予防する。

校正の各ステップ

Step 1

Step 1 の目的は、観測サイトで使用していた状態の LI-7500 の感度・オフセットを調べることである。使用する校正用ガスは、CO₂ と H₂O について、ゼロと 1 種類以上のスパンガスである。

まず、観測サイトから持ち帰った状態、つまり、測定パス端のレンズを清掃しない状態で、校正用ガスを供給し、センサ出力を確認する。レンズの汚れを除去しないように、始めに CO₂、次に H₂O の順にガスを流すと良い。この作業により、レンズの汚れも含め、観測サイトで使用していた状態の LI-7500 の感度・オフセットが決定できる。感度のずれは小さい（1～3%以下）が、オフセ

ットは 10ppm 前後生じることがある。

次に、測定パス端のレンズを水・キムワイプ等で清掃し、レンズを乾燥させてから、再度校正用ガスを供給し、センサ出力を確認する。CO₂、H₂O のどちらのガスが先でも良い。この作業により、LI-7500 本来の感度・オフセットの変化が確認できる。感度とオフセットともにずれは小さいことが期待される（感度は 1～3 % 以下、オフセットは数 ppm 程度の違い）。

Step 2

Step 2 は LI-7500 の制御・演算部の内部の係数を変更する作業であり、製品マニュアル(LI-COR, 2004) の 4 章 (Section 4. Calibration) に記されている校正作業である。

始めに、H₂O と CO₂ のゼロガスを流し、出力が安定してから、LI-7500 ソフトウェア上でゼロ校正を行う。このとき、H₂O を先、CO₂ を後の順に行う。次に、露点発生器を用いて高 H₂O ガス（周辺温度から 3～5 低い露点温度）を流して、出力が安定してから、LI-7500 ソフトウェアでスパン校正（H₂O）を行う。最後に、高 CO₂ ガス（通常、農地・草地では 500～700ppm、森林では 400～500ppm）を流して、出力が安定してから、LI-7500 ソフトウェアでスパン校正（CO₂）を行う。Step 2 の作業前後に、校正により変更される内部係数（Z と S 値）を野帳に記録するか、パソコンに校正係数の情報を取り込んで、必要時に備える。

Step 2 では、必ず、ゼロ校正を先に行い、その後にスパン校正を行う。H₂O は、CO₂ の出力に影響を与えるので、念のために、H₂O 校正を先に実施する。（CO₂ 校正時の供給ガスに含まれる H₂O はゼロなので、原則的には校正の順序は結果に影響しない。しかし、H₂O に大きなオフセットが生じている可能性もあるので、先に H₂O を校正した方が確実である）。

Step 3

Step 3 では、Step 2 で実施した制御・演算部の内部係数が適正であるかどうかの確認と、次回校正時の Step 1 の参照用の校正作業である。

Step 3 では、Step 1 と同様に、CO₂ と H₂O について、ゼロと 1 種類以上のスパンガスを供給して、出力を確認する。Step 2 の校正作業が適切であれば、校正用ガスと LI-7500 の出力の違いは小さいはずである（CO₂ の場合、1ppm 以下、H₂O の場合、露点温度で 0.2～0.3 以下程度）。

なお、Step 2 で使用した校正用ガスと LI-7500 の出力の差は小さいが、それ以外の校正用ガスを供給した場合、差が大きくなることもある。例えば、700ppm の校正用ポンペを用いて Step 2 を実施した場合、Step 3 で 350ppm の校正用ガスを供給すると、LI-7500 との差が 1ppm 程度になることがある。

供給した校正用ガスと LI-7500 の出力の差が大きい場合（目安として、CO₂ の場合は 2～4ppm 以上、H₂O の場合は露点温度で 0.2～0.5 以上の差）、再度 Step 2 と Step 3 を実施する。

(3) E-009 と OP-2 の校正

E-009 と OP-2 は、基本的には、分析計内部の校正係数を変更する作業はない（両オープンパスとも、制御・演算部でゲイン調整は可能であるが、通常は調整せずに使用する）。従って、LI-7500 の Step 1 に相当する校正作業を定期的実施して、分析計の感度とオフセットを決定する。校正の準備や全体

