

タワーフラックス 観測マニュアル



タワーフラックス観測マニュアル編集委員会 編

編集委員会

編集委員長

山野井克己（森林総合研究所北海道支所）

編集委員（五十音順）

大谷 義一（森林総合研究所気象環境研究領域）

小野 圭介（農業環境技術研究所大気環境研究領域）

北村 兼三（森林総合研究所気象環境研究領域）

高橋 善幸（国立環境研究所地球環境研究センター）

玉井 幸治（森林総合研究所水土保持研究領域）

中井裕一郎（森林総合研究所気象環境研究領域）

平田 竜一（北海道大学大学院農学研究院）

前田 高尚（産業技術総合研究所環境管理技術研究部門）

松浦 庄司（畜産草地研究所）

溝口 康子（森林総合研究所北海道支所）

深山 貴文（森林総合研究所関西支所）

村山 昌平（産業技術総合研究所環境管理技術研究部門）

安田 幸生（森林総合研究所東北支所）

事務局

溝口 康子（森林総合研究所北海道支所）

油田さと子（森林総合研究所気象環境研究領域）

〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1

（独）森林総合研究所 気象環境研究領域

電話：029- 873-3211（代） E-mail：ffnet-man@ffpri.affrc.go.jp

執筆者 (五十音順)

大 谷 義 一 (森林総合研究所気象環境研究領域)
小 野 圭 介 (農業環境技術研究所大気環境研究領域)
北 村 兼 三 (森林総合研究所気象環境研究領域)
小 南 裕 志 (森林総合研究所関西支所)
清 水 貴 範 (森林総合研究所水土保持研究領域)
高 梨 聡 (森林総合研究所気象環境研究領域)
玉 井 幸 治 (森林総合研究所水土保持研究領域)
中井裕一郎 (森林総合研究所気象環境研究領域)
間 野 正 美 (農業環境技術研究所大気環境研究領域)
溝 口 康 子 (森林総合研究所北海道支所)
宮 田 明 (農業環境技術研究所大気環境研究領域)
深 山 貴 文 (森林総合研究所関西支所)
安 田 幸 生 (森林総合研究所東北支所)
山野井克己 (森林総合研究所北海道支所)

序文

地球温暖化を抑制する社会的な取り組みにおいて、森林、農耕地、草地等の陸域生態系における二酸化炭素収支の定量的な把握に向けた検出体制の整備が急がれている。陸域生態系の炭素収支に関わる観測研究の中で、タワーを用いた微気象学的方法による大気と陸域生態系間の二酸化炭素フラックス観測は、生態系が大気から吸収する二酸化炭素の量を直接測定することが出来る方法として注目され、世界各地に 200 か所を超える観測が展開されてきた。地球温暖化に関わる生態系モデルパラメタリゼーションの改良を目的として、あるいは、台風などの自然攪乱・土地利用改変などの人為攪乱が多様な陸域生態系の動態に与える影響の解明などをおこなうために、タワー観測による二酸化炭素フラックスと生態学的アプローチによる陸域生態系の炭素動態に関わる観測研究の統合も進められている。

このような中、国内で長期にわたりタワー観測を実施してきた 4 つの研究所（森林総合研究所、農業環境技術研究所、産業技術総合研究所、国立環境研究所）が 2007 年から共同で、観測データの信頼性を確保し品質管理された観測データの共有化を促進するための研究開発を行うこととなった。対象とする観測データは、世界的に観測のネットワーク化が推進されている陸域生態系と大気との間のエネルギーや二酸化炭素などの物質の交換に関するものである。比較的速い応答速度を持つ測器の開発や計算処理速度の向上を背景に、近年盛んに用いられるようになった渦相関法と呼ばれる微気象学的な観測・解析手法によるこれらの観測は、対象とする生態系を破壊することなく、生態系 - 大気間の物質やエネルギー交換量（フラックス）、生態系生産量の連続的なデータ取得を可能にした。これにより二酸化炭素などの物質・エネルギー交換量の日変化や年変化、さらに年々の変動などを明瞭に捉えることが可能になり、生態系の炭素動態やエネルギー収支の解明に大きく寄与してきた。

しかし、このような利点のある微気象学的手法は、観測露場や測器などの条件を揃えて行われる一般の地上気象観測とは異なり、観測位置、観測手法や解析の方法の違いに由来する不確実性の問題を当初から内包していた。現在、FLUXNET や AsiaFlux などが推進している観測データの共有化は、直接的、あるいはモデルの検証を通じた間接的なデータの相互比較と炭素収支の広域把握などを目的とするため、このようなデータの不確実性を出来るだけ除くべく様々な配慮がなされてきている。たとえば、ヨーロッパやカナダでは当初から測器や解析手法の統一などを含めてマニュアル化し（Aubinet *et al.*, 2000; Fluxnet CANADA, 2003）、系統的にタワー観測を推進してきた。我が国にはアジアフラックス運営委員会のメンバーが中心となって 2003 年に出版した「陸域生態系における二酸化炭素等フラックス観測の実際」（AsiaFlux 運営委員会編, 2003）があり、測定・解析手法と応用の解説を通じて観測・解析水準の向上と観測のネットワーク化に寄与してきた。また 2004 年には FLUXNET が推進母体となり、観測・解析に関する理論から手法の解説、さらに観測誤差要因の検討などに至る幅広い内容を網羅した詳細なハンドブック（Lee *et al.* eds., 2004）も出版された。これらの一連のマニュアルやハンドブックによって、観測データに不確実性をもたらす要因に対応するための指針が整理されてきた。一方、このような不確実性に関する問題のうち、複雑地形などサイトの地形条件に強く異存する現象がもたらす誤差などは、より測定や解析の原理に根ざした本質的な原因として今なお解決すべき研究課題として残されている。

このように我々が渦相関法の観測を開始した頃と比べて参考となる文献は増えてはいるものの、実際

に渦相関法による観測や解析を行おうとすると、サイトの立ち上げから観測システムの実装、解析やデータの精度管理などのあらゆる局面において、これら既往の出版物には書かれていない細かな技術情報が必要となる。そこで、これらの技術情報をインターネット上で公開し、データの標準化を意識する研究者間で共有することによりデータの品質向上と流通促進を促し、地球温暖化を抑止するための陸域生態系の二酸化炭素吸収量のよりよい検出体制の構築に寄与していこうと考えた。アジアを中心とした地域では、さまざまなモデルを検証するための陸域生態系タワー観測サイトはなお不足しており、このマニュアルで提供されるような詳細な技術情報無しに新しいサイトの立ち上げや運営を独自に行うことは、ほとんど不可能であろう。

このような細かい技術情報は、観測や解析技術の進化と不可分の関係にあるため、これまでは比較的情報の更新がしやすい利点を生かしてインターネット上で公開を行ってきた。今回、紙のメディアで出版するにあたり一番危惧するのはこの点であるが、技術的な側面から観測や解析の現状を記録するという意味で意義があると考えた。アジア地域を対象とした各種の技術移転活動への活用など、このマニュアルがタワー観測の発展を通じて温暖化抑制の取り組みに寄与することを期待する。

2011 年 8 月

大谷義一

謝辞

当マニュアルは、環境省地球環境保全試験研究プロジェクト「アジア陸域炭素循環観測のための長期生態系モニタリングとデータのネットワーク化促進に関する研究」の一環として作成したものです。本文中に掲載した製品写真を快くご提供くださいました下記センサ機器の製造・販売各社に感謝いたします。

英弘精機株式会社

Kipp & Zonen B.V.

株式会社セネコム

株式会社チノー

株式会社プリード

CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.

クリマテック株式会社

大起理化工業株式会社

Decagon Devices, Inc.

本マニュアル利用に当たっての注意事項

日本においては、政府機関または地方公共団体（独立行政法人は含まれない）が研究や教育以外の目的で気温や雨量などの気象観測を行う場合、又はそれ以外の者が観測の成果を発表するため、あるいは災害の防止に利用することを目的として気象観測を行う場合には、技術上の基準に従って行い、気象観測施設設置の届け出を気象庁長官に行うことが義務付けられている（気象業務法第六条）。この対象となる気象観測の場合、用いる気象測器は検定に合格したものをを用いなくてはならない。また、検定の有効期間は、測器毎に定められている。詳細は www.jma.go.jp/jma/kishou/shinsei/kentei/ 等に記載されている。

行おうとする気象観測が届け出の必要なケースかどうかは、事前に十分検討し、判断がつかない場合は気象庁に問い合わせることが必要となる。本マニュアルにおける測器の取り扱いおよび測定方法は、一般に観測成果を公表することを前提にしていなかったため、届け出が必要なケースの場合は、気象業務法に定める技術上の基準に従うような観測計画を立てる必要がある。

目次

執筆者・編集委員会	i
序文	iii

1. 観測計画とフラックス観測サイトの選定

1.1 観測サイトの選定	2
1.2 インフラの整備	4
1.2.1 土地使用の許可取得等	4
1.2.2 タワー建設とメンテナンス	6
1.2.3 電源	9
1.2.4 避雷対策	12
1.2.5 観測小屋	15
1.2.6 その他	16
1.3 観測項目の選定	18
1.3.1 渦相関法（乱流変動法）観測に必須の観測項目	18
1.3.2 微気象・水文要素	18
1.3.3 生態系の構造，基礎的特性	20
1 章関連情報	22

2. 乱流系観測

2.1 超音波風速温度計	26
Appendix 2.1-1: プログラム例	36
2.2 オープンパス型 CO ₂ / H ₂ O 分析計	37
2.2.1 オープンパス型分析計による CO ₂ 濃度変動測定	37
2.2.2 オープンパス型分析計による H ₂ O 濃度変動測定	48
2.2.3 オープンパス型分析計を取り巻く 2011 年の状況	50
Appendix 2.2-1: LI-7500 (LI-COR, USA) の特定の製品番号の特徴	53
Appendix 2.2-2: フラックスの高周波域の損失	53
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	54
Appendix 2.2-4: オープンパスを水平に設置した場合の問題点	54
Appendix 2.2-5: オープンパスの測定パス端のレンズの汚れが CO ₂ 密度測定に及ぼす影響	54
Appendix 2.2-6: 密度と混合比について	54
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	55
2.3 クローズドパス型 CO ₂ 分析計	56
Appendix 2.3-1: 高周波補正に関する文献	69
2.4 貯留変化量	70

2.5 簡易渦集積法	78
2.6 データロガー	84
2.7 ノイズのチェックと対策	86
2 章関連情報	89

3. 微気象観測

3.1 放射	96
3.1.1 日射量	96
3.1.2 長波放射量	99
3.1.3 正味放射量	101
3.1.4 光合成有効放射量（光合成有効光子量束密度）	103
Appendix 3.1-1: 太陽位置を求めるために必要な値	107
Appendix 3.1-2: 単位の変換	108
3.2 風向・風速	109
3.3 気温	114
Appendix 3.3-1: 単位の変換	119
3.4 湿度	120
Appendix 3.4-1: 湿度の定義一覧	123
Appendix 3.4-2: 塩類の飽和水溶液と共存して平衡にある気体の相対湿度	124
3.5 地温・地中熱流量	125
3.5.1 地温	125
3.5.2 地中熱流量	127
3.6 土壌水分	130
3.7 降水量（降雨・降雪）, 積雪調査（積雪深・積雪重量）	134
3.7.1 降水量（降雨・降雪）	134
3.7.2 積雪調査（積雪深・積雪重量）	136
3.8 水位, 水温, 灌漑・排水量	138
3.8.1 水位	138
3.8.2 水温	140
3.8.3 灌漑・排水量	141
3.9 データロガー	143
3 章関連情報	145

引用文献	154
シンボル一覧	161
索引	164
執筆者	168

1

観測計画と フラックス観測 サイトの選定

1.1 観測サイトの選定

The site selection

ここでは長期間のエネルギー・CO₂フラックス連続観測を行う場合を想定して本章を記述する。

基本的な考え方

サイトの選定を計画するにあたって、「どのような生態系のフラックスを測定するのか」という目的を明確にする。具体的には生態系の次のような属性をあらかじめ目的として考える：植生タイプ（主要構成種）、植生密度、植生高さ、植生の年齢、気候、地質土壌、地形、自然撓乱の有無、伐採や土地の整備利用などの人為撓乱の有無など、である。この目的に沿って適切な観測サイトを探す。観測をする場所は得られるデータの価値を大きく左右する重要な問題であり、観測サイトの選定には入念な準備作業を投じる価値がある。

渦相関法（乱流変動法）によるフラックス測定は、他の微気象学的手法に比べて大気や地表面に関する前提条件の少ない観測方法である。とはいうものの、測定地点の風上側に平坦な地形と均質な植生が十分な広がり（Schmid, 1997）をもっていることを仮定している。できるだけこのような条件を充たす観測サイトを探すことが望ましい。

準備作業

対象とする生態系の候補地を次のような情報を参照して具体的にピックアップする：地形図、植生分布図、航空写真、衛星画像データ、土地利用図、森林施業管理図などのマップ資料や気象・水文条件、土地管理・施業履歴などである。気象条件としては、特に卓越風の強さと方位・それらの日変化と季節変化を調べておくと、フラックス観測ポイントの選定やセンサの配置計画に役立つ。実務問題としては土地の所有権や利用権、建築制限条件に関する情報を調べておく必要がある。地域に精通した人に周辺の社会条件、治安条件等を教えてもらうことも重要である。平行して、観測の継続年数、対象植生地の管理、観測に費やすマンパワー、観測データの蓄積方法、観測データの利用・公開手順、連携する別の観測計画との関係などを立案する。

Tips!

観測に必要なマンパワーはフラックス観測のみで1カ所の観測サイトに専任するスタッフが2名必要である。（Baldocchi *et al.*, 1996）。フラックス以外の多岐にわたる微気象要素やその他の項目の観測は別途の要員を配置すべきである。最近では、計測器の改良によりメンテナンスの省力化が進んでいるが、少なくとも高所作業の現場における単独作業は避けることがのぞましい。

Tips 1.1-1

フラックス観測ポイントの選定

選定候補地が出てきた段階で、現地踏査、可能であれば上空からの目視観察も行うとよい。なるべく風上側に均一な地形、植生条件が広がっている場所を観測ポイント（タワーやポールの位置）に選ぶ。フラックスの測定高度は観測の妥当性や代表性を高めるために植生高の数倍程度にすることがのぞましいが、技術的な制限やフットプリント（観測されたフラックスに寄与するエリア、1.2.2「タワー設計とメンテナンス」を参照）に制約があって観測高度を低くせざるを得ないことも多い。建物・送電線などの人工施設や車ほかの交通機関が近くにあるような場所は排ガス、騒音、電気ノイズなど観測の支障をきたす恐れがあるので避けたほうがよい。周辺にフラックス観測対象エリアと同等で土壌や植生の破壊的攪乱を伴う生態学的・土壌学的調査を行うことができる土地があるとなおよい。永年草地等を除く農耕地では、同一作物の栽培地が広がっている場所であっても、実際には1ヘクタール以下の小面積の区画に区切られて管理されている場合が多い。区画ごとに栽培管理方法が異なり、その違いが観測に深刻な影響を及ぼすこともある。観測ポイントの選定にあたっては、この点に留意した事前調査が重要である。

アクセス

メンテナンス等で重量物を搬入したりするので、観測タワー近くまで道路があるほうがよい。道路がない場合には作るか、あるいは、急傾斜地や土地利用の制限が厳しい場合には運搬用モノレール等を建設する（1.2.2「タワー設計とメンテナンス」参照）方策がある。ただし、タワー周辺の道路への車両の進入は排気ガスなどの悪影響があるため、一定の通行制限をする必要がある。

リモートサイト

人が近づくことが容易でないが、観測対象が地球上の生態系として重要性が高く観測をどうしても実施することが必要な地域の場合、必要最小限の観測を長期連続でいかに実現可能にしていけるかを考えたい。このような考え方で設置する観測サイトをここでは、リモートサイトという。このような立地条件ではまず商用電源を敷設することは不可能である。交通も非常に不便であり、人間が観測サイトで作業に従事するには交通手段や宿泊施設などの生活の基本環境から戦略を練る必要がある。この際、現地の人たちの協力が不可欠である。大々的な物量作戦を展開して全ての制限要因を取り除くことが理想である。しかし、多くの場合、予算や人材は限られており、電源容量が制約されることやメンテナンス省力化を考慮して観測項目や期間を必要最小限にし、着実に有効なデータを獲得する方針をとるのが良いだろう。そのうえで、日常的に監視やメンテナンスの可能な場所に簡単な気象ステーション（Photo 1.1-1）を設置して基本的な気象要素だけでも通年取得できるようにするとなお良い。



Photo 1.1-1 リモートサイトのために設けられた簡易気象ステーション。（ロシア、ツラ）

1.2 インフラの整備

Infrastructure

本章では、タワーの建設に関して日本の自治体および国の関連機関との間で行う調整・手続きを説明している。国外で観測サイトを設置する場合は、全国各地の実情に合わせて慎重に対応する必要がある。