の注意点, Step 1 の手順は LI-7500 に準じるが, 以下の点に注意が必要である。

両オープンパスともに, 校正用フードが付属するが, 校正用ポンベの値の単位換算のための温度・圧力の測定ができない。そのため, 熱電対やサーミスタを用いて, 校正用フード内部の温度 (またはフード外壁面の温度) を測定する必要がある。圧力は, 校正用フード近辺の測定値があることが望ましいが, 101.3 kPa 等の定数を与えても近似的には問題ない。両オープンパスとも, 極端な低温環境下では感度が変化することが報告されている (Miyata and Mano, 2002)。製品マニュアルに記載されている使用温度範囲を超えた条件で使用する場合は, 事前に感度・オフセットの温度依存性を確認する必要がある (この点は, LI-7500 も同様である)。

E-009 は, 製品マニュアル(アドバネット, 1996)によれば, 校正用ガスの流量は約 5Lmin⁻¹ である。

OP-2 は, センサヘッド内部に温度センサを持ち, その出力も可能であるが, これは CO₂ と H₂O の出力ドリフトの補正用である。そのため, その値を校正時の校正用フード内の温度と近似することは避けた方がよい (上述したように, 別途, 温度計を用意した方がよい)。OP-2 は 製品マニュアル(ADC, 2003)によれば, H₂O に対する出力は二次式で表されるので, 3 点以上の H₂O ガスで校正する必要がある。

最後に, 校正結果の観測データへの適用について述べる。観測の特定期間を挟んで, オープンパスの感度やオフセットが大きく変化した場合に, 校正結果をどのように取得データに適用するかという問題である。

感度の変化は, フラックス (共分散) の計算に影響するので, 深刻な問題である。CO₂ 密度 (混合比) を別のクローズドパスで測定していれば, オープンパスの CO₂ 密度の時間平均値と比較することにより, 感度の変化を評価できる可能性がある。クローズドパスの測定がされていない場合 (あるいは比較による感度変化が評価できなかった場合) は, 1) 得られた感度の値を, 特定の時期を区切りとして適用するか, 2) 得られた感度に対して算術処理を適用するか, どちらかを採用する。前者の場合, まず, 感度が大きく変化するイベント (例えば, 停電など) があれば, その日を区切りとすることを検討する。そのようなイベントがなければ, 校正を実施した日で区切るか, 両者の校正実施日の中間の日を区切りとする。後者の算術処理を適用する場合, 得られた 2 つの感度の平均値を用いるか, 両感度の差を時間 (日数) に比例して配分するという 2 つの方法がある。いずれにしても, この問題に対する明確な回答はないので, 感度の変化量やその観測期間等を総合的に考察して, 適用する感度を決定する。

オフセットの変化は, 共分散の計算に影響しないので, CO₂ 密度 (混合比) を別のクローズドパスで測定していれば, 最終的なフラックス算出についての問題はない。クローズドパスの測定がされていない場合は, 別の湿度センサで測定した水蒸気量とオープンパスの H₂O 出力を比較して, オフセットの変化が評価できる可能性がある (測定方法 (4) その他や Appendix 2.2-5 を参照)。いずれの方法も採用できない場合は, 感度が変化した場合と同様の処置を採る。

 **Tips!**

観測の特定期間を挟んで校正結果（感度とオフセット）が大きく変化した場合、まず、両者の結果を適用してフラックスを算出し、校正結果の違いがフラックス値にどの程度影響するかを調べることは重要である。また、得られたフラックス値と気象要素の関係（例えば、光 - フラックス）を図示すると、特定の時期を境にして両者の関係が変化することが読み取れ、感度・オフセットの変化時期を決定する際のサポートとなることがある。

Tips 2.2-5

2.2.2 オープンパス型分析計による H₂O 濃度変動測定

概要

水蒸気 (H₂O) をオープンパス型（開光路型）の分析計で測定する場合、測定原理として、H₂O 分子が赤外線域の放射を吸収する特性を利用した測器が挙げられる。この測定原理を用いた場合の利点は、適切な波長域を透過する干渉フィルタを選択することにより、二酸化炭素 (CO₂) も同時に測定できることである。そのため、現在（2008年）のフラックス観測研究分野では、H₂O と CO₂ を同時に測定できる赤外線吸収型オープンパス H₂O / CO₂ 分析計（以下、オープンパス IRGA と呼ぶ。IRGA は Infra-Red Gas Analyzer の略。）を用いた観測が主流となっている。測器の入手の容易さ、測定やフラックス計算に関する情報の豊富さなどの観点からも、H₂O フラックス（または潜熱フラックス）観測に使用する測器の第一候補は、オープンパス IRGA である。

赤外線吸収型以外のオープンパス型 H₂O 分析計としては、H₂O 分子が紫外線域の放射を吸収する特性を利用した測器が挙げられる。また、厳密にはオープンパス型ではないが、熱電対を利用した H₂O 測定方法もある。しかしながら、これらの方法の普及度は高くなく、また、長期連続観測には不向きな点もあるので、特別な研究目的・理由のあるケースを除けば、新たに観測システムを構築する場合は、オープンパス IRGA の採用を推奨したい。

測器の種類

オープンパスとは、試料ガスの測定部分が大気中に解放（オープン）されているタイプのガス分析計の総称である。通常、測定原理として、気体分子（ここでは、H₂O や CO₂）が特定の波長の放射線を吸収する特性を利用している。具体的には、光源部から一定量の赤外線（または紫外線）を射出し、検出器でその放射量を測定して、その減衰量から測定パス間（光源部～検出器の間）の気体分子の量を算出する。一般に、オープンパスのガス分析計は、クローズドパス型のガス分析計に比べて応答速度が良く、10～20 Hz 程度の高速度サンプリングが可能であり、気体分子量の変動成分を精度良く測定できる。ただし、測定パスが大気中に解放されていて、光源部・検出器が周辺環境の影響を受けやすいということもあり、気体分子数の絶対値を長期間、安定して、正確に測定することは不得手として

いる。

H₂O 測定オープンパスは、用いる放射線の波長により、赤外線吸収型（オープンパス IRGA）と紫外線吸収型に分類できる。概要でも述べたが、オープンパス IRGA は H₂O と CO₂ を同時に測定でき、現在の主流のガス分析計となっている。紫外線吸収型の項で後述するような特別な理由がなければ、H₂O フラックス観測には、オープンパス IRGA を用いることを推奨したい。その他に、熱電対を用いて H₂O（フラックス）を測定する手法もある。この手法は、厳密にはオープンパスではないが、本節で簡単に紹介する。以下では、各タイプのセンサの特徴をまとめる。

（1） 赤外線吸収型

赤外線吸収型オープンパス（オープンパス IRGA）については、測器の特徴や設置方法、メンテナンス、校正方法の詳細が、市販の測器の紹介とともに CO₂ の小節（2.2.1「オープンパス型分析計による CO₂ 濃度変動測定」）で記述されているので、そちらを参照されたい。

（2） 紫外線吸収型

紫外線吸収型オープンパスは、紫外線が H₂O により吸収される特性を利用したガス分析計である。用いる紫外線の波長（Lyman-alpha 線）や光源（Krypton 管）により、Lyman-alpha 湿度計や Krypton 湿度計とも呼ばれる。紫外線は赤外線よりも強い H₂O 吸収特性を持つため、測定パス長を数 cm 程度まで短くでき、オープンパス IRGA よりも高解像度の空間平均の H₂O 測定が可能である（後述する Campbell の KH20 のパス長は約 1cm であり、オープンパス IRGA の 10～20 分の 1 程度のパス長である）。そのため、植物群落内の乱流輸送や消散率の測定など、短い測定パス長が要求される研究を行う場合に、採用の候補となる。一方、連続観測という観点からは、紫外線吸収型オープンパスは、光源の寿命が短かったり、紫外線の減衰量から H₂O 密度に変換する校正係数の変動が大きかったりするので、長期間（～年単位）の観測を、メンテナンスに労力を投資せずに行うことは困難である。また、紫外線吸収型オープンパスは、酸素の水蒸気に対する相互感度（cross-sensitivity）の補正が必要である。この補正の詳細は、van Dijk *et al.*（2003）で紹介されている。