1.2.1 土地使用の許可取得等

民有地

タワーや作業道等、観測に関わる施設計画が民有地に入っている場合の手続きを一般的に述べることは難しい。土地所有者や地権者との話し合いを粘り強く誠意を持って行い、必要に応じて土地貸借等を進めつつ（民有地借り上げ固定資産評価および民有地借り上げ申請）、作業、建設、観測を行う。その場合においても当該植生地が国立公園内の特別地域、保安林、砂防指定地等に指定されている場合には許可が必要となる（詳細は以下に解説）。

農耕地

観測サイトを設置する場合には、まず当該圃場の地権者の了解を得る必要がある。一般に、農耕地に設置するタワーは小型のものが多く、タワーや付帯設備の設置によって植栽が不可能になったり、作物の生育に悪影響が及んだりする面積は限定的である。しかし、タワー等の工作物が圃場内に存在することにより、農作業（特に、トラクター等による機械作業）の効率が著しく低下することがあるので、地権者との交渉にあたっては、この点に配慮して損料を提示する必要がある。また、タワー設置圃場の近隣の圃場にまで影響が及ぶことは少ないが、土地改良区等の組織を通して近隣圃場の地権者にも了解を得ておくことは、観測サイトの管理上重要であり、これにより近隣圃場の地権者から有益な情報が得られることもある。

国立公園及び国定公園の特別地域・特別保護地区

国立公園および国定公園内の特別地域・特別保護地区内に観測サイトを設置する場合には、国立公園の場合は環境大臣、国定公園の場合は都道府県知事の許可を受ける必要がある（自然公園法第十三条および第十四条）。この場合、一般に工作物の設置は厳しく制限されるので、Photo 1.1-1 に示したような簡易ステーションを超える規模のタワーを設置することは難しい。

国有林、公有林

タワー、および、作業道等の観測に関わる施設が国有林に帰属している場合には国有林野新規使用許可が必要となる。現地森林管理署ならびに森林管理局を訪問し、誠意を持って交渉にあたることが

基本である。森林に関する公的な研究目的での観測等に伴う土地利用に関しては、森林管理局技術開発実施要綱等に基づいた共同研究を行うことができる場合がある。この場合には土地利用に基づく貸借は存在しないが、年度ごとに森林管理局長への技術開発実施報告が必要である。県、市町村などの地方自治体が保有する森林に関しては、各自治体により、土地貸し付けや県有林使用承認等の制度がある。地方自治体の林務課に問い合わせて手続きを行う。これとは別に当該森林が保安林、あるいは砂防指定地等であった場合には民有地と同様に保安林内作業許可、あるいは砂防指定地内行為許可が必要となる。

保安林

保安林内で大規模な建築、作業を行う場合には保安林解除申請を行い保安林解除を行う。保安林の指定解除は 保安林の指定の理由が消滅したとき、あるいは 保安林の指定目的に優先する公益上の理由により必要が生じたとき、という理由が必要である。現実には、観測タワーの建設や林道の敷設等の行為について、これらの要件を満たした上で解除が許可される可能性は低い。保安林内において小規模な観測を行う場合には、保安林内作業許可申請を行い、タワーや観測小屋を仮設構造物として申請し、若干の樹木の伐採許可（保安林内作業許可申請）を得て観測を実施するのが現実的であると考えられる。

砂防指定地

観測を行う予定の試験地が砂防指定地に登録されていた場合に気象観測等の要件で砂防指定地の解除を行うのは現実的に不可能である。また砂防指定地内に永久構造物を建設することも事実上不可能である。これは河川内でも同様であり、砂防法上の砂防指定地内や河川法上での河川内に施設、道路等を構築するのは非常な困難が伴う。しかしこの場合においても砂防指定地内あるいは河川内に仮設の構造物を設置し、建築許可申請ではなく砂防指定地内あるいは河川内の行為（砂防指定地内行為許可申請）として、若干の建築物の許可を得ることが可能である。

Tips!

保安林内や砂防指定地内において林道や試験地の改修を行う場合には上述の許認可申請を別個取り直す必要が生じるので、大幅な改修時にはその点を忘れないようにしなければならない。

Tips 1.2-1

Tips!

仮設建造物であっても、長期観測に使用する観測小屋については、建築基準法に基づく建築確認が必要な場合もある。土地使用に伴う諸手続のほかに、タワー建設・小屋設置に伴う許可が必要かどうかの確認をとり、必要な場合には諸手続を行う。

Tips 1.2-2

1.2.2 タワー建設とメンテナンス

建設高

森林や草地・農耕地生態系 - 大気間のフラックス観測に用いるタワーの仕様は、建設のための予算や建設予定地の立地条件との兼ね合いで決定することになるが、その高さは最低でも周辺の植生高を超えている必要がある。植生高さの 1.3 倍程度の高度での測定値と 1.5 ~ 1.7 倍程度での測定値との間に大きな違いが無かったという事例もある（例えば Laubach *et al.*, 1994）ことより、植生高をある程度超えていればフラックス観測は可能であると言える。しかし、比較的低い位置での観測値は観測地点からごく近い範囲の植生の影響をより強く受けるために、観測値が周辺の植生をある程度代表しているかどうかを検証する必要性が生じる。この事前の検証にはフットプリント解析（例えば Schuepp *et al.*, 1990； Rannik *et al.*, 2000； Kormann and Meixner, 2001； 岡田, 2002）が有効である。しかし、実際の観測条件によっては、こうした事前解析とともに、観測高度を変化させての実地検証も合わせて行う方が望ましく、その際には植生高よりある程度高いタワーが必要となる。また長期観測を行う場合、植生に近い高さで観測を行うと、植物の成長によって比較的短い期間で測定位置が植生頂部と接近してくる。したがって、フラックス観測機器の設置高度に関わらず、タワーを建設する際には、その高さは周辺植生高の少なくとも 1.5 ~ 2 倍程度とするべきである。

タワーの種類と特徴

農耕地や草地では 3 ~ 5m 程度のポール状のものが設置される場合が多い（Photo 1.2-1）。パイプなどを深く突き刺して自立式とするもの、周囲にワイヤを引いて強化しているものや三脚タイプのものがある。

森林においては、より高いタワーが必要となる。測器の設置やメンテナンスを行うために、測器取り付け部分が昇降式のタイプと、観測従事者がタワーを登り降りできるタイプがある。タワーを登降する方法で Photo 1.2-2 のように階段を用いるもの（ここでは「足場タワー」と呼ぶ）と、Photo 1.2-3 のように梯子を用いるもの（ここでは「梯子タワー」と呼ぶ）が一般的に用いられている。

足場タワーの利点は、登降者の安全が確保しやすい点にある。また、機器を手にとって移動することが可能であるため、観測従事者が少人数でも機器の設置やメンテナンスが比較的容易にできる。

足場タワーでは、通常比較的広く浅い基礎の上に 4 辺を組み上げる一方 4 辺の角から周囲方向に適宜金属ステーを張り、コンクリートなどを埋設したアンカーに固定する。アンカーは耐風性を担保するために重要であり、かなり大型のものを地中深く（例えば 1m³ 以上のものを深さ 1m 以上に）埋設することがある。また、ステーに湿雪が付着して凍結する



Photo 1.2-1 ポール状のタワー。
（真瀬水田フラックスサイト）

恐れがあるような積雪地では、スターの無い足場タワーが選択されることもある。その場合には、積雪時を念頭に置いた特別な強度計算に基づいて底面積を広く取り、補強部材を多く投入することが必要となる。

一般的な単管パイプとクランプを用いた足場タワーは、通常の建設現場では仮設物として扱われるため、長期観測用にはタワーの高さなどの仕様に基づく適切な補強部材の配置が必要であり、さらに建設予定高度や資材の特徴に基づく強度計算を行って設計・施工しなければならない。また、施工や維持管理を考えれば軽量かつ丈夫な材料（アルミ製）の使用が望ましいが、材料費は高騰する。

梯子タワーは一辺が数 10cm 程度の三辺形（あるいは四辺形）で構成されているものが多い（Photo 1.2-3）。こうしたタワーは、無線通信や携帯電話用などに使用されており、材料や強度計算は規格として組み込まれている場合が多い。通信用タワーは世界中で建設されているため、海外の観測でも現地業者への建設依頼が簡単に可能であり、その場合現地での人件費に対応して比較的安価に建設できる。また、オプションとして電動または手動のウインチやセーフティボックス／ステージと呼ばれる作業及び待避用の場所を設計に加えることも可能である。ただし、この形状のタワーの登降には階段の登降よりも筋力が必要であり、高度感も強いいため、作業が可能な人間が限定される。手に荷物を持った状態での登降は極めて困難であり、機器の設置には滑車・ロープとこれを扱う地上での補助要員が必要になる。このタワーの登降には高所作業用の墜落防止装置、もしくは登山用の安全確保器が必須である。さらに登降面には金属枠などを設置しておくことで、確保用具の着脱などの際に作業者の恐怖感を著しく緩和できる。このタワーは高さの割に底面積が小さい棒状で建つため、長期観測に用いる場合には倒伏を避けるために相当の深さで基礎打ちする必要がある。また、高さによってはスターなしの自立タワーとして建てることも十分可能であるが、成林した森林の樹冠を大きく超えるような高さになる場合は、金属製のスターと相応の大きさのアンカーを必要とする。



Photo 1.2-2 階段で登り降りする「足場タワー」。(鹿北流域試験地)



Photo 1.2-3 梯子状の部材を用いて登り降りする「梯子タワー」。(カンボジア国コンポントム州、写真：森林総合研究所清水晃氏提供)



Photo 1.2-4 資材運搬に用いるモノレール。

(山城水文試験地)

資材運搬

森林に建設されるタワーは相当の高さになることが多く、かつ山中での建設作業となるために、資材運搬には労を要する。林床面を極力損傷することなく大量の建設資材を効率よく運搬するためには、運搬用モノレール (Photo 1.2-4) の敷設なども有効である。本体価格が約 300 万円でレール敷設がメートルあたり約 3~4 万円程度。

タワーの維持管理

観測タワーの適切な維持管理は、安全に観測を遂行する上で必須の要素である。十分な基礎打ちと適切な材料選定および強度計算に基づいたタワーを、適切な管理の下で使用すれば、予測困難な天災等に遭わない限りは 10 年以上の使用に十分耐えると考えられる。ただし、強風や大地震にさらされなくても、風の揺動や観測者の登降・作業などによってタワーのステー (ワイヤー) は若干張力が変化しているため、1 年に 1 度程度はテンションメータを用いたステーの張力測定とその結果に基づく張力バランスの修正をすることが望ましい。また、タワー部材の接合金具などの腐食具合は常にチェックし、不安があれば材料の取り寄せや施工業者への依頼によって交換することが必要である。

特に森林に建設するタワーでは、タワー自体は強風による揺動に耐えうる設計でも、周辺の樹木がタワーやステーに倒れかかってきて、タワーに重大な損害を与える可能性が十分に考えられる。そのような場合に備えて、倒伏・転倒時にタワーやステーに干渉しそうな木を予め選定して、伐採することが先ず考えられる。樹冠が十分に閉鎖した森林においては、単木的伐採で多少の林冠ギャップができたとしても観測値への影響は小さそうである (例えば Kelliher *et al.*, 1995)。しかし、伐採対象木が多い場合、伐採・搬出の労や伐採後の樹木生育環境の変化を考えると、対象木を他の木と金属ワイヤなどで連結しておく方法が推奨できる (Photo 1.2-5)。これによって、単独で立っている場合よりも木が倒れ難くなり、強風の際にタワーやステーに損傷を与える危険性が激減する。森林総合研究所の鹿北流域試験地ではこの処置を施した後に最大風速 50ms^{-1} 級の台風が 2 度上陸したが、処置木は全て倒伏を免れており、その結果タワーおよびステーは損傷することなく観測を継続している。

農耕地の観測サイトでは、作物の植え付けや収穫、耕耘など、地表面状態を大きく改変する農作業 (ほとんどは機械作業) が 1 年に数回行われる。圃場内に設置したタワーはこれらの農作業の障害と



Photo 1.2-5 金属ワイヤを用いて樹木同士を根本（左図）と高さ約 10m の部位（右図）で結合している様子。赤矢印が結合部分。（鹿北流域試験地）

なるが、上向き放射量，地中熱流量，群落内のプロファイル等の観測はタワー近傍で行われることが多いので，農作業にあたってはタワー近傍も含めて圃場の均一性を確保することが重要である。この場合，二つの方法が考えられる。第一は，移動が容易な簡易タワー（三脚等）を設置して観測を行い，農作業時にはタワーを一時的に撤収する方法である。第二は，常設のタワーで観測を行い，圃場管理者による農作業はタワーを避けて実施してもらい，タワー近傍の農作業は自らが手作業などで行う方法である。第二の方法を採用する場合であっても，数年に 1 回はタワーを撤収して圃場全面の耕耘を行い，均一化を図ることが望ましい。

1.2.3 電源

商用電源

可能な限り商用電源を利用し，電気容量に余裕のある設備を導入する。このとき，停電対策としてバックアップ電源を用意するとともに，観測システムにはデータの自動セーブと自動復帰の機能が必要である。

新たに設定した試験地に商用電源を引く場合には，各地域の電力会社の関連電気工事会社を通じて新たな電力線の引き込み手続きを行う必要がある。関東では関電工，関西では「かんでん」等になる。地域の登録電気工事業者に関しては各地域の電力会社の最寄り営業所に問い合わせること。通常引き込みを行う場所に人家がある場合には一定距離の範囲内について無料で電源工事を行ってもらうことができる。気象観測タワーの場合には原則的にこの案件には当たらないため，電柱や電線の敷設に伴う費用や電柱が設置される場所が民地の場合の土地賃借料等が問題となる。

 Tips!

電力会社関連電気工事会社の担当（電力会社ではない）と十二分に協議を行うことにより対応が大きく変わるので、事前の説明や現地での協議等に労力を惜しまずに、観測の公共性等を強く訴えることが重要である。

Tips 1.2-3

電源の引き込みに当たっては観測タワーあるいは試験森林のできるだけ近くまで高圧電線で引き込み、最終段の電柱に変電器を設置すると観測開始後に電源ノイズ等の問題が出にくく、また電源容量を変更することも容易である。

森林内の配線では倒木などの損傷や断線をさけるために電源線をケーブル保護管（品名呼称：蛇腹管、コルゲート管等）に入れて地下ないし地上に敷設する。電源線の地下敷設は設置後のメンテナンスが事実上困難なので、中間部に連結ボックスを設置するなどの工夫が必要とされる。電柱に架線した場合には、架線に樹木が触らないように除伐や伐採等を行うことが維持管理上必要になる（Photo 1.2-6）ので、樹木の保全を優先する場合には、地上ないしは地下敷設が適当である。状況が許せば地上にケーブル保護管を使用して“転がし配線”を行うと後のメンテナンスに有利である（Photo 1.2-7）。

遠隔地で商用電源を利用できない場合には、発電機あるいはソーラーパネルによる発電システムを利用する。最近はソーラーパネルによる太陽光発電を利用した電源システムが多くの観測サイトで利用されている。発電機を利用する場合には、排気がフラックス観測に影響を与えないような位置に発電機を設置する。



Photo 1.2-6 森林内での空中配線。
（山城水文試験地）



Photo 1.2-7 転がし配線。森林では林床の起伏があるので転がし配線の場合も地中埋設用の蛇腹保護管を用いた方が作業性が高い。（山城水文試験地）

💡 Tips!

高圧電線を観測施設近くの電柱の変圧器まで引き込めなければ、変圧器から観測小屋までを AC100V が単相 3 線 200V で長距離を送電することになる。観測に必要な電力量にもよるが、観測小屋までの電線の抵抗により電圧降下が発生し、十分な電源電圧が得られない場合がある。電圧降下を少なくするには、導体抵抗の小さな電線（できるだけ太い電線）を用いるようにする。機器により違いもあるが、95V では正常に動作しても 90V になると動作が不安定になる機器も多い。使用する AC 電源の電圧の確認が必要である。

Tips 1.2-4

太陽光発電による電源

太陽光発電では、ソーラーパネルと充電用のバッテリーを使用する。昼間の晴れた時間帯に観測システムの消費電力量を上回る発電を行い、余った量を充電する。充電した分を夜間や晴れていない時間帯に消費する。バッテリーの過充電や過放電を防ぐためにチャージコントローラを使用する。バッテリーは充電容量と耐久性を考えると、フル充電から空になるまで使用可能なディープサイクルタイプが適している。太陽パネルとバッテリーの必要容量は観測システムの消費電力量と利用可能な日射量に依存する。具体的な計算方法は関連 H P の技術資料等を参照されたい。いずれにしても利用できる電力が限定されるため、観測システムには、消費電力量がなるべく小さいこと、及び電源の監視制御、観測データの自動セーブと自動停止・自動復帰の機能が必要である。

その他、ソーラーパネルを使用する際の主な注意点を以下にとおりである。1)ソーラーパネルは大きい平板型をしているので、風の流れに関してフラックスセンサなどに与える影響を最小限にする。2)パネルは風の抵抗が大きい。風によってタワーやパネルが飛ばされないようにする。3)配線による電気抵抗を小さくし、電力のロスを最小限にする。4)パネル電流による感電に注意する。付近での作業中は遮光などの対策を施す。太陽電池を用いたフラックス観測タワーの例を Photo 1.2-8 に示す。



Photo 1.2-8 太陽電池を用いたフラックス観測タワー。(ロシア、ツラ)

 Tips!

鉛蓄電池が過放電すると、生成した硫酸鉛が局部的に溶解と析出を繰り返して、固い結晶へと成長する。これはサルフェーション（白色硫酸鉛化現象）と呼ばれ、この結晶は溶解度が低いために、事実上充電できない状態になる。ディープサイクルタイプのバッテリーも原理的には鉛蓄電池のため他のものとかかわるところはないが、電極部分を強化して通常の鉛蓄電池と比較して過放電に強い仕様になっている。

Tips 1.2-5

 Tips!

ソーラーパネルは発電量が最大になるよう設置する。理想的には太陽光が常にパネルに直角に当たるのが望ましいが、太陽高度は日・季節変化するため、通常南向きに $10 \sim 40^\circ$ の角度に取り付ける。ただし、周辺の遮蔽物のパネルへの影響や、パネルのフラックス測定への影響等も考慮しなければならない。

Tips 1.2-6

1.2.4 避雷対策

雷被害の概要

雷は高く尖った物に落ちやすいため、観測タワーは落雷を受けやすい施設である。雷の影響により発生する電流（サージ）は、瞬間的に大電流・高電圧を発生させ、観測施設に被害を及ぼす。タワーなどへ直接落雷することによる直撃雷サージと周辺への落雷に伴う誘導雷サージとがある。どちらのサージでも、観測用の電子機器類は機能停止や破壊などの被害を受ける。特に直撃雷はサージのエネルギーが大きく、被害は甚大で火災が発生する可能性もある。

フラックス観測施設の避雷対策には、観測施設の設置のために法律的に義務づけられる避雷施設と使用する観測機器の安全・保護のための対策がある。前者としては観測タワーに設置する避雷針があり、後者としては電力線、通信回線、センサの信号線に対する対策などがある。

避雷針

避雷針の設置は、直撃雷に対しては最も有効な手段である。観測タワーで高さ 20m を超えるものは、建築基準法の第 88 条の適用を受けるため避雷設備（避雷針）を設置しなければならない。Photo 1.2-9 のような避雷針の設置はタワー建設の付随工事として施工業者による設置となるが、タワー建設時に接地抵抗の小さいアース（ $< 10\Omega$ ）を併せて確保する必要がある（Fig. 1.2-1）。

タワーの避雷針に落雷した場合でも、観測施設に配線された様々なケーブル類に電磁誘導によるサージ電流が発生して観測機器に被害が及ぶことがある。避雷針を設置してある場合も避雷器による対策が必要である。

避雷器

雷サージによる異常電流は電力線、通信回線、センサの信号線など様々な経路で観測機器に被害を及ぼす可能性がある。観測小屋に引き込むこれらの電線路と観測機器の間には SPD（サージ防護デバイス・避雷器）を設置する必要がある。



Photo 1.2-9 観測タワーに設置されている避雷針（左図）とアース（右図）。（札幌森林気象試験地）

電力線での対策

電力線のサージ対策には Fig. 1.2-1 のように耐雷トランスや電源回路用 SPD を用いる。電源用 SPD は耐雷トランスに比べて小型で安価であるため観測小屋のような仮設施設には設置しやすい。サージ電流をアース経由で大地に放流するため、接地抵抗の小さい良好なアースを準備する必要がある。これらの対策は、電力線の敷設工事の時に設置することになるため、事前に施工業者と打ち合わせる必要がある。また、サージプロテクタというコンセント型の器具も市販されている。テーブルタップや無停電電源装置に内蔵されているものもあり利用しやすい。

通信回線での対策

通信回線には回線の種類に合わせて SPD を選択することになる。回線設置時に設置することやコンセント型の機器の利用などは電力線と同様である。また、ネットワークなどは光回線などを用いることで被害を減らすことができる。

センサの信号線での対策

タワーに設置された各種センサの信号線もサージの侵入経路となる。タワー観測では多くの測定機

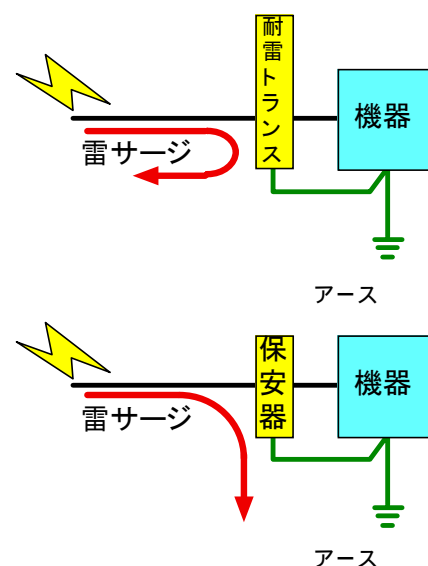


Fig. 1.2-1 耐雷トランスと SPD（保安器）の比較。

器が設置されるため, Photo 1.2-10 のように端子台を経由すると避雷対策も行いやすい。信号線の対策には保護素子(セラミックアレスタやバリスタなど)を用いて全ての信号線をアースに接続し観測機器を保護する。接続位置やサージ電流の経路は電源用 SPD の場合 (Fig. 1.2-1) と同じである。セラミックアレスタ (Photo 1.2-10) は小型で端子台などへの接続に適する。端子台は接地抵抗の小さなアースに接続する必要がある。

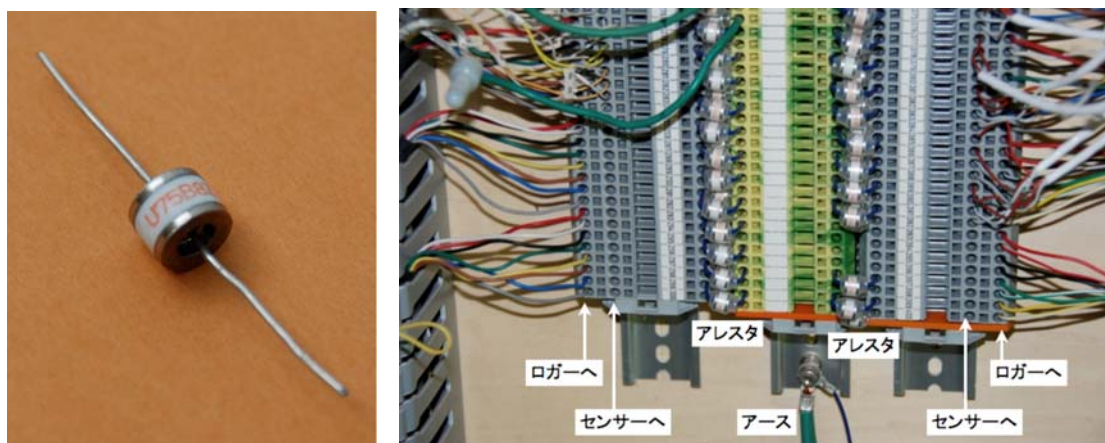


Photo 1.2-10 セラミックアレスタ (左図) と端子台への取り付け状況 (右図)。

アースの設置

電源や信号線での避雷対策とノイズ対策のためには, アースを設置する必要がある。これらのアースは Photo 1.2-9 の避雷針用のアースとは別に設置する必要がある。電源用のアースは電源施設の付随工事として施工される。また, Photo 1.2-10 のように信号線からのサージ対策を行う場合もアースが必要となる。このような目的で設置されるアースは接地抵抗が 100Ω 以下であればよい。通常の地質で



Photo 1.2-11 アース棒。

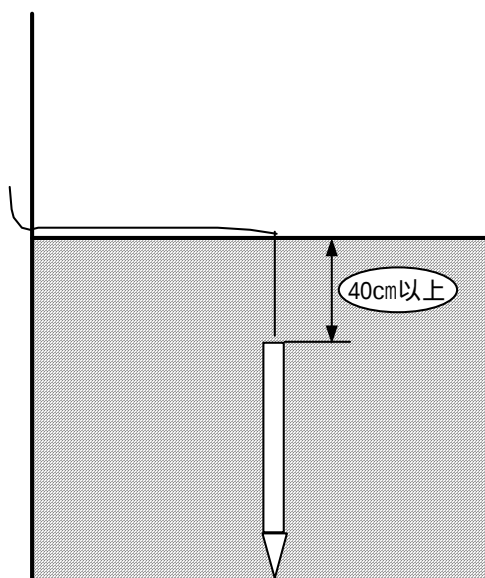


Fig. 1.2-2 アースの設置方法。

あれば、Photo 1.2-11 のような長さが 50～100cm 程度のアース棒を地中に差し込むだけで十分 100Ω 以下にすることが可能である。設置は Fig. 1.2-2 のように、できるだけ湿った地中にアース棒の上端が 40cm 以上の深さとなるように打ち込む。粘土質の土地であれば望ましく、砂礫地では良好なアースが取りづらいことがある。その場合はアース棒を 2m 程度の間隔で打ち込み並列接続する。アースから接続機器まではできるだけ短い電線で配線することが望ましい。

その他の注意事項

雷対策の最も有効な手段は、機器の電源を落とし電源ケーブルや通信ケーブルを抜くことである。雷の発生時には電力線の瞬時停電が発生する可能性もあり、安全が確認された後に観測機器の動作確認を行わなければならない。また、雷発生時は落雷の危険の高いタワーや周辺で作業を行ってはならない。

Tips!

様々な電気機器の中で電話、モデム、パソコンなどのように、電源ケーブルと通信線の 2 種類の電線に繋がった通信機器に被害が集中する傾向にある。これは、一方の電線路から侵入したサージがこれらの機器を通過して他方の電線路に抜け出すという形態が多いことによる。電線だけでなくアース線も同様な動きをすることがある。従って、不必要に電線路を増やすことは避けるべきである。

Tips 1.2-7

Tips!

セラミックアレスタなどの保護素子を端子台などに接続する空間はかなり狭い場合が多い。素子同士の接触を避けるためには熱収縮チューブや絶縁チューブを用いて保護すると良い (Photo 1.2-10)。

Tips 1.2-8

1.2.5 観測小屋

フラックス観測ではデータロガーやパソコンなどを格納するために多くの場合、観測小屋が必要である。この場合、観測環境を乱さないようにできるだけ小さくするのが原則である。タワーに近い位置に置く方が配線・配管を短くでき作業には有利であるが観測環境を乱さないような距離も勘案して観測小屋を設置する。気候条件によっては簡単な換気、冷暖房・空調の設備が必要である。床は地表面より高くなっているほうが土砂や雪を小屋内に持ち込みにくく小屋内を清潔に保ちやすい。CO₂ 濃度校正用のガスボンベを格納する小屋は道路に近いところに設置するとボンベ搬入に便利である。したがって、ガスボンベを格納する小屋とその他のデータロガーや制御装置を格納する小屋を分けて建設することも考えて良い。データロガーやその他の計測機器を格納する小屋はタワーに近い方が配線

長などを短くできる利点がある。

森林総合研究所では市販されている物置小屋にコンクリートの床を設置して使用している (Photo 1.2-12)。ガスボンベなどの重量物を格納するために床はコンクリートなどで丈夫なものとする必要がある。治安の悪い国では鋼鉄製の運搬用コンテナなども観測小屋として利用される。

森林総合研究所の現在の観測サイトでは小屋の設置場所はタワー直下としている場合が多い。これは国内の場合、十分閉鎖した高い森林樹冠の存在がゆえにタワー直下の影響がタワー上での観測に与える影響は小さいと考えているからである。その反面、森林の地表面付近での観測は小屋やタワーから離れた地点を選定する必要がある。植生高の低い農耕地・草地や疎林の場合には観測小屋をタワーから離す必要があるだろう。観測項目が必要最小限に絞り込まれている場合は小屋ではなく、いくつかの計測ボックスに分散してデータロガーや制御器・計測器などを格納することが可能である。



Photo 1.2-12 タワーの直近に建てられた観測小屋 (中央) とボンベ格納庫 (右)。(札幌森林気象試験地)



Photo 1.2-13 乾燥剤 (押し入れ用湿気取り) を入れた計測ボックス。

Tips!

計測ボックスなどは雨や虫や湿気が入らないようにできるだけ密閉する。配線の出入りする穴には粘土パテなどを詰める。その上で、ボックスのなかに乾燥剤を入れておき、定期的に交換する。ボックス内にスペースがあれば押し入れ用の湿気取りなども使える (Photo 1.2-13)。

Tips 1.2-9

1.2.6 その他

通路

植生や土壌の保全上、小屋とタワーの間や駐車地点から小屋やタワーへの経路、地上設置観測機器へのアプローチ等、人間が頻繁に行き来する経路には決まった通路を設定することが必要である。このことは湿原や水田では必須で、木道 (Photo 1.2-14) のようなものを設置することが多い。森林でも

林内の土壌保全を図るために通路を木道にするなどして長い年月のうちにタワー周辺の土壌や植生を人為的に改変してしまわないような配慮が必要である。

農耕地サイトのメンテナンス作業等で特に留意すべき点としては、まず、タワー・測器・ケーブル等の固定及び支持用の金具類（クランプ、ボルト、ナット、アーム、杭等）や工具類を圃場に遺失しないことである。これらの遺失物は農作業の障害となり、作業者や農業機械を損傷するおそれがある。また、損料の対象とする区域内であっても、作物や土壌への攪乱をできるだけ小さくする必要がある。地権者や圃場の管理者にとっては、たとえ補償として損料を受け取ったとしても、自らが管理する田畑を荒らされることは気持ちがよいことではない。民有地で長期観測を行う場合には、このような配慮も忘れてはならない。



Photo 1.2-14 タワー周辺に設置された木道。（ロシア，ツラ）

フェンス及び監視

安全上、保安上の理由から、高いタワーの周囲は人が自由に近づけないようにフェンスで囲うべきである。タワー直下にいる人間には落下物の危険がある。また、観測に無関係な人が興味半分にタワーに上ろうとすることを防ぐ意味も有る。フェンス外側には立ち入り危険警告の看板を掲示しておく。

しかしながら、農耕地の観測サイトの場合は、一般にタワーの高さが低いので周囲をフェンスで囲うと観測結果に影響を及ぼす恐れがある。それとともにフェンスは農作業（機械作業）の障害となるため、一般には設置しない場合が多い。しかし、人家から離れた観測サイトの場合は、測器等の盗難や人為的な破損等に対する対策を講ずる必要がある。具体的には、監視員の配置や監視カメラの設置が考えられ、森林サイトでも有効である。前者は人件費が安価な諸外国の観測サイトで特に現実的な方策である。

通信

緊急事態に際しての連絡のために、電話線を引いておくのがよい。携帯電話が通じる場合はその限りではない。インターネット回線もあればなおよい。オンラインでデータ回収を行うことは可能であるが、必ず現地にデータを記録・蓄積しておくことがデータ保全上安全である。

1.3 観測項目の選定

Measurement variables: recommendation and orders of precedence

フラックス観測とフラックスデータの解析や利用に必要な観測項目を以下に列挙した。ここでは CO₂ フラックスを中心とした観測を行う際の優先順位を高い方から，“必須”，A，B，C，とランク付けした。ランクの低い項目ほど研究目的に応じて取捨選択する余地が大きい。

1.3.1 渦相関法（乱流変動法）観測に必須の観測項目

以下の項目がエネルギー・二酸化炭素フラックス観測に必須である。

- 1) 3次元の風速変動
- 2) 超音波温度変動
- 3) 水蒸気（密度，あるいは容積混合比）変動
- 4) 二酸化炭素濃度（密度，あるいは容積混合比）変動
- 5) 応答性が遅くても安定したセンサによる気温，湿度，気圧

1.3.2 微気象・水文要素

渦相関法観測に加えて，以下のような微気象・水文要素の平均値観測が挙げられる。

微気象要素・水文要素の観測はフラックスの分析・解析に利用される。特に，本節で“必須”とした要素は CO₂ フラックスや生態系正味 CO₂ 交換量の品質チェックと補間に必須である。

放射量

短波，長波，光合成有効放射量各々の測定についてキャノピー上とキャノピー下の位置で下向きと上向きの成分をすべて測定することが理想であるが，キャノピー上での測定が優先される。（Table 1.3-1）正味放射量（純放射量）は下向きの短波放射量と長波放射量の和から上向きの短波放射量と長波放射量の和を差し引くことによって算定できる量であるが，バックアップ機器として独立に正味放射量計を設置することを考えても良い。その他にリモートセンシング技術に対応した地上検証作業などとして分光放射計や特定の周波数領域の放射量計を設置することが行われている。

Table 1.3-1 フラックス観測に必要な要素（放射量）

	群落キャノピー上		群落キャノピー下	
	下向き	上向き	下向き	上向き
短波放射量	必須	必須	A	A
長波放射量	A	A	B	B
光合成有効放射量	必須	必須	A	A
分光放射量（波長別放射量）	B	B	C	C
正味放射量	B	B	C	C