現在、入手が容易な紫外線吸収型オープンパスとして、Campbell の KH20 が挙げられる。日本国内の販売価格は約 110～120 万円（太陽計器株取扱、2008 年 11 月の情報）で、2.2.1「オープンパス型分析計による CO₂ 濃度変動測定」で紹介されているオープンパス IRGA よりは安価である。そのため、比較的低コストで H₂O フラックスのみの観測システムを構築したい場合、また、前述したように、短い測定パス長が要求される研究を行う場合に、採用の候補となる（ただし、長期間の連続観測は不得手であることに留意は必要である）。

紫外線吸収型オープンパスの設置方法については、オープンパス IRGA に準じるので、2.2.1「オープンパス型分析計による CO₂ 濃度変動測定」を、校正方法や測器のメンテナンスについては、製品マニュアルを参照されたい。

（3） 熱電対型

オープンパスと異なり、大気中の H₂O を直接感部で測定する方法が、熱電対を用いる方法である。手法として、乾湿球熱電対を使用する方法と、SAT と組み合わせる方法がある。

乾湿球熱電対を使用する方法

直径 50 ~ 100 μ m 程度の細い素線の熱電対（細線熱電対）を用いて乾球と湿球を作成し、両者の温度差から H₂O を測定する。熱電対の部材としては、銅 - コンスタタン、クロメル - コンスタタン、クロメル - アルメルなどの組み合わせがある。（初心者が完成度の高い測器を作成するのは困難だが）自作が可能であり、安価に観測システムを構築できる。作成方法は、3.3「気温」および、森林立地調査法（1999）や農業気象の測器と測定法（1997）などを参照されたい。また、温度測定値の信頼性は高いこと、測器の感部が小さく、感部の空間的な広がりを考慮しなくて良いこと、SAT の風速測定に及ぼす影響が少ないことなども利点である。一方、メンテナンスに労力が必要で長期観測には向かないこと、乾球と湿球の温度の応答特性が異なり補正が必要なこと（Tsukamoto, 1986）などの不利な点も持つ。そのため、研究観測の目的が、H₂O フラックスのみで、測定期間が短く、かつ、安価に観測システムを構築したい場合に、採用の候補となる手法である。

SAT と組み合わせる方法

2.1「超音波風速温度計」でも述べられているが、SAT で測定される温度は大気中の H₂O の影響を含んだ音仮温度である。従って、別の測器で、気温を測定すれば、音仮温度との差から H₂O を算出できる。用いる測器として、直径 25 ~ 50 μ m 程度の熱電対やタングステン抵抗線、白金線、サーミスタが候補となる。理論的には、各測定項目を精度良く測定できれば、H₂O フラックスも精度良く算出することができ、短期間であれば観測結果の報告例もある（例えば、花房ら、2005）。しかし、この手法による長期間（数ヶ月以上）の H₂O フラックス観測の報告例はなく、また、別の手法で算出した H₂O フラックスとの間に差が生じるケースもあり（例えば、郡司ら、2008；松岡・林、2008）、測定手法としては、研究・開発段階の手法である。そのため、現時点（2008 年）では、H₂O フラックス測定的手法として、候補に挙げることは難しい手法である。

2.2.3 オープンパス型分析計を取り巻く 2011 年の状況

オープンパスに関する知識・技術の進歩は目覚しく、本章の最初の執筆時（2008 年）から 3 年が経過した現在（2011 年）、測定上の困難（熱源問題）を克服する新機器が 3 製品販売されている。この追加の節では、熱源問題を取り巻く最近の状況を簡単に述べ、新規に販売された 3 製品を、それぞれの特徴とともに紹介する。