基本的な微気象要素

キャノピー上の渦相関法測定高度付近での気温、湿度、風速、風向は必須である。

降水量と浅い深度の地温も必須である。

プロファイル（鉛直分布）観測要素

Table 1.3-2 にプロファイル（鉛直分布）観測要素を示す。

CO₂ プロファイルは、群落の NEE（net ecosystem exchange、生態系の CO₂ 純交換量）を算定する際の二酸化炭素の貯留変化量を算定するために必要である。複雑な構造を有する森林樹冠層内の光環境を詳細に測定するには放射量（日射量や光合成有効放射量（PAR））のプロファイル観測も行うことがある。

Table 1.3-2 プロファイル（鉛直分布）観測要素。

観測要素	ランク
気温プロファイル	B
湿度プロファイル	B
風速プロファイル	B
地温プロファイル	A
PAR プロファイル	B
CO ₂ 濃度プロファイル	A

その他

観測サイトの立地特性を勘案した研究目的に応じて様々な観測項目が取捨選択できる。（Table 1.3-3）

Table 1.3-3 その他の観測要素。

観測項目	ランク
気圧	A
地中熱流量	A
キャノピー表面温度，葉面温度	C
積雪深	A
積雪水当量	C
降水の水質	C
土壌水分プロファイル	A
地下水位とその水質	C
樹雨降水量（霧の捕捉による生態系への降水量）	C
水位，水温，灌漑水量	B
樹幹温度：樹幹の貯熱量算定，あるいは樹幹の呼吸量推定などで必要	C
キャノピー着水量または着雪量または水濡れの有無（感雨時間）	C
樹液流速または流量	C
樹冠遮断量（林内滴下/樹冠通過雨量，樹幹流下量）とそれらの水質	C
流域流出量とその水質	C

1.3.3 生態系の構造，基礎的特性

生態系の構造や基礎的特性の調査は，（特に背の高い森林では）労力のかかるものが多い。経年的経時的変化の小さいものであれば，計測期間中にたとえ 1 回だけでも調査を行っておくとサイト条件を明らかにするうえで貴重な情報となる。

なお，農耕地の炭素収支の定量化を目的とする観測研究では，収穫物の持ち出し量を推定する必要があるため，収穫時の部位別の乾物重と炭素含有率の測定は必須である。また，農耕地の管理方法によっては，堆肥等の有機質資材の投入や作物残渣の焼却に伴う炭素の流入・流出量も重要な測定項目となる。

（Table 1.3-4）

Table 1.3-4 生態系観測要素。

観測項目	ランク
LAI（鉛直積算値の季節変化）	A
LAI（鉛直プロファイル）	B
フェノロジー調査	B
キャノピー表面画像	B
林床からの全天画像	C
リターフォール量	C
土壌調査	B
地上部現存量推定のための樹木毎木調査	A
樹木地下部調査	C
収穫物持ち出し量	A
施肥などの資材投入量	A
焼却処分量	A
葉の光合成特性	B
樹木葉の窒素含有量	B

1 章関連情報

参考文献

AmeriFlux Standards: Guidelines/SOPs <http://public.ornl.gov/ameriflux/sop.shtml>
Fluxnet-Canada Measurement Protocols Working Draft Version 1.3
http://www.fluxnet-canada.ca/pages/protocols_en/measurement%20protocols_v.1.3_background.pdf

機材情報

1.2

モノレール

- ・ 光栄産業(株) <http://www.koei-m.co.jp/>

タワー

- ・ 日本軽金属(株) (日軽フォレストタワー) <http://www.nikkeikin.co.jp/>
- ・ (有)シーキュータガミ (無線用タワー) <http://www.cq-tagami.jp/>
- ・ イーグル・クランプ(株) (墜落防止装置) <http://www.eagleclamp.co.jp/>

電気工事

- ・ (株)関電工 <http://www.kandenko.co.jp/>

ケーブル保護管

- ・ 古河電気工業(株) (エフレックスキューブ) <http://www.furukawa.co.jp/>

発電システム・電源装置

- ・ ナチュラルスカイネットワーク (太陽光発電システム)
<http://www.natural-sky.net/>
太陽光発電システムの選定と電力計算例 <http://www.natural-sky.net/sisutemusekkei.htm>
- ・ Campbell Scientific <http://www.campbellsci.com/>

避雷対策

- ・ (株)サンコーシャ (Y08U-75B) <http://www.sankosha.co.jp/>
- ・ 富士電機テクニカ(株) <http://www.fe-technica.co.jp/>
- ・ (株)昭電 <http://www.sdn.co.jp/index.html>
- ・ 森長電子(株) <http://alp-plp.co.jp/>

物置

- ・ (株)淀川製鋼 (ヨドコウ物置) <http://www.yodomonooki.jp/>
- ・ (株)稲葉製作所 (イナバ物置) <http://www.inaba-ss.co.jp/>

2

乱流系観測

2.1 超音波風速温度計

Ultra sonic anemo-thermometer (SAT)

概要

乱流変動法（または渦相関法）に基づくスカラ量のフラックス測定では、測定対象とするスカラ量に関わらず、風速の変動成分の測定を必要とする。地表面 - 大気間を対象とする測定では、鉛直方向の交換が重要になるため、鉛直風速 w [ms^{-1}] に対する変動成分 w' [ms^{-1}] の測定は必須である。乱流による交換量を出来るだけ正確に見積もるためには、 w' は 10Hz 程度の時間間隔で測定しなくてはならず、かつ数日以上以上の非ドリフト性、及び、1 年～数年の野外観測に対する耐久性も合わせて必要とされる。超音波風速温度計（ultra-sonic anemo-thermometer、以下 SAT）は、現在のところこれらの条件を満たすほぼ唯一の測定機器であり、乱流変動法でのフラックス測定には不可欠である。

測定原理

SAT は対面する 2 個のセンサ（またはトランスデューサ、transducer）を結ぶ直線（パス、path）間の風速と音速（velocity of sound in air、 c_s [ms^{-1}]) を測定する。野外観測で用いる SAT のパスの距離（スパン長、span length）は通常 0.05 ～ 0.20m 程度である。2 個のセンサには音響素子の送受信機が内蔵されており、各々のセンサ間の信号伝播時間 t_1 [s]、 t_2 [s] から、パスに平行な風速成分の速度 v_d [ms^{-1}] と音速 c_s [ms^{-1}] が以下の要領で演算される。

スパン長を d [m] とすると信号伝播時間（ t_1 、 t_2 ）はそれぞれ

$$t_1 = \frac{d}{c_s + v_d}, \quad t_2 = \frac{d}{c_s - v_d} \quad (2.1-1a, 2.1-1b)$$

となり、式（2.1-1a）、（2.1-1b）の逆数同士を減じることで v_d は

$$v_d = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) \quad (2.1-2)$$

と算出される。

また、式（2.1-1a）、（2.1-1b）の逆数同士を和し、これに音速 c_s と音仮温度 T_v [K] との間について成立する式 $c_s^2 = 403T_v$ を代入すると、 T_v は以下のように算出される。

$$T_v = \frac{c_s^2}{403} = \frac{1}{403} \left[\frac{d}{2} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right) \right]^2 \quad (2.1-3)$$

以上は 2 個 1 組の相対するセンサにおける、センサに沿った風速と音仮温度の算出原理である。

SAT の音仮温度は横風補正・水蒸気補正を経て通常の気温として算出可能である。これらの補正については後述する（pp. 34～35）が、詳細は Kaimal and Gaynor（1991）や Hignett（1992）を参照されたい。

測器の種類

野外観測に用いる SAT は通常、異なる方向に配置された 3 組のセンサから互いに直交する x, y, z 軸方向（あるいは u, v, w 軸：通常 z 軸もしくは w 軸は重力方向に沿う鉛直軸）の 3 成分の風速が出力される 3 次元 SAT (3D-SAT) である。鉛直方向のスカラーフラックスのみを測定する 1 次元 SAT に比べて、3D-SAT を用いた場合、運動量フラックスの算出、データ取得後の風速座標変換、SAT で取得した音波温度の横風補正が可能となる。

3D-SAT は様々な仕様のものが存在する。商用販売されているものについては、野外観測での耐久性は既に相応の信頼性があるものと考えられる。

Table 2.1-1 では、現在までにわが国および世界中の観測で、特に信頼性が高い機器として定着している SAT について仕様を比較した。また、以下では汎用の 3D-SAT について、主としてセンサを含むフレーム部分（プローブ）の形状に着目して分類した。

鉛直パス型 3D-SAT

3D-SAT の中で、鉛直方向の風速は鉛直軸に沿ったパスを持つ 1 組のセンサが測定し、水平方向の風速を水平面に配置された 2 組のセンサが測定する形状のものを、ここでは“鉛直パス型”と呼ぶ。さらに、このうち特に 3 組のセンサが互いに直交するものを“直交型 (orthogonal probe)”と呼ぶ。鉛直パス型のプローブとしては㈱ソニック (旧㈱カイジョーソニック) の TR-61A (Table 2.1-1), TR-61C (Table 2.1-1, Photo 2.1-1(a)) 及び TR-90AH (TR のプローブの演算ユニットを含む測器名は全て DA-600), 米国 Applied Technologies Inc. (ATI) の "K" Style Probe (Table 2.1-1, Photo 2.1-1(b)) などが用いられている。これらのうち、TR-61C 及び "K" Style Probe は直交型のプローブである。

傾斜パス型 3D-SAT

3D-SAT の中で、3 組のセンサを 120 度ごとに配置し、さらにパスの midpoint が交差するようにセンサが傾けられているものが、現在ではよく用いられる。ここではそれらを“傾斜パス型”と呼ぶ。傾斜パス型プローブは大別して、センサの鉛直下側に支柱があり水平方向には対象形である全方位型 (omni-directional probe) と呼ばれるものと、センサの水平側を基点に上下からアームを張り出した（ここではブーム型とする）形のものがある。前者に相当する機種はソニックの TR-61B (Table 2.1-1, 測器名は DA-600) 及び SAT-540/550 (Table 2.1-1, Photo 2.1-1(c)), 英国 Gill Instruments Ltd. の WindMaster, R3 (Table 2.1-1), 米国 R. M. Young Company の 81000, ドイツ Metek Meteorologische GmbH の USA-1 などであり、後者に相当するのは米国 Campbell Scientific Inc. の CSAT3 (Table 2.1-1, Photo 2.1-1(d)) や Gill の HS (Table 2.1-1) などである。

💡 Tips!

傾斜パス型のプローブは、鉛直パス型に遅れて開発され、風速が卓越する水平風速場の攪乱を最小限にとどめる設計になっている。ただし、3組のセンサからの出力から3成分の風速が演算されるため、どの一組のセンサが故障しても、 x , y , z 軸方向の全ての風速成分と音価温度が得られなくなる可能性がある(平野・三枝, 2003)。

Tips 2.1-1

Table 2.1-1 主な SAT の仕様。

メーカー	機種・プローブ	スパン長 [m]★	形状 (z軸センサーの水平面 に対する傾き)	プローブ重量 [kg]	出力	消費電力	Flow distortion文献
ソニック	DA-600 (TR-61A)	0.2	鉛直軸型 (90度, 水平風速の パスは120度交差)	4.3	デジタル/ アナログ	<30W	Kondo and Sato (1982), Hanafusa et al. (1982), Wieser et al. (2001), 伊藤ら (2001)
	DA-600 (TR-61B)	0.2	傾斜パス-全方位型(45度)	7.9	デジタル/ アナログ	<30W	Wieser et al. (2001)
	DA-600 (TR-61C)	0.2	鉛直軸-直交型 (90度)	5	デジタル/ アナログ	<30W	Wyngaard et al. (1985) ※1, ※2, Shimizu et al. (1999) ※1, ※2, Wieser et al. (2001)
	SAT-540/550	0.1	傾斜パス-全方位型(45度)	2.7	デジタル/ アナログ	4W	なし
ATI	"K" Style Probe	0.15	鉛直軸-直交型 (90度)	<1.0	デジタル	1.2W	Kaimal et al. (1990) (see also ATI homepage) ※1, ※2
Campbell	CSAT3	0.115	傾斜パス-ブーム型 (60度)	1.7	デジタル/ アナログ	1.2W(20Hz で稼動時)	Cristen et al. (2001)
Gill	WindMaster/Wind Master pro	0.144	傾斜パス-全方位型(45度)	0.9 / 1.7(-pro)	デジタル/ アナログ(オプ ション)	0.66W	van der Molen et al. (2004)※2, Nakai et al. (2006)※2
	R3(-50, 100)	0.144	傾斜パス-全方位型(45度)	0.9	デジタル/ アナログ	3.6W	van der Molen et al. (2004)※2, Nakai et al. (2006)※2
	HS(-50, 100)	0.144	傾斜パス-ブーム型(48.75度)	2.5	デジタル/ アナログ	3.6W	Cristen et al. (2001)

★ 同機種内でも数mm程度の違いが生じる

※1 Transducer shadowのみ評価, ※2 定式化あり

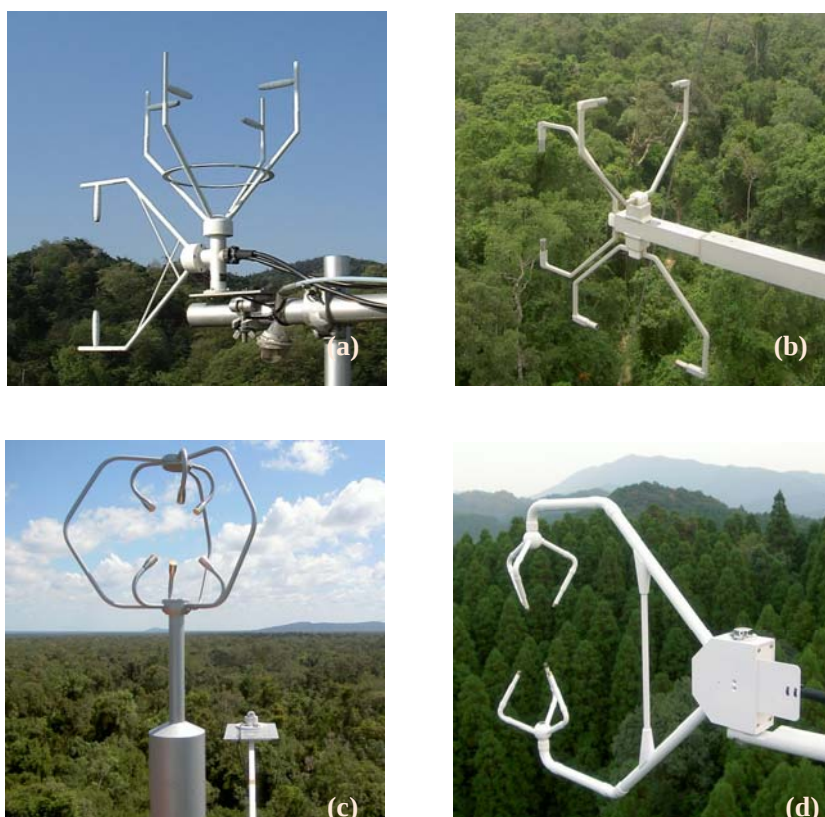


Photo 2.1-1 各種 SAT プローブの形状 : (a) ソニック TR-61C (鉛直パス・直交型, 山城水文試験地), (b) ATI "K" Style Probe (鉛直パス・直交型, カンボジア Kompong Thom Province の常緑林), (c) ソニック SAT-540 (傾斜パス・全方位型, カンボジア Kompong Thom Province の常緑林), (d) Campbell CSAT3 (傾斜パス・ブーム型, 鹿北流域試験地).

💡 Tips!

Table 2.1-1 に示した 3D-SAT はすべての機種で鉛直上向きの風速が z 軸方向で正の値として出力されるが、水平風速の向きは機種によって異なる。Fig. 2.1-1 には、Table 2.1-1 で比較した SAT の水平風速の軸方向について示した。

Tips 2.1-2

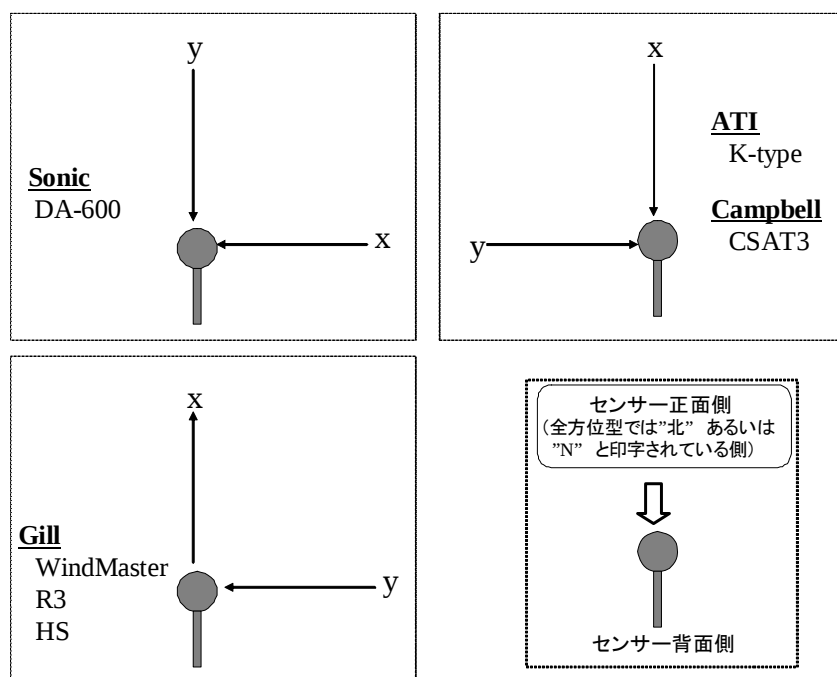


Fig. 2.1-1 主な SAT の水平風速の指示方向

設置

設置箇所の選定

SAT プロブをタワーに設置する際には、測定風速が SAT 自身やタワーなどの影響を受けて変化することが少なくなるように、以下のような点に留意して設置箇所を決定する：

- 1) タワーの頂上部に設置するか、長めのアームを用いて、タワーから離す。
- 2) タワーやプロブ自体が風を乱すことが少ない方向 (Flow distortion の小さい風向：Flow distortion については p. 34 で詳述する) と卓越風向が一致するように設置する。

1) でアームの長さは風がタワーを通過する距離の 1.5 倍以上が望ましい (平野・三枝, 2003)。それが困難な場合でも、設置や維持管理の都合なども勘案しつつ、出来るだけタワーから離して設置する。2) については、プロブの背面 (通常ケーブルを接続する側) を通過する風速をプロブ自身が乱すようなタイプの機器 (ソニックの TR-61A・TR-61C, Gill の HS, Campbell の CSAT3 など) で、特に考慮する必要がある。

プロブおよびパーツ

SAT プロブの設置には、機器とタワーとを接続するための金具が必要となる。多くの場合、ネジや U 字ボルトで SAT プロブ (あるいは SAT メーカーから供給されるアーム) を固定した台座を、半クランプや U 字ボルトでタワーに接続して固定する。最も簡単な台座は平板に穴あけ加工を施したものである。台座の大きさや穴の位置は SAT やタワーの仕様に依るため、通常自作を要する。台座の材質として

合板は加工し易い反面、反りや歪みが出る可能性が高い。そこで、長期に観測する場合は、ステンレスやアルミなどの金属か十分乾燥させた一枚板の木材を、適宜腐食防止加工を施して使用する。

SAT はプローブ部分とは別に信号変換機などを持つ機種があり、その場合、それらの設置場所や設置用の金具などを確保しておく必要がある。

Tips!

ソニックの DAT-600 (TR-61A, B, C) はプローブと信号変換ボックス (防水) および出力用ユニット (非防水)、Campbell の CSAT3 はプローブと信号変換ボックス (防水) で構成されている。通常、防水パーツはプローブの近くの野外に、非防水のパーツは降雨の影響を受けない小屋の中などに設置する。

Tips 2.1-3

ケーブル

SAT の信号ケーブルは通常 5 ~ 20 芯程度で構成されており、機種やケーブル長によってはその重量はかなり大きくなる (例えばソニックの DA-600 の信号・電源ケーブルは約 150g/m である)。運搬や取り回し等も考えて、予め過不足の無いケーブル長を調査して購入することが望ましい。ケーブルの屈曲点は、強風に依る揺動等で傷つかないように特に注意して、耐候性の結束バンド (英国 HellermannTyton のインシュロック等) やビニールテープを用いてタワーに固定する。また、タワーに沿わせているケーブルにも大きな引っ張り荷重が掛からないように、適当な間隔で固定しておく。

水準調整と傾きの確認

SAT プローブは基本的に重力方向に沿って z 軸風速が出力されるように (= "水平に") 設置するべきである。このとき、上記の台座に簡易の水準器を付設しておけば、水平調整の手間はかなり軽減できる。ただし、野外観測では厳密に水平に設置することが困難な場合がある。また、傾斜地上の測定などで、予備測定によって風速の吹き上げ・吹き降ろし角度が把握できている場合には、SAT をその角度に傾けて設置することも考えられる。しかし、いずれの場合でも、設置後の安定した状態での機器の傾きを傾斜計で測定しておき、随時風速・風向の補正に用いるべきである。作業者の荷重によるタワーの傾きや、強風によるタワーの揺動が懸念される場合には、自記式の傾斜計を合わせて設置して、データを記録しておくことも考えられる。

Tips!

Campbell の CSAT3 やソニックの DA600 (TR-61A) には、プローブに気泡式の水準器が設置されている。Gill の R3-100, R3A-100 および HS はプローブに傾斜計が含まれている (R3-100 あるいは R3A-100 はオプションで選択可能)。

Tips 2.1-4

データ取得

SAT の設置後、SAT の信号ケーブルをデータロガーに接続し、データロガーを適宜設定することで、SAT の出力値を記録することが可能となる。(データロガーの設定に関しては 2.6「データロガー」を参照のこと。)

SAT の出力は機種によって、アナログ電圧信号かデジタル信号 (RS-232C や Campbell の SDM) の少なくともどちらかで取得できる (その両方を出力できる機種も多い)。アナログ信号は多くのデータロガーで簡単に取得・記録できるという利点があり、一方デジタル信号には出力値にノイズが含まれにくいという利点がある。

Appendix 2.1-1 に、ATI の K-probe のデジタルデータを CR1000 で取得する際のプログラム例を示す。"K" Style Probe の RS232C コネクタの No.3pin・No.2pin を CR1000 の C1・C2 にそれぞれ直接接続している。このプログラムはソニックや Gill の SAT データのデジタル出力を記録する場合にも、参考になるかもしれない (ただし、保証の限りではない)。なお CSAT3 のデータを CR1000 などにデジタル出力する場合には、SDM ケーブルを用いた接続が簡便で消費電力量も小さく済むうえに、プログラム例も機器の説明書などに記されている。SDM ケーブルの長さは通常 7.62m であるが、これを延長して用いる場合には、Campbell データロガーの制御コマンド SDMspeed() の括弧内の数値を大きく設定する必要がある (通常のケーブル長ではこの値は 30 程度である)。

Tips!

SDM (Synchronous Devices for measurement) は、Campbell がデータロガーと周辺機器の通信制御を拡張するために制定したプロトコルである。SDM インターフェースを介して接続することにより高速で同期したデータを取得することを可能になるため、乱流変動法のように高頻度で複数の信号を取得しつつ信号間の時間的なズレに対する適切な配慮が必要な計測に適している。SDM の最大通信速度 (SDM clock rate) は、接続するセンサの数・スキャン間隔・ケーブル長などによって変化するため、通信エラーが生じないように測定システムに適した SDM 通信速度を設定する必要がある。

Tips 2.1-5

維持管理

SAT は大抵の場合、設置後の維持管理には、ほとんど手間がかからない機器である。長期間野外にあるために塗料の褪色や剥離等が見られる場合でも、実際の測定値への影響は、例えあったとしても僅少である。パス内およびセンサ上の雨滴や、付近への落雷・瞬間停電などが出力に影響を与えた場合にはデータに異常が現れるが、異常発生後、数日以上は無降雨日のデータから同様な異常が検出されない場合は、そのまま測定を継続して差し支えない。しかし、データ異常が断続的に続き、その原因が不明である場合には、すぐに代替機を準備してメーカーに修理依頼をする必要がある。

SAT の通常の維持管理は、上記のようなデータ異常が見られない限り、

- ・ SAT のパス内にクモの巣糸などが見られれば、これを除去する。
- ・ センサ表面が著しく汚れているようであれば、アルコールなどで湿らせた柔らかい布で拭く。

程度で十分である。また、長期間 SAT を設置している場合には、数ヶ月～1 年程度の期間を目安に、

- ・ 風速の 0 点（オフセット）を確認。
- ・ SAT に近い高度にある標準的な温湿度計データを参照しながら、音仮温度補正をする。
- ・ 設置時の水準が保持されているか、確認。

以上を行うことが望ましい。風速のオフセットの確認は室内で行うのが良いが、設置した状態でも可能である：SAT に大きなビニール袋をかけて暫時様子を見て、3 成分の風速値が 0 近傍で変動することを確認すれば良い。オフセットが大きい場合は SAT が故障している可能性が高いため、その後の取得データは迅速かつ慎重にチェックし、修繕の判断をすべきである。

Tips!

ソニックの TR-61 (A, B, C) では、センサ部分（プローブヘッド）がユーザによって簡単に交換できる。機器に異常がある場合にもセンサの交換によってそれが解消される場合がある。予備のセンサは SAT 本体の価格に比してそれほど高価ではないので、TR-61 系のプローブを使用する場合には、予備のプローブヘッドを準備しておくことが望ましい。

Tips 2.1-6

Tips!

SAT の出力データ異常は雨滴によるものが多い。プローブ自体を水平に設置した場合、傾斜パス型の SAT はセンサが傾いているために、雨滴が落ちやすいという利点がある。さらに Campbell の CSAT3 では、センサ表面に付着した雨滴をパス外に導くために Wick と呼ばれる網状の繊維をセンサ周囲に置くオプションがある。Wick はセンサ周りにあるためにセンサ周囲の風を余分に乱す可能性もあるが、Wick の大きさから鑑みてその影響は小さいと考えられる。また、Wick の付け外しは慎重を要するが、ユーザが行えるため、日本の梅雨時のように降雨の影響が大きい時期だけ設置することも考えられる。この Wick と同様の雨滴除去法は、原理的にはどのメーカーの SAT にも適用可能であろう。

Tips 2.1-7

SAT に内在する測定誤差

パス間での平均値を得ることによる誤差

SAT から得られる風速・信号速度の情報はパス間の平均値であり、スパン長より短い範囲で生じる微細な変動は平均化されてしまう（Path averaging effect あるいは Line averaging effect）。そのため、地表面近くでの測定など、より微細な変動に関する情報を必要とする場合には、スパン長が短くかつ直交型以外（複数のパスが同じ地点を測定する形状）の SAT を用いるべきである。

Path averaging によって高周波側の情報が欠落することに関する補正量は、大気安定度に依って変化する（例えば Kristensen and Fitzjarrald, 1984）。しかし、Moore (1986) が提示した大気安定度に依らない

最も包括的な方法でも、十分な補正が可能であると認識されている（例えば Aubinet *et al.* , 2000）。

傾斜パス型の SAT では 3 つのパスからの出力を演算して風速・音仮温度を得ているため、特に超高周波領域での Path averaging 補正には注意を要する（Horst and Oncley , 2006）。

機器自体が風速を乱すことによる誤差（Flow distortion）

SAT による観測はプローブを風速場の中に固定して行うために、機器自体のセンサやフレームによる自然風速場の乱れ（Flow distortion）を生じさせると考えられている。中でもセンサによる風速の遮蔽は Transducer Shadow と呼ばれ、水平面にセンサが配置されている鉛直パス型プローブでは、Flow distortion の主因となる。一方、傾斜パス型のプローブではセンサを支えるフレームや支柱が、特に鉛直風速に対する Flow distortion になる可能性が高い。

Flow distortion は、一般には風洞実験を通じて評価される。いくつかの SAT プローブについては、Table 2.1-1 に示した文献により風洞実験結果が参照できる。

一方、風洞実験結果を野外観測値に適用可能か、という論点については、賛否が分かれている。Flow distortion 補正を野外観測値へ適用した研究報告（例えば Kondo and Sato , 1982 ; Kaimal *et al.* , 1990 ; Nakai *et al.* , 2006 ; 斎藤ら , 2007）が数多くある一方で、この適用に否定的な立場を取る報告（例えば Hanafusa *et al.* , 1982 ; 伊藤ら , 2001 ; 石田ら , 2004）などもわが国を中心に発表されている。

測定誤差の観点からの推奨機種

汎用の SAT は全て一定の信頼性があるものと考えられ、特に Table 2.1-1 に示した機種の信頼性には定評がある。これらの中で、SAT に内在する誤差が小さく、かつ測定精度に対する信頼性が高いとされている機種として、現時点で最も評価が高いのは Campbell の CSAT3 であろう（例えば Mauder *et al.* , 2007）。

ただし、CSAT3 は風洞実験から得られた Flow distortion の影響について定式化されていないため、Flow distortion の補正を行う場合には、測定者自身による風洞実験が必要になる可能性がある。また、前述のように、センサを支えるためのブームによって、センサ後方からの風速場が強く乱される可能性が高い（Christen *et al.* , 2001）ことも考慮しておく必要がある。

SAT 出力温度の補正

横風補正

式（2.1-1）及び式（2.1-3）における c_s は、正確には、SAT のパス間で測定される音波の伝達速度である。パス間を進行する音波は、実際にはパス間を垂直に横切る風（横風） v_n [ms^{-1}] によってパス長よりも長い経路を通過して伝播している（Kaimal and Finnigan , 1994）。そのため、式（2.1-1）及び式（2.1-3）中の c_s は本来の（真の）音速 c_t [ms^{-1}] よりも遅い値となる。本来の音仮温度（ T_v [K] とする）は c_t に対応する値となるため、これを算出するためには横風による補正を行う必要がある。横風 v_n の条件下で測定された c_s と c_t の間には、以下の関係が成立する。

$$c_s^2 = c_t^2 - v_n^2 \quad (2.1-4)$$

従って

$$T_{vt} = \frac{c_t^2}{403} = \frac{1}{403} \left[\frac{d^2}{4} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right)^2 + v_n^2 \right] \quad (2.1-5)$$

となる。

この横風補正は、鉛直パス型プローブで鉛直の 1 成分のパスから音仮温度を測定している場合には、 v_n が水平風速に当たるため比較的簡単に実行できる。しかし、傾斜パス型で特に 3 成分のパスの平均値から音仮温度を測定している機種では、やや複雑な方法での補正が必要である (Liu *et al.*, 2001)。

Tips!

傾斜パス型で 3 成分平均値による音仮温度演算を行っている機種のうち、音仮温度として Campbell の CSAT3 は横風補正が行われた値を出力している。また、Gill の WindMaster, R3, HS のマニュアルには、横風補正を簡便に行うための解説が掲載されている

注：Gill 製 WindMaster & WindMaster Pro の User Manual Issue04 (2009 年 4 月) では、出力される音仮温度は横風補正が行われた値であることが示されている。新旧機種によって違いがあるため、マニュアルにて詳細を確認のこと。

Tips 2.1-8

水蒸気補正

顕熱フラックスを厳密に算出するためには、式(2.1-5)で算出される音仮温度 T_{vt} ではなく気温 T_a [K] を用いてフラックスを算出する必要がある。大気圧および水蒸気圧を p [Pa], e [Pa] とすると T_{vt} と T_a の間には、以下の関係がある。

$$T_{vt} = \left(1 + 0.32 \frac{e}{p} \right) T_a \quad (2.1-6)$$

ここで $e \ll p$ とすると、 $\left(1 + 0.32 \frac{e}{p} \right)^{-1} \approx 1 - 0.32 \frac{e}{p}$ となり、さらに $0.32 \frac{e}{p} \approx 0.32 \frac{e}{p - e} \approx 0.32 q \frac{m_d}{m_w} \approx 0.51 q$ となる (ここで m_d , m_w は乾燥空気および水蒸気の分子量 [kgmol⁻¹], q は比湿 [kg kg⁻¹] である)。従って

$$T_a = (1 - 0.51q) T_{vt} \quad (2.1-7)$$

となり、変動成分の計算についても

$$T_a' \approx T_{vt}' - 0.51 \overline{T_{vt}} q' \quad (2.1-8)$$

となる。水蒸気補正については、気圧及び水蒸気圧の瞬間値が得られている場合には、式(2.1-6)と T_{vt} の瞬間値から T_a を得て顕熱フラックス算出に用いれば良いが、別個に算出した温度フラックスと水蒸気フラックスから、式(2.1-8)の関係を用了補正を行っても近似的に問題ないと考えられる。

Appendix 2.1-1: プログラム例

ATI の"K" Style Probe データを Campbell CR1000 とコンパクトフラッシュモジュール (Campbell CFM100) で取得する際のプログラム例

```
'CR1000 Program for ATI SAT

'Declare Variables and Units
PUBLIC ATI_K as STRING * 100
PUBLIC SAT(4)

Units SAT=*ms-1/Deg C

'Define Data Tables
DataTable(Table1,1,-1)
    DataInterval(0,100,mSec,10)
    CardOut(1, -1)
    Sample(4, SAT, FP2)
'    Sample(1, ATI_K, string)
    'If activate, raw strings will be recorded
EndTable

'Main Program
BeginProg
    SerialOpen (Com1, 9600, 0, 0, 500)
    'The 3rd number corresponds to "Parity, Bits length, Flow ctrl"
    Scan(100,mSec,10,0)
    SerialIn(ATI_K, Com1,100,13,500)
    'ASCII"13" is Carriage Return
    SplitStr(SAT,ATI_K," ",4,0)

    'The last "0" corresponds to split by number
    CallTable(Table1)
NextScan
EndProg
```