熱源問題とは、Appendix 2.2-3 で説明したように、オープンパスが熱源となり、SAT で測定した顕熱フラックス H とオープンパスの測定パス内の顕熱フラックス H_{op} が異なることに起因する誤差である。この差（ $H = |H - H_{op}|$ ）が生じていることは、植物の非活動期間に吸収 CO₂ フラックスが観測された結果（例えば、Harazono *et al.*, 2000）やクロードパス（ H を考慮しなくて良い）で測定した CO₂ フラックスとの比較（例えば、Hirata *et al.*, 2005）、オープンパスの測定パス内の温度変動の測定（例えば、Grelle and Burba, 2007；Ono *et al.*, 2008）などの研究により、フラックス観測分野の共通認識となりつつある（Appendix 2.2-7 も参照）。 H の評価、すなわち、補正方法は、特定の機器（LI-7500）についてのみであるが、機器表面の熱収支解析にもとづく式が提案されている（Burba *et al.*, 2008；

Heusinkveld *et al.*, 2008) 。Burba *et al.* (2008) の補正は、既得データに対しても簡便に適用できるような汎用性を意図した方法であるが、機器を垂直に設置した状態の導出式であり、幾つかの状況を簡略化していることなどの不確実性が残されている。Heusinkveld *et al.* (2008) の補正は、反復計算が必要であるが、測定パス端のレンズ上の凝結量を評価するための潜熱項や SAT とオープンパスの両測定パスの温度差などを考慮しており、機器を垂直または水平に設置した状態に適用できる方法である(ただし、設置状態として広く採用されている、機器を傾けた状態には適用できない)。AsiaFlux Workshop 2009 では、Barriers in Flux Measurements というセッションで、補正方法の提案者の一人である Burba 博士を交えて、熱源問題について議論がなされ、低温環境下では補正項が過小評価である可能性が指摘された(大久保ら, 2009 に議論の簡単な内容が報告されている)。同ワークショップでは、シミュレーションを用いて、Burba *et al.* (2008) の補正項が高風速条件下で過大評価となることを指摘する報告(Ono *et al.*, 2009) もされており、 H の評価方法は定まっていない。そのため、例えば、Amiro (2010) では、CO₂ フラックスの積算値を、Burba *et al.* (2008) の補正項をそのまま用いた場合と 50% 減少させた場合について計算し、両者を比較するなどの解析を行なっている。また、熱源問題、すなわちオープンパスの測定パス内の温度と気温の差は低温環境下で大きくなるため(気温-10 の場合、両者の差は 4 または 10~12 となる可能性を Burba *et al.* (2005) が報告している)、気温が氷点下(あるいは-10 以下)のデータのみ Burba *et al.* (2008) の補正方法を適用したり、欠測値としたりする処理も行われている(Mkhabela *et al.*, 2009; Amiro, 2010)。このように、従来のオープンパスを用いた観測に熱源問題が生じていることは共通の認識となりつつあるが、その取り扱いについては試行錯誤しているのが現在(2011年)の状況である。

研究者による熱源問題の現象解明への取り組みと並行して、製品会社により、従来のオープンパスを改良し、熱源問題を解決する努力も行われてきた。熱源問題(H の大きさ)を解決するには、以下に示す三つの対策が考えられ、2010年に、二番目と三番目の対策にもとづく3製品が販売された。

一つ目の対策は、 H が生じることを受け入れる代わりに H_{op} を直接測定し、CO₂ フラックスの計算には H でなく H_{op} を用いる方法である。Grelle and Burba (2007) は、LI-7500 の測定パス内の温度変動を測定するために、直径 0.1mm の細線の温度計(白金線抵抗測温体)を測定パスの支柱に取り付けた。この温度計から求めた顕熱フラックス(H_{op})を用いて計算した CO₂ フラックスは、クローズドパス(LI-COR 製 LI-6262)で求めた CO₂ フラックスと良く一致し、熱源問題に対する適切な対策であることが示された。この細線の温度計(熱電対による測定も含む)を用いる対策は、従来のオープンパスにも適用でき、温度計の取り付けは研究者自身が行うことが可能で、比較的安価にシステムを構築できる。しかし、細線のために感部が強風や降水により破損しやすく、経年劣化も生じるため、安定した長期の連続観測には不向きという短所がある。これら短所は、現在、この対策を用いた製品の販売がされていないことの一因と推測される。