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、赤外線の減衰率であり、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）やコスケ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ので、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 のパスの下方方向の位置に、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($0.0065 \text{ 秒} \times 17 = 0.1105 \text{ 秒}$)増加させれば、出力信号の総遅れ時間は 0.297 秒($0.186 \text{ 秒} + 0.1105 \text{ 秒}$)となり、データ数として 3 個分($0.297 \text{ 秒} / 0.1 \text{ 秒}$)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($0.3 \text{ 秒} - 0.297 \text{ 秒} = 0.003 \text{ 秒}$ 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 $V(\text{mol-CO}_2\text{m}^{-3})^{-1}$, 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, $\text{mol-CO}_2\text{m}^{-3}$ 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 (CO_2 と H_2O) 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

ボンベからのガス圧を 0.1MPa ($= 1.1\text{kgfcm}^{-2}$, 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。 H_2O 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、 H_2O 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 (途中に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で良い。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 ~ 1.0 Lmin⁻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 5 Lmin⁻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, 感度が大きく変化しうるイベント (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 H_2O 濃度変動測定

概要

水蒸気 (H_2O) 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、 H_2O 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 (CO_2) 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、 H_2O と CO_2 を同時に測定できる赤外線吸収型オープンパス $\text{H}_2\text{O} / \text{CO}_2$ 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、 H_2O 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 H_2O 分析計としては、 H_2O 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 H_2O 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、 H_2O や CO_2 ）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 程度的高速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

赤外線吸収型のオープンパス（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

紫外線吸収型のオープンパスは、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、紫外線吸収型のオープンパスは、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、紫外線吸収型のオープンパスは、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㈱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 - コンスタンタン、クロメル - コンスタンタン、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 フラックス測定の手法として、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（ $\Delta H = |H - H_{op}|$ ）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）やクローズドパス（ 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）。 ΔH 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、 ΔH 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(ΔH 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、 ΔH 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 ΔH を小さくする方法である。 ΔH 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、通常の気温条件下 ($-20 \sim 40$) では、消費電力 12 W での動作が可能となっている (条件によっては最小 8 W 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 4.1 W) 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 CO_2 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、 CO_2 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、クロー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、クロー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、クローズドパスの計算手順、すなわち、 H を用いずに CO_2 フラックスを算出することができる。従来のクローズドパスは、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、クロー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 CO_2 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 (H_2O) 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ーズドパスシステムより小さく、 $\sim 10\%$ 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 CO_2 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ので、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 CO_2 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($\Delta H = |H_{\text{op}} - H|$)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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 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、 CO_2 、 H_2O 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 CO_2 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 H_2O 出力を比較して CO_2 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 CO_2 密度と CO_2 混合比について説明を加えておく。 CO_2 密度 ρ_c [kgm^{-3}]とは単位体積中に含まれる CO_2 の質量であり、 CO_2 混合比とは CO_2 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。

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。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。

サンプル空気の流路

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。

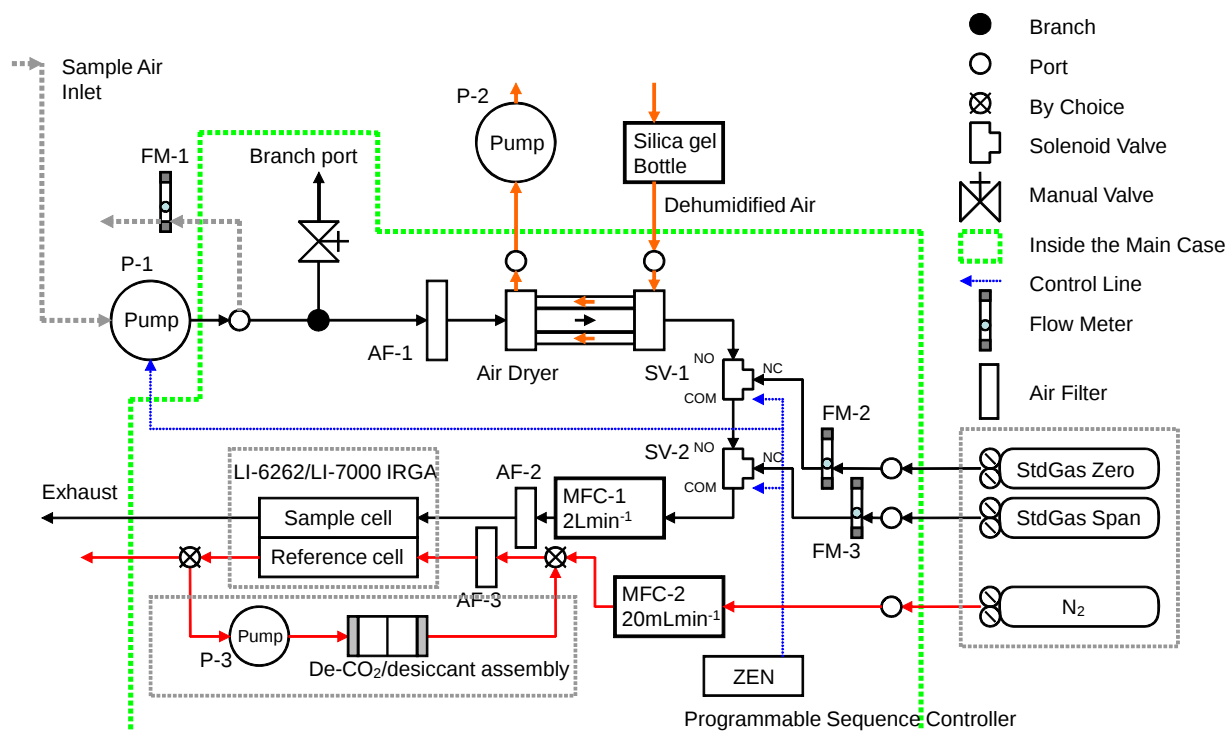


Fig. 2.3-1 クローズドパス型 CO₂ 分析計による空気サンプリングのシステムの例。

(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(株)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！）。ガスは大きなポ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。クローズ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。

現在のクローズドパス式 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、クローズドパス型測定を 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

クローズ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

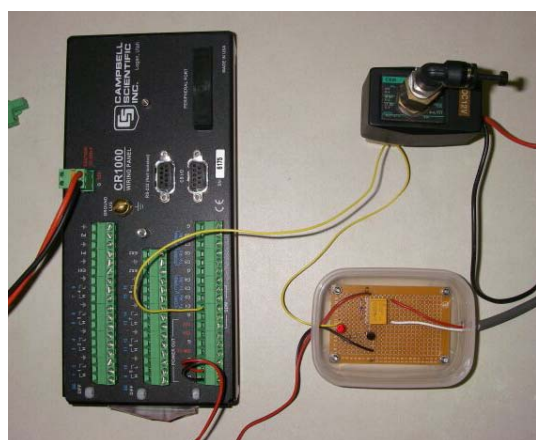


Photo 2.3-2 CR1000 のコントロールポートと機械式リレーを使用した電磁弁制御の回路例。

```
'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.

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。

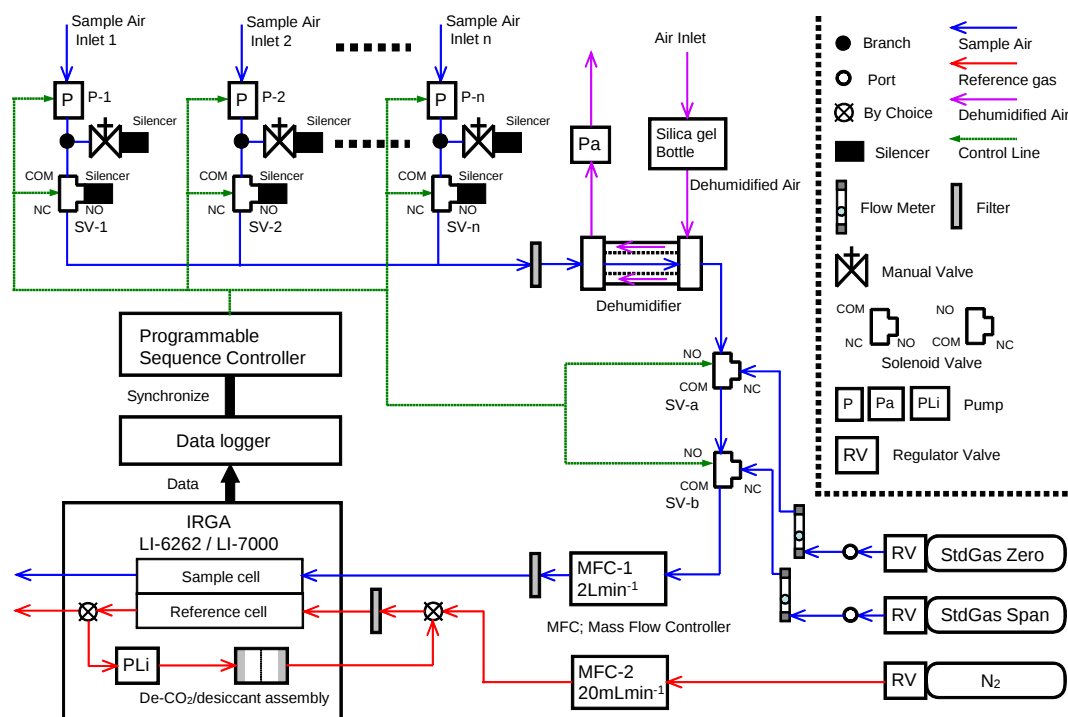


Fig. 2.4-1 CO_2 濃度プロファイルの測定システム例。

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 CO_2 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。

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

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

2.5 簡易渦集積法

Relaxed eddy accumulation (REA) method

概要

渦相関法は、地表面におけるフラックス観測を行う上で用いる仮定が少ないため、最も直接的なフラックス観測手法として知られている。渦相関法によってメタンや揮発性有機化合物 (VOC) 等の微量気体のフラックス観測を行う場合、通常 10Hz 程度の時間間隔で超音波風速温度計 (SAT) によって測定される風速の鉛直成分 w の変動に合わせて、これらの微量気体の濃度変動を非常に早い応答速度で測定する必要がある。しかし、微量気体の分析にガスクロマトグラフ (GC) 等の分析装置を用いる場合、その分析時間は数分から数十分以上であるため、渦相関法の適用ができない。このような場合によく用いられるフラックス観測手法が、Businger and Oncley (1990) が提案する簡易渦集積法 (Relaxed eddy accumulation method, 以下 REA 法と略す) である。

REA 法では、2つのサンプル空気貯蔵器を用意し、 w が正の場合 (上向き) と負の場合 (下向き) に分けて、各貯蔵器にサンプル空気を集積する。その後、一定時間内に各貯蔵器に集められたサンプル空気大気微量気体密度を分析し、2つのサンプルの差 ($\Delta\rho_g$ [mgm⁻³]) を求め、これに w の標準偏差 (σ_w [ms⁻¹]) と実験的に求められる係数 (b) を乗じてフラックス (F_g [mgm⁻²s⁻¹]) を求める。このように、測定対象成分の濃度が微量であり、濃度分析に時間を要する分析装置を用いる必要がある場合などにおいて、渦相関法に準じるフラックス観測手法として用いられているのが REA 法である。

測定原理

REA 法の基本となる渦集積法 (True eddy accumulation method) のフラックス測定では、鉛直風速の大きさに比例させて大気サンプリング時の流量を変え、 w が正の場合 (w^+) と負の場合 (w^-) で分けて一定時間、貯蔵器にサンプル空気を集積して時間平均し、微量気体の密度 (ρ_g [mgm⁻²s⁻¹]) を求める。渦集積法としては高速でパルス発信器と同期して動くステップモータを制御して、これに連結したシリンジを高速で動作させる方法 (Komori *et al.*, 2004) 等が提案されている。渦集積法では微量気体の鉛直フラックス (F_g [mgm⁻²s⁻¹]) は次のように示される。

$$F_g = \overline{w^+ \rho_g} + \overline{w^- \rho_g} \quad (2.5-1)$$

渦集積法は、早い応答速度でサンプリング流量を制御するため、測定システムが複雑化する。一方、サンプリング流量を一定にすることによって、測定を簡易化した手法が REA 法である。REA 法では、微量気体の鉛直フラックス (F_g) は次のように示される。

$$F_g = b \cdot \sigma_w \cdot \Delta\rho_g \quad (2.5-2)$$

ここで、 $\Delta\rho_g$ は一定時間内に各貯蔵器に集積された大気微量気体の平均密度の差、 σ_w は w の標準偏差、 b は実験的に求められる係数である。係数 b は、顕熱フラックスなどの渦相関法で測定可能な成分から求

める。対象とする微量気体フラックスの b を顕熱フラックスの b と等しいと仮定した場合、顕熱フラックスと b の関係は次の式で示される。

$$\overline{w'T'} = b\sigma_w(T^+ + T^-) \quad (2.5-3)$$

左辺は渦相関法で求めた顕熱フラックス、右辺は REA 法で求めた顕熱フラックスである。 T^+ と T^- は、それぞれ w が正の場合と負の場合の各平均温度 [K] である。これを b について解くと下記の通りとなる。

$$b = \frac{\overline{w'T'}}{\sigma_w(T^+ - T^-)} \quad (2.5-4)$$

REA 法システムの構成

大気微量気体の採取装置は主に SAT、電磁弁、ポンプ、マスフローコントローラ、貯蔵器、米国 Campbell Scientific, Inc 製の CR1000 や PC 等のプログラム可能な記録装置等からなる。SAT の近くにおいて、ポンプによって取り込まれたサンプル空気は、電磁弁 (Photo 2.5-1) の高速の動作によって w が正の時、負の時で分離されて貯蔵器に集積される (Fig. 2.5-1, 2 を参照。赤いラインが w が正の時の流路、青いラインが負の時の流路を示す)。このときサンプル空気の流量はマスフローコントローラによって一定に制御されるが、サンプリング量が捕集管の破瓜容量を超えないように小流量 (0.2Lmin^{-1} 以下) に設定する。一方、風速変動の影響を受けない一定の吸入量 (4Lmin^{-1} 以上) を維持する必要があるために、バイパスを用いた構成とする。また、電磁弁切り替え時の圧力を一定にする目的で系内に三方弁を設け、吸入口閉鎖時に活性炭を通過した VOC フリーの空気を代わりに供給する構成とする。

電磁弁の制御には CR1000 等のプログラム可能なデータロガーが、風速と温度を記録すると共に w の移動平均値と比較して w の正負を判定する目的で用いられる (Photo 2.5-2)。 w の平均化時間は長周期の風速の変動の影響を受けないよう実際の観測条件に応じて決定するが、15 分以下の短い時間に設定する場合が多い。平均化時間を 15 分とし 10Hz で記録した場合、判定の 0.1 秒前までの 9000 データの移動平均値と比較して w の正負の判定を行うことになる。REA 法ではデータロガーや風速計の最小分解能を下回るような微風速時の影響を除去する目的で閾値を設けて、閾値以下の風速のときに微量ガス成分を貯蔵せず放出する帯域 (デットバンド) を設定する場合がある。

微量ガスはそれぞれ吸着性の強さや、沸点、大気中寿命などの点で異なる特徴を持っているため、目的とする微量ガスそれぞれの特徴と分析手法上の必要性に合わせて REA 法のシステムを専用に構成する必要がある。例えば貯蔵容器としてはメタンの場合、PTFE 製の大型のテドラーバッグが用いられることが多い。一方、イソプレンやテルペ



Photo 2.5-1 REA 法システムの SAT と空気の取り入れ口の例。(山城水文試験地)

ン類等の VOC の貯蔵には直径 6mm 程度の細いステンレス管あるいはガラス管に吸着剤を充填した大気捕集管やキャニスタ（ガラス製あるいはステンレス製の真空容器）を多連装した貯蔵システム（Photo 2.5-3）が用いられることが多い。この貯蔵システムはプログラブルリレー等で一定時間ごとに流路を切り替えて自動で大気サンプリングを行うシステムである。測定システムの構成では、大気採取口になるべく近い位置で流量を一定に保ちつつ、高い応答性をもってサンプル空気を分離すること、流路における吸着やオゾンなどによる分解の影響を極力抑えて貯蔵するなど、高精度の分析結果を得るための工夫を施すことに対して特に注意を要する。それらの対策としては、紫外線の遮蔽、オゾンスクラバの設置、PTFE 製素材や加熱導管の使用などが挙げられる。

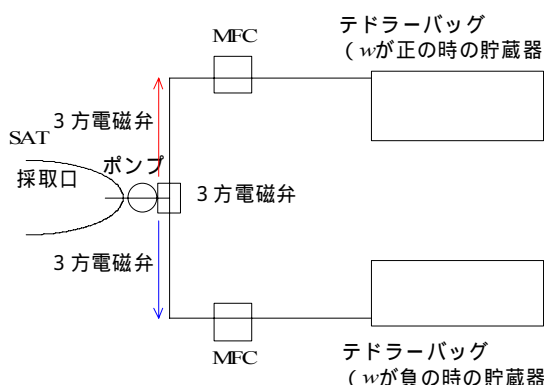


Fig. 2.5-1 REA 法システム（メタン用）の構成図

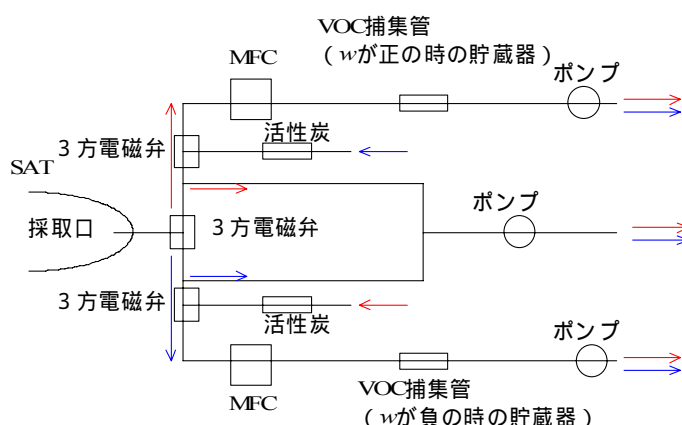


Fig. 2.5-2 REA 法システム（VOC 用）の構成図

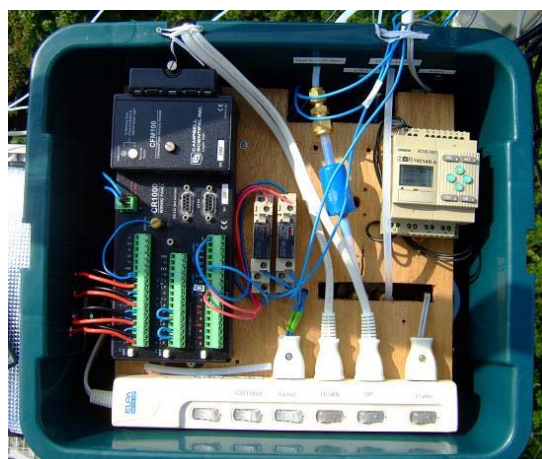


Photo 2.5-2 CR1000 を用いた REA 法システムの制御部の例。（富士吉田森林気象試験地）

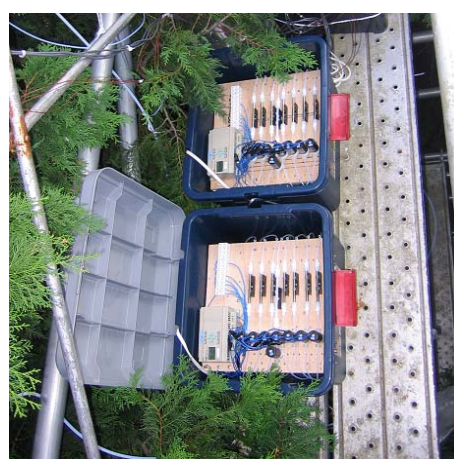


Photo 2.5-3 多連装された VOC 貯蔵器（捕集管）の例。（富士吉田森林気象試験地）

測定の流れ

一般的な微量ガスフラックスの測定の流れは下記の通りである。

- 1) SAT による w の観測と平均化
- 2) w の正負の判定と電磁弁の切り替えと判定結果の記録
- 3) 貯蔵器の自動交換（あるいは次の集積時間中に現地における自動分析）

- 4) 現地における自動分析を行わない場合，貯蔵器を分析室に持ち帰り，分析装置を校正用標準ガスを用いて校正した後に分析し， w の正負時での濃度差を求める
- 5) 顕熱フラックスを用いた b 値の算出

分析装置の種類

微量ガスの分析装置としては主にガスクロマトグラフが用いられてきたが，近年それ以外の分析装置も用いられるようになってきている。微量ガスのフラックス観測に用いられる分析機器の例としては下記のような種類がある。

ガスクロマトグラフ水素炎イオン検出器

ガスクロマトグラフ水素炎イオン検出器 (GC-FID) は CO_2 と CO を除く炭素化合物にのみ反応するため，検出時に他の成分の影響を受けにくい特徴を持つ。また，適切なカラムを用いて成分の分離を行うことで，各成分についての高感度な定量分析が可能である。非常に構造がシンプルで低価格な上，安定性が高く，ランニングコストも低い。メタン分析には活性炭等を詰めたパックドカラム，VOC (揮発性有機化合物) 分析にはキャピラリーカラムが用いられる。分析にはメタンで数分，VOC ではそれ以上の保持時間を要し，カラム温度を上げて高沸点成分も分析する昇温分析では分析後の冷却時間も必要とする。定性分析においては保持時間以外の情報が得られないため，標準物質やガスクロマトグラフ質量分析器からの情報を用いる必要がある。分析に必要な水素ガスについては，漏出時には爆発を引き起こす可能性があるため，警報器などの安全装置や自動発生装置を用い，良好な換気に心がけるなどの，安全対策に注意を要する。

ガスクロマトグラフ電子捕獲検出器

ガスクロマトグラフ電子捕獲検出器 (GC-ECD) は化合物が自由電子を捕獲して基底電流が変化する反応を利用した分析器で，京都議定書で規制された温室効果ガスである N_2O (亜酸化窒素) の検出に用いられる。大気中の N_2O 濃度は 310ppb 程度と微量であるため，大気中の N_2 と O_2 のピークの影響を受ける。このためハートカットと呼ばれるカラム中目的成分のピーク付近のみの抽出を行い検出器で分析を行う。また，GC-ECD は電子と結合する特定成分 (ハロゲン化物，ニトロ化合物等) の親電子物質に対してきわめて感度の高い検出器であり，モントリオール議定書で規制された臭化メチル (CH_3Br) の分析にも用いられる。GC-ECD には放射線型と非放射線型があり，放射線型は使用条件及び保管条件について放射線に関連する法令の遵守が義務づけられている。

ガスクロマトグラフ質量分析器

ガスクロマトグラフ質量分析器 (GC-MS) は非常に高感度であることから大気中の微量ガスの定性・定量分析に多く用いられている。質量分析器では化学構造を反映したマススペクトルが得られる特徴がある。非常に低濃度の微量ガスの分析では，導入時の前処理として濃縮を必要とする。REA 法による VOC フラックス観測で多く用いられている手法として，吸着剤の入った大気捕集管を貯蔵器として持ち帰り，これを加熱脱着装置で加熱脱離し，クライオフォーカスと呼ばれるコールドトラップでの冷却濃縮及び加熱導入を経た GC-MS 分析が行われている。また，キャニスタで大気を持ち帰り，3 ステージ

トラップと呼ばれる水分の選択的除去処理後の導入によって、従来困難であった水溶性成分であるアルコール類の分析も行われるようになっている。分析時間はキャピラリーカラムを用いる GC-FID と同様であるが、ターボ分子ポンプの交換などに比較的多額の維持費を要する。

ソフトイオン化法質量分析計

ソフトイオン化法質量分析計の 1 つである陽子移動反応質量分析計 (PTR-MS) は純水の蒸気をイオン化してプライマリイオン源としており、プロトンとの親和性が水よりも小さいアルカン、エチレン、プロピレン、アセチレンや、無機ガス (硫化水素を除く) 以外のガスの検出が可能である。大気導入時における成分の濃縮などの前処理が不要であり、定量分析において GC-MS よりも測定誤差が少なく、非常に高精度で連続的な分析が可能な特徴を持つ。さらに、数秒間隔で同時に複数の VOC の定量が可能な特徴も持つ。この高い時間応答性を利用した渦相関法と REA 法の間中に位置する測定手法として、分析時間間隔で分画し、1 秒以下の大気サンプリングと分析、 w の記録を行う分画乱流変動法 (disjunct eddy covariance method, DEC 法) の開発も行われている (Rinne *et al.*, 2000)。このサンプリング手法は大気のサンプリング時間を可能な限り短くすることによって小さな渦による輸送の影響を反映させることを目指している。実際には、DEC 法を改良した vDEC 法 (virtual disjunct eddy covariance method, Karl, 2002) も化合物のフラックス観測には多く用いられている。

ソフトイオン化法質量分析計としては、イオン分子反応質量分析計 (IMR-MS) もある。これは PTR-MS よりも高価ではあるが全てのガスの測定が可能で PTR-MS と同等の感度を持つ。IMR-MS はプライマリイオン源として Hg, Xe, Kr の 3 種類のガスを用いており、PTR-MS よりもフラグメンテーション (結合が破れ小さなイオンに断片化すること) がやや起こりやすいが、複数のイオン源でフラグメンテーションを分析することで物質の特定も可能とする。一方で、PTR-MS も複数のイオン源をオプションとして装備することが可能になっており、両者の機能面での違いは少なくなっている。

波長可変ダイオードレーザ分光計

波長可変ダイオードレーザ分光計 (TDLS) では、2 枚の高反射率のミラーを向かい合わせ数 km の長い光路を確保し、その中でレーザを多重反射させ、その強度の減衰量や減衰時間を測定する。この手法ではミラーや光源のアラインメント調整が実験室外での観測における大きな課題となっていた。しかし、近年、レンズを用いた光学的な工夫等によってメタン計等についてこの問題は解消されてきている。米国 Los Gatos Research, Inc. 製の高速メタン計はセルの容量が 408ml と大きい上、セル内部を低圧に維持する必要があるため、短時間間隔の測定に大型の真空ポンプによる吸引を必要とする特徴がある。Picarro Inc. 製の乱流変動法用とされているメタン計 G2311-f はセル容量が小さく、キャビティリングダウン分光法 (cavity ring down spectroscopy, CRDS) と呼ばれる別のレーザ分光法を用いれば H_2O と CO_2 を同時に測定可能である。

化学発光法分析計

イソプレンやエチレンの測定には化学発光法を利用した計器が開発されている。イソプレン計の場合、高濃度のオゾンで満たされた反応セル内に大気を導入し、セル内でオゾンとイソプレンが化学発光して発する紫外光 (430nm) をフィルタで選択し、電子増倍管で測定する。エチレン計ではエチレンによる

化学発光が長時間持続する性質を利用し、混合槽で NO とオゾンの化学発光を終了させ、混合槽通過後にエチレンによる化学発光を測定する。化学発光法は干渉成分の影響を受けやすい特徴がある。

設置

設置箇所の選定

REA 法システムの大気サンプリング用吸入口の位置は、SAT のなるべく近傍でかつ、鉛直風速成分に影響を及ぼさない位置とする。さらに、電磁弁による流路の切り替え位置も時間遅れを生じさせないために、吸入口の直後とする。吸入時の流量に対して風速変動の影響を受けないために十分な吸引力を確保し、マスフローコントローラで一定に制御する。分析装置への水の進入や内部での凝結に特に注意を要する。

Tips!

Campbell の CR1000 には 12VDC 出力用のスイッチが付いた端子が標準で装備されている (SW12V 端子)。これは 20 条件下で 900mA までの電流を流すことができるため、直接電磁弁を制御することも可能である。一方、C1 から C8 までのデジタル I/O ポートは 3.5V で 2.0mA までの電流しか出力できないため、これらのポートを各種制御に用いるためにはリレーを利用した回路を必要とする。この回路例は CR1000 のオペレータマニュアルの 5 章に掲載されている。

Tips 2.5-1

2.6 データロガー

Data Logger

概要

乱流変動法によるフラックス測定では、10Hz 程度のサンプリング間隔で複数の観測値を同時に記録する必要がある。乱流統計量を求めるには、鉛直風速の変動成分 w' とスカラーの変動値を数日間蓄えておける記録容量も必要である。データロガーに記録されたデータは記録されたメディアを交換する・通信ケーブルなどを利用するなどしてパーソナルコンピュータ(パソコン)に取り込めるようになっている。パソコンで利用できる汎用的なデジタルデータ(たとえばカンマ区切りテキスト: CSV 形式等)にしておけば、保存・バックアップなども容易にできる。

種類

記録計には大きく分けてアナログ電圧をデジタル化して記録する物とデジタル出力をそのまま記録する物の2種類ある。なかには両方ができる物もある。記録容量に関しても、内部メモリをストレージに持つ物やコンパクトフラッシュ、MO などに記録する物などがある (Table 2.6-1)。乱流関係の記録には高速な記録性能、大きな記憶容量を必要とする。その他微気象関係のロガーに関しては、3.9「データロガー」を参照されたい。乱流統計値と微気象要素はサンプリング間隔が異なるため、乱流関係用とその他微気象関係用とデータロガーを分けた方がトラブルも少なくてすむ。その際、データロガーの時刻を合わせ、データにずれがないようにする必要がある。最近のものではデータロガー同士でネットワークを組み、同期することも可能である。

何らかの物理量をアナログ出力で記録するときには、何 V がその物理量になるのかを把握しておく必要があり、精度良く測定するためには測定レンジと記録レンジを最適な範囲になるようにあわせておく必要がある。乱流系計測の測器は 0~5V で出力するものが多いので、0~5V のレンジで記録できるデータロガーがよい。

Table 2.6-1 乱流系計測用データロガーの種類

機種(メーカー)	A/D 分解能	記録間隔	記録メディア
CR3000 (Campbell)	83.33 μ V (± 5 V)	40 Hz	CF (オプション), USB メモリ (オプション)
CR1000 (Campbell)	667 μ V (± 5 V)	10 Hz	CF (オプション), USB メモリ (オプション)
es8 (ティアック, 生産終了モデル)	16 bit (± 5 V)	5 kHz	CF, USB メモリ
NR-1000 (キーエンス)	16 bit (± 5 V)	10 Hz	CF, USB メモリ
MEMORY HiLOGGER LR8430-20 (日置電機)	500 μ V (± 10 V)	10 Hz	CF, USB メモリ
ZR-RX20/40A (オムロン)	16 bit (± 5 V)	10 Hz	USB メモリ

 Tips!

データの記録に際しては、センサとデータロガーの分解能も考慮する必要がある。分解能とはセンサが認識することができる（あるいはロガーが AD 変換できる）最小の信号変化量のことである。ここで、分解能が 0.005ms^{-1} の超音波風速計を考えてみる。この風速計の測定レンジを $\pm 30\text{ms}^{-1}$ に設定し、そのアナログ出力レンジが $\pm 1\text{V}$ だとすると、最小出力信号は約 $166.7\mu\text{V}$ と考えられる。この場合、分解能が $166.7\mu\text{V}$ かそれより良いデータロガーを使用しないと、センサの最小出力を記録することはできない。

Tips 2.6-2

米国 Campbell Scientific, Inc. 製の CR1000, CR3000 は電圧測定レンジ、記録間隔や印加電圧をプログラムすることができるので非常に柔軟性が高く、多くの測器に対応できる。また、ロガー本体で計算ができるため、乱流統計値を記録するといったことも可能である。

デジタル出力を持つ多くのセンサは RS-232C 出力を採用しているが、ほかにも RS-422 出力を持つものや、SDI-12 (Serial Data Interface at 1200 baud rate) をもつ物などがある。RS-232C 信号はケーブル長を規格上 10m 以下に抑えなければならない。センサからデータ集録機器までの距離がこれよりも長い場合は、変換器を用いて光ケーブルを使用することにより接続長を延伸することも可能である。RS-422 信号は最大 10Mbps のスピードで、最大 1.2km までデータの伝送が可能であり、市販の変換器を用いて RS-232C 信号に変換することができる。CR1000, CR3000 は標準で SDI 通信と RS-232C 通信ができるのでセンサからデータ集録機器までの距離が長い場合にメリットがある。