二つ目の対策は、できるかぎり H を小さくする方法である。 H の生じる原因は、機器が熱源となっていることであり、それは主に、機器内部からの発熱と日射・長波の放射に起因するものに分けられる。前者の発熱量を軽減するには、機器の消費電力を小さくすること、後者の放射の影響を小さくするには、機器の形状を工夫すること(具体的には、放射を受ける面積の低減など)により達成できる。LI-COR 社は、LI-7500 の後継機として、LI-7500A を販売した。LI-7500A は、機器内部の温度セット機能を持ち、気温に応じて、温度を 5 と 30 に設定できる(LI-COR, 2011a)。冬季・夏季な

どの季節ごとに適切な温度セットを行うことにより、通常気温条件下(-20~40℃)では、消費電力12Wでの動作が可能となっている(条件によっては最小8Wでの動作も可能なようである。詳細は販売店に要問い合わせ)。Campbell社は、同社のSATであるCSAT3と組み合わせて使用できるオープンパス(EC150)を開発した。EC150は、低消費電力(温度条件25℃で4.1W)であり、機器内部の温度変化を補正した測定値が出力され、かつ、放射の影響を小さくするためのスリムな光学設計がなされている。機器のスリム化は、風速場の乱れを減少させる効果もあり、そのため、SATとのセンサ間距離を短くすることが可能である(CSAT3と組み合わせた場合のセンサ間距離は6cm)。オープンパスでCO₂フラックスを測定する場合、フラックスの高周波域の損失(Appendix 2.2-2)は、通常、センサ間距離によるものが最も大きいので、スリム化は熱源問題だけでなく、フラックスの損失の補正項の減少(すなわち、不確実性の減少)にも貢献している。また、EC150は、ヒータを用いて測定パス端のレンズ上の結露を抑え、降水後の水分蒸発を促進する機能を持ち合わせており、欠測を少なくする機器となっている。

最後の、三つ目の対策は、CO₂フラックスの算出過程に H を用いなくて済むように工夫する方法である。 H は、乾燥空気の質量保存式を満たすために必要な気温変動項(Webb *et al.*, 1980)であり、クロズドパスの測定では、試料空気の吸引過程で気温変動が減衰するために必要なくなる(ただし、減衰の程度は、チューブの形状・長さ・吸引速度などに影響されるので、適切な組み合わせを選択する必要がある。詳細は、Clement *et al.* (2009)を参照)。LI-COR社は、LI-7500Aの測定パスを、温度伝導性が低く、水分の付着しにくいPVC製フードで覆い、クロズドパス型の分析計へ変更した製品をLI-7200として販売した。LI-7200を専用のポンプ・流量制御部と組み合わせて用いることにより、クロズドパスの計算手順、すなわち、 H を用いずにCO₂フラックスを算出することができる。従来のクロズドパスは、周辺環境(特に温度)の変化や降水への対策のために機器を屋内に設置する必要があり、システムの構成が複雑になりがちであった。しかし、LI-7200は、基本的な測定部分はオープンパスであるLI-7500Aを用いており、ポンプ・流量制御部も耐候設計のため、クロズドパスでありながらシステムの屋外設置が可能となっている。この方式は、降水時の欠測データを少なくでき、また、Nakai *et al.* (2011)が報告しているようにCO₂フラックスに寄与する圧力相関項(Webb *et al.*, 1980; Lee and Massman, 2011)の評価も可能であるという利点を持つ。ただし、気温と同様に水蒸気(H₂O)変動も試料空気の吸引過程で減衰することに注意が必要である。LI-7200は、吸引チューブが短いこともあり、水蒸気変動の減衰量は通常のクロズドパスシステムより小さく、~10%程度であるが(LI-COR, 2011b)、この数値は無視できない、適切な補正が必要とされる減衰量である。なお、Campbell社もLI-7200と同様の特徴を持つ機器(EC155)の販売を2011年より開始している。

以上のように、オープンパスを用いたCO₂フラックス測定の分野は、その測定理論と同時にハードウェア技術も進歩しているため、公表される論文とともに、製品会社からのアナウンスにも留意し、新しい知見を取り入れながら観測を行っていく必要がある。