パーソナルコンピュータをデータロガーとして用いることも可能である。その際には、アナログ出力のセンサに対してはアナログ・デジタル (AD) 変換ボードが必要である。デジタル出力をもつ多くのセンサは RS-232C 出力を持つが、現在 (2008 年) はパソコンの世界では旧式のインターフェースであるため、多くのパソコンは RS-232C ポートを標準では持たない。このため、USB-RS232C 変換ケーブルや RS-232C 拡張ボードなどが必要となる。また、多くのデータロガーはパソコンでのデータの取り込みをサポートしている。これを利用して、自動で定期的にパソコンへデータを取り込み、足りないデータロガー本体の記憶容量を補うことも可能である。

多くのデータロガーにおいて、データは記録容量を節約するためにバイナリ形式で収録される。記録されたデータは付属の専用ソフトウェアを用いて、パソコンに取り込み、パソコン上で CSV (Comma Separated Values) 形式等の利用しやすい形式に変換するものが多いが、なかには HTTP サーバや FTP サーバ機能を持つものもある。

測定方法

AC 駆動 (内部で使われているスイッチング電源はノイズを発生する) の場合には、必ず接地をし、ノイズの侵入を防ぐ。また、電源周波数に応じてフィルタをかけることもノイズ対策に有効である。ノイズは主に電磁誘導によっておこる。信号ケーブルと電源ケーブルを極力離す・シールド入りのケーブルを利用する・ツイストペアケーブルを利用する・ケーブルを短くする・ケーブルをまかない・ケーブルをきちんと固定する等がノイズ対策に有効である。

2.7 ノイズのチェックと対策

Noise check and reduction

発生するノイズの概要

気象観測のように各種センサを用いた計測を行う場合、測定値がノイズの影響を受けることがある。特に乱流系観測では、サンプリング速度が数 Hz ~ 数十 Hz と比較的速いことと、一般の気象観測よりも高い分解能の測定値を必要とすることから、ノイズの影響を受けやすい。影響するノイズの種類は、

- 1) 信号線に乗る電氣的ノイズ
- 2) 空間を伝わる電磁波のノイズ
- 3) 電源ライン (AC ライン) から伝わるノイズ

の 3 種類に分類することができる。

信号線に乗るノイズは、センサの絶縁抵抗やシールド不足が原因となって発生する場合と信号線が電力線、ポンプ、モータ、電磁波などの影響を受けて発生する場合がある。電磁波によるノイズは、観測システムのモニタやデータ転送のために導入する携帯電話や無線 LAN などのワイヤレス機器が原因となる場合はがあるので注意する必要がある。電源ラインに関係するノイズには、瞬停 (1 サイクルなどの短時間だけ電圧がゼロになる)、高調波電流 (本来の AC 波形が高周波で歪む)、電圧低下 (容量不足・配電盤から遠い)、フリッカ (電源電圧が低周波で振動) などがある。特に遠隔地や電源の不安定な地域での観測では、供給された電源の状態に注意を払う必要がある。

ノイズのチェック

各メーカーから提供されている乱流系観測機器は十分なノイズ対策が施されているので、通常ノイズに悩まされることは少なくなっている。しかし、観測を開始する時や機器を入れ替えた時などは、データに異常がないか注意する必要がある。

最も基本的なデータチェックは測定機器を全て接続した状態で、生の測定値をグラフ化してチェックすることである。測定値にスパイク状の値、バイアスされた値、電源周波数に関するリップルなどが含まれていれば、通常の乱流観測の測定周波数 (10Hz 程度) のデータでも異常値に気づくことができる。データ信号をオシロスコープやスペクトルアナライザなどの計測器でモニタすれば、より詳細にデータをチェックしてノイズの有無を確認できる。ノイズが確認された場合は原因を突き止める必要があるが、決まった方法は無い。信号線の着脱、電源系統の変更、ポンプなどの電力機器の停止など、様々な可能性を試すことにより原因を突き止めるしかない。

電源が原因となるノイズと測定機器の不安定化は発生しやすいので、準備した AC 電源の状態をチェックしておく必要がある。テストを用いれば電源電圧は容易に確認できる。さらにオシロスコープを使えば上記の様々な電源ノイズを確認できる。

ノイズ対策

(1) 信号線の対策

センサの絶縁抵抗やシールド不足が原因となりノイズが発生している場合は、信頼性のある他のセンサに変更することをお勧めする。信号線からノイズが入ってくる場合は、原因となる機器（電力系機器や無線 LAN など）からできるだけ離す、信号線の余りの部分をループ上にしない、ツイストペアケーブルやシールドケーブルを使用する、信号線を電力線からはなす、信号線を金属箔で覆うか金属管を通す、などの対策が考えられる。

また、乱流観測では 10Hz 程度のサンプル周波数が用いられるため、電源周波数（50Hz や 60Hz）以上の高周波成分は不要成分となるため、Photo 2.7-1 のように信号線にローパスフィルタ（25Hz 程度）を挿入することも有効である。



Photo 2.7-1 信号線用ローパスフィルタ。

(2) 電磁波の対策

携帯電話、無線 LAN、CPU などが発生源になる場合がある。これらの機器と計測用機器をできるだけはなすとともに、金属ケースや導電性素材を用いて機器にシールド（遮蔽）を行う。

(3) 電源対策

電源回路に Photo 2.7-2 のようなノイズカットトランスや耐雷トランスを入れることが、外部からの高周波ノイズやサージに対して有効である。また、瞬停や電圧変動対策としては Photo 2.7-3 のような無停電電源装置（UPS）を電源回路に入れることでトラブルを回避できる。一方、様々な計測センサへの DC 電源供給のために使用されるスイッチング電源はノイズの発生源となる場合もあるので注意する必要がある。



Photo 2.7-2 電源用ノイズカットトランス。



Photo 2.7-3 無停電電源装置。

ノイズの問題は対策を施そうとしても、一体どこをどのように対策してよいかが非常に難しい問題となる場合が多くある。ノイズに強い観測システムの設計のためには以下の点に注意すべきである。

- 1) 計測器の電源には、電力機器用の電源とは別系統の電源を用いる。ノイズカットトランスなどを用いて分離することが有効である。
- 2) トランスやフィルタを使用した時は、1 次側と 2 次側のラインは接近しないように分離して配線する。
- 3) 電力ラインと信号ラインをなるべく離す。やむを得ず交叉する場合は直交させる。観測小屋や観測タワーの配線では違う取り入れ口や鉛直パイプを使い、両者の配線位置を明確に分離する。
- 4) 信号線はできるだけ短くし、余りの部分をループ状にしない。
- 5) 測器やデータロガー、信号線などを、ノイズを発生していると思われる機器からなるべく離す。
- 6) アースの取り方には充分注意する。計測器同士のアースをつないで、しっかりしたアース端子に接続する。

Tips!

乱流系観測機器の多くがデジタル出力を持つようになってきている。デジタル出力の方がアナログ出力に比べてノイズに強い場合も多く、使用するデータロガーとの組み合わせが可能であれば利用すべきである。

Tips 2.7-1

2 章関連情報

参考文献

SDI-12: <http://www.sdi-12.org/>

- Aubinet M., Grelle A., Ibrom A., Rannik Ü., Moncrieff J., Foken T., Kowalski A. S., Martin P. H., Berbigier P., Bernhofer C., Clement R., Elbers J., Granier A., Grünwald T., Morgenstern K., Pilegaard K., Rebmann C., Snijders W., Valentini R. and Vesala T. (2000) Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology, *Advances in Ecological Research*, 30:113-175.
- Businger J. A. and Oncley S. P. (1990) Flux measurement with conditional sampling, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7:349-352.
- Hamotani K., Uchida Y., Monji N. and Miyata A. (1996) A system of the relaxed eddy accumulation method to evaluate CO₂ flux over plant canopies, *Agricultural and Forest Meteorology*, 52:135-139.
- 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 R. and Judd M. D. (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*, 96(D8):15269-15273.
- Moncrieff J. B., Massheder J. M., de Bruin H., Elbers J., Friborg T., Heusinkveld B., Kabat P., Scott S., Seogaard H. and 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 analyzers, *Boundary-Layer Meteorology*, 100:191-208.

機器情報

2.1

超音波風速温度計 (SAT)

- ・ (株)ソニック (旧株カイジョーソニック) <http://www.u-sonic.co.jp/>
- ・ Applied Technologies Inc., US ("K" Style Probe) <http://www.apptech.com/>
- ・ Gill Instruments Ltd., UK (WindMaster, R3, HS) <http://www.gill.co.uk/>
- ・ R. M. Young Company, US (Model 81000)
製品リスト <http://www.youngusa.com/products/>
価格リスト <http://www.youngusa.com/PRICELIST.pdf>
- ・ METEK Meteorologische Messtechnik GmbH, Germany (USA-1)
<http://www.metek.de/>
- ・ Campbell Scientific, Inc., US (CSAT3) <http://www.campbellsci.com/>

2.2

オープンパス型 CO₂ / H₂O 分析計

- ・ LI-COR, Inc., US (LI-7500 シリーズ) <http://www.licor.com>
- ・ ADC BioScientific Ltd., UK (OP-2) <http://www.adc.co.uk/>
- ・ Campbell Scientific, Inc., US (KH20) <http://www.campbellsci.com/>

2.3

クローズドパス型 CO₂ 分析計

- ・ LI-COR, Inc., US (LI-6262, LI-7000) <http://www.licor.com/>

2.4

クローズドパス型 CO₂ 分析計

- ・ LI-COR, Inc., US (LI-820, LI-840) <http://www.licor.com/>

エアースAMPLING装置

- ・ ダイレック(株) <http://www.dylec.co.jp/index.htm>
- ・ メイワフォーシス(株) <http://www.meiwafosis.com/index-1.htm>

システム構築

- ・ クリマテック(株) <http://www.weather.co.jp/>

制御モジュール

- ・ Campbell Scientific, Inc., US (16ch リレーコントロールモジュール C-SDM-CD16AC)
<http://www.campbellsci.com/>

2.5

プログラマブルデータロガー

- ・ Campbell Scientific Inc.,US <http://www.campbellsci.com/>

三方電磁弁

- ・ フロン工業(株) (FSS-0306YN) <http://www.flon-ind.com/>

ガスクロマトグラフ

- ・ (株)島津製作所 <http://www.shimadzu.co.jp/>
- ・ アジレント・テクノロジー(株) <http://www.home.agilent.com/>

ソフトイオン化質量分析計

- ・ Ionicon Analytik Gesellschaft m.b.H., Germany <http://www.ptrms.com/>
- ・ V&F Analyse- und Messtechnik GmbH, Germany <http://www.vandf.com/>

波長可変ダイオードレーザ分光計

- ・ Los Gatos Research, Inc., US (DLT-100) <http://www.lgrinc.com/>
- ・ Picarro Inc., US (G2311-f) <http://www.picarro.com/>
- ・ Campbell Scientific, Inc., US <http://www.campbellsci.com/>

化学発光法分析計

- ・ Hills-Scientific, US <http://hills-scientific.com/>
- ・ (株)アナテック・ヤナコ <http://anatec.yanaco.co.jp/>

2.6

データロガー

- ・ Campbell Scientific, Inc., US <http://www.campbellsci.com/>
- ・ 太陽計器(株) (Campbell Scientific, Inc. 日本総代理店)
<http://www.taiyokeiki.co.jp/>
- ・ (株)日置電機 (MEMORY HiLOGGER LR8430-20)
<http://www.hioki.co.jp/>
- ・ (株)キーエンス (NR-1000) <http://www.keyence.co.jp/>
- ・ ティアック(株) (es8) <http://www.teac.co.jp/>
- ・ オムロン(株) (ZR-RX20/40A) <http://www.omron.co.jp/>

RS-232-to-RS-422/485 コンバータ

- ・ Moxa Inc., US (TCC-80) <http://www.moxa.com/>

RS-232-to-USB 変換ケーブル

- ・ (株)アイ・オー・データ機器 (USB-RSAQ5 シリーズ)
<http://www.iodata.jp/>
- ・ ラトックシステム(株) (REX-USB60F) <http://www.ratocsystems.com/>

2.7

オシロスコープ

- ・ (株)エヌエフ回路設計ブロック <http://www.nfcorp.co.jp/>
- ・ 岩通計測(株) <http://www.iti.iwatsu.co.jp/>

テスター

- ・ (株)エヌエフ回路設計ブロック <http://www.nfcorp.co.jp/>
- ・ (株)エーディーシー <http://www.adcmt.com/>

ローパスフィルタ

- ・ (株)エヌエフ回路設計ブロック <http://www.nfcorp.co.jp/>

ノイズカットトランス

- ・ (株)電研精機研究所 <http://www.denkenseiki.co.jp/>

無停電電源装置

- ・ (株)電研精機研究所 <http://www.denkenseiki.co.jp/>
- ・ オムロン(株) <http://www.omron.co.jp/>
- ・ サンワサプライ(株) <http://www.sanwa.co.jp/>
- ・ 山洋電気(株) <http://www.sanyodenki.co.jp/>

部品・消耗品（例）

- 1) ペーパータオル（「キムワイブ」）：日本製紙クレシア(株) <http://www.crecia.co.jp/> [2.2]
- 2) チューブコネクタ：(株)日本ピスコ <http://www.pisco.co.jp/> [2.3]
- 3) チューブコネクタ：Swagelok Company, US <http://www.swagelok.co.jp/> [2.3]
- 4) チューブ，PTFE 製品：中興化成工業(株) <http://www.chukoh.co.jp/japan/> [2.3]
- 5) チューブ，ポリエチレン製品：(株)ハギテック <http://www.hagitec.jp/> [2.3]
- 6) フィルタ：東洋濾紙(株) <http://www.advantec.co.jp/> [2.3]
- 7) フィルタ：Millipore Corporation, US <http://www.millipore.com/> [2.3]
- 8) シールテープ，PTFE 製品：日東電工(株) <http://www.nitto.co.jp/> [2.3]
- 9) マスフローコントローラ：(株)山武 <http://jp.yamatake.com/> [2.3]
- 10) マスフローコントローラ，流量計：コフロック(株) <http://www.kofloc.co.jp/> [2.3]
- 11) 電磁弁：CKD(株) <http://www.ckd.co.jp/> [2.3]
- 12) 電磁弁：高砂電気工業(株). <http://www.takasago-elec.co.jp/> [2.3]
- 13) 電磁弁：(株)コガネイ <http://www.koganei.co.jp/> [2.3]
- 14) エアドライヤ：Perma Pure LLC, US <http://www.permapure.com/> [2.3]
- 15) ポンプ：(株)榎本マイクロポンプ製作所 <http://www.emp.co.jp/> [2.3]
- 16) ポンプ：KNF Neuberger GmbH, Germany <http://www.knf.com/> [2.3]
- 17) ポンプ：Gast Manufacturing, Inc., US <http://www.gastmfg.com/> [2.3]
- 18) プログラムリレー（ZEN）：オムロン(株) <http://www.zen.omron.co.jp/> [2.3]
- 19) プログラムリレー（SDM-CD16AC）：Campbell Scientific, Inc. US <http://www.campbellsci.com/> [2.3]
- 20) ゲージ付きチューブ継手：Swagelok Company, US <http://www.swagelok.com/> [2.4]
- 21) 3 方電磁弁：フロン工業(株) <http://www.flon-ind.com/> [2.5]

3

微気象観測

3.1 放射

Radiation

絶対温度 0K 以上の温度を持つすべての物質は、電磁波の形でエネルギーを放出している。そのエネルギー量は物質の絶対温度の 4 乗に比例する (Stefan-Boltzmann の法則)。太陽からの放射は、約 5,800K の物質の黒体放射の理論値に近く、波長 $0.5\mu\text{m}$ 付近にスペクトルのピークを持ち、 $0.15 \sim 3\mu\text{m}$ の範囲にそのエネルギーの 99% が含まれる。一方、地球大気系の温度は 300K 前後であり、波長 $10\mu\text{m}$ 付近にスペクトルのピークを持ち、大部分のエネルギーは $3 \sim 100\mu\text{m}$ の範囲に含まれる。

地上においては、上述の太陽起源の放射と、地球大気系起源の両方が観測される。ここでは、これらの放射量の測定方法について述べる。

3.1.1 日射量

概要

日射は太陽放射と同義である。太陽起源の放射は大気に進出した後、空気分子や水蒸気、塵などにより部分的に吸収・散乱される。地表面に到達する太陽放射はその波長特性から短波放射とも呼ばれ、 $0.3 \sim 3\mu\text{m}$ (または $0.29 \sim 3\mu\text{m}$) の波長範囲に分布する。

日射は直射光成分の直達日射と散乱光成分の散乱日射に分けられる。直達日射と散乱日射をあわせたものを全天日射と呼ぶ。

測器の種類

世界放射センターにより維持管理されている絶対日射計を基準にして、校正体系が確立している。また、世界標準化機構 (ISO) により、日射計の性能基準が定められている。

一般的なサーモパイル (熱電堆) 型と、簡易タイプのフォトダイオードを用いた量子型のセンサがある。サーモパイル型は日射エネルギーに比例した温度の取り出し方によって、ヒートシンク型、白黒型などに分けられる (大谷, 1999a)。現在市販されているほとんどはヒートシンク型である。

全天日射計

全天日射計は様々なタイプのセンサが市販されている (Table 3.1-1, Photo 3.1-1)。サーモパイル型では、受熱板の被覆に半球型のガラスドームが用いられる。防霜ファンを取り付けることにより、霜の影響を除去するだけでなく、ゼロオフセットの問題も軽減する。また、湿雪以外の冠雪の影響も軽減できる。

市販されている日射計は、最も精度の高い ISO 二次準器をはじめとして、ISO1 級、2 級、さらに簡易型のセンサがある。

Table 3.1-1 代表的な日射計の特性

機種	メーカー	感度 [mV(kWm ⁻²) ⁻¹]	波長範囲 [nm]	ISO クラス
MS-802	英弘精機	7	305 ~ 2800	二次準器
PSP	EPPLEY	約 9	285 ~ 2800	二次準器
CMP 21	Kipp & Zonen	7 ~ 14	310 ~ 2800	二次準器
MS-402	英弘精機	7	305 ~ 2800	1 級
SR-11	Hukseflux	15	305 ~ 2800	1 級
CMP 6	Kipp & Zonen	5 ~ 16	310 ~ 2800	1 級
MS-601	英弘