Appendix 2.2-1: LI-7500 (LI-COR) の特定の製品番号の特徴

LI-COR は、LI-7500 を 2000 年に販売開始した後、製品の修正・改良を継続的に行っている。そのため、製品番号によっては、校正・測定時に特別な注意を必要とする場合がある。下記に、それらの事項を簡単にまとめた。なお、今後も製品が改良される可能性は高いので、LI-COR の Web サイトを定期的に訪れ、情報を確認することを推奨する。

(1) 全製品番号

LI-7500 の制御・演算部 (Control Box) のファームウェア (LI-7500 Instrument Embedded Software)、パソコン用のソフトウェア (LI7500.exe)、マニュアルを最新のバージョンに揃える。ファームウェアは Ver. 3.0.1、ソフトウェアは Ver. 3.0.2、マニュアルは Rev. 4 が最新版 (2008 年 11 月時点) である。

(2) 製品番号 75H/B-0282 以前の LI-7500

製品番号 75H/B-0282 以前の LI-7500 は、パス端が直達日射の影響を受け、出力が変化する (LI-COR, 2002)。この影響を避けるためには、北半球では、センサヘッドを北に、緯度に応じた特定の角度傾ける必要がある。例えば、北緯 35 度の場合、北に約 35 度、北緯 40 度の場合、北に約 30 度、センサヘッドを傾けると、直達日射の影響を避けることができる。

(3) 2003 年 7 月頃より前に販売された LI-7500

2003 年 7 月頃より前に販売された LI-7500 は、制御・演算部のファームウェアのバージョンが Ver.1.0.0 ~ 2.0.4 であり、出力信号の遅れ時間がマニュアル記載の数値と異なる (LI-COR はタイミング・エラーと呼称している)。このタイミング・エラーは、ファームウェア (firmware) を Ver.3.0.0 以降のバージョンに更新することにより解消される。

(4) 製品番号 75H/B-0370 以降の LI-7500

製品番号 75H/B-0370 以降の LI-7500 は、制御・演算部のメイン回路が改良され、低温下 (-40℃ まで) での使用が可能となった。LI-7500 は、校正係数を正しく移行できれば、センサヘッド部と制御・演算部の製品番号が一致していなくても測定が可能である。しかし、制御・演算部のメイン回路は上記の改良前後で互換性がない。そのため、新旧の制御・演算部の間でセンサヘッド部を交換する場合は、使用時の組み合わせで校正を実施する必要がある。なお、LI-COR 社は、(同じ制御・演算部のタイプでも) 異なる製品番号のセンサヘッド部と制御・演算部を組み合わせる場合は、校正してから測定に用いることを推奨している。センサヘッド部の交換についての詳細は、LI-7500 の製品マニュアル (Rev. 4, LI-COR, 2004) の pp. 3-18 ~ 3-20 を参照。

Appendix 2.2-2: フラックスの高周波域の損失

鉛直風速の測定センサとスカラー量 (本節では CO₂) の測定センサのセンサパス間の距離がコスペクトルの形状を変形させる効果 (周波数応答特性) は、水平面内 (横方向) の位置関係については、観測・研究の蓄積があり、その補正方法もほぼ確立されている (例えば、Moore, 1986; Massman, 2000)。しかし、両者の位置関係が高さ方向に離れている場合の周波数応答特性の理解は充分ではなく、フラックスの損失量を補正するためには、クローズドパスで行われているバンドパス法 (例えば、Watanabe *et al.*,

2000)などを適用しなければならない。

Appendix 2.2-3: オープンパスの熱源がフラックス計算に及ぼす問題

オープンパスを用いてCO₂フラックスを算出する場合、密度変動補正項(乾燥空気フラックス)の評価が必要である(Webb *et al.*, 1980)。この補正には、オープンパスの測定パス内における温度変動(顕熱フラックス; H_{op})の評価が必要である。従来、 H_{op} は、SATで測定した顕熱フラックス H と等しいと仮定されていたが、近年、両者の違い($\Delta H = |H_{op} - H|$)が無視できないことが報告されている(例えば、Burba *et al.*, 2008; Ono *et al.*, 2008)。この問題は、 H の大きさではなく、 ΔH の大きさに左右されることに注意が必要である(H の絶対値の大小に関わらず問題が生じる)。

ΔH の原因は、センサが熱源(内部機器の発熱や日射による加熱など)となっていることである。Burba *et al.* (2008)は、 ΔH の補正方法を提案しているが、適用の前提条件として、LI-7500が垂直に設置された状態を仮定している。その他のオープンパスでも熱源問題が生じていると考えられるが、その他のオープンパスや垂直以外の設置状態では、Burba *et al.* (2008)の補正方法が適用できないことに注意が必要である。この熱源問題は、現在(2008年)も研究段階であり、関連する論文が公表され続けている(例えば、Heusinkveld *et al.*, 2008など)。そのため、今後の研究の動向や製品会社のアナウンスに留意する必要がある。

Appendix 2.2-4: オープンパスを水平に設置した場合の問題点

オープンパスが測定するCO₂密度は、測定パス内の値である。従って、測定パス長が20cmの場合、これより短いスケールの変動は平滑化される。オープンパスを垂直に設置した場合は、高さ方向20cmのCO₂密度の変動が平滑化されるが、この平滑化は、既往の研究例も多く、評価や補正が可能である。しかし、オープンパスを水平に設置した場合は、高さ方向は非常に短く、水平方向に長く(20cm)平滑化されたCO₂密度の変動を測定することになる。このような状態の平滑化については、既往の研究例が少なく、適切な評価や補正方法を見出すことが困難である。

Appendix 2.2-5: オープンパスの測定パス端のレンズの汚れがCO₂密度測定に及ぼす影響

オープンパス(LI-7500)の測定パスのレンズが汚れている場合、CO₂、H₂Oの出力にオフセットが生じることがSerrano-Ortiz *et al.* (2008)により報告された。Serrano-Ortiz *et al.* (2008)は、オフセットが生じた出力をフラックス計算に用いた場合、特に、長期間(年単位)の積算値の誤差が大きくなることを述べている。この問題の対処法として、クローズドパスでCO₂密度(混合比)の絶対値を測定すること、湿度センサで測定した水蒸気量とH₂O出力を比較してCO₂出力を補正することが挙げられる。定期的に測定パスのレンズを清掃することも有効な対処法である。Serrano-Ortiz *et al.* (2008)の報告は、LI-7500についてのものであるが、その他のオープンパスにも同様の現象が生じていると考えられるので、上述した対処法が求められる。

Appendix 2.2-6: 密度と混合比について

ここにCO₂密度とCO₂混合比について説明を加えておく。CO₂密度 ρ_c [kgm⁻³]とは単位体積中に含まれるCO₂の質量であり、CO₂混合比とはCO₂密度 ρ_c [kgm⁻³]の乾燥空気密度 ρ_d [kgm⁻³]に対する

比で表される。CO₂ 混合比は，

$$\frac{\rho_c}{\rho_d} = \frac{m_c}{m_d} \frac{p_c}{(p - e)} \quad (\text{A2.2-1})$$

となる。ここで， m_c ：CO₂ 分子量 [kgmol⁻¹]， m_d ：乾燥空気の分子量 [kgmol⁻¹]， p ：大気圧 [Pa]， e ：水蒸気圧 [Pa]， p_c ：CO₂ 分圧 [Pa]である。なお，CO₂ 濃度を ρ_{cc} [μmol mol⁻¹]としたとき， $P_c = \rho_{cc} P \times 10^{-6}$ と表される。

Appendix 2.2-7: オープンパスの熱源問題の影響が小さいことを報告する論文

Giasson *et al.* (2006)，Haslwanter *et al.* (2009) のように熱源問題が無視できる（程度に小さい）ことを報告する論文も見られる。Giasson *et al.* (2006) のサイトで熱源問題に起因する冬季の吸収 CO₂ フラックスが観測されなかったことについて，Amiro (2010) は，高い風速が機器の熱源効果を減少させた可能性を指摘している。これは，風速による機器の直接の冷却効果とともに，Ono *et al.* (2009) が報告している機器表面で生成された顕熱フラックス H_{body} と H_{op} の割合 ($H_{\text{op}}/H_{\text{body}}$) が風速の増加とともに減少する効果が同時に生じていると考えられる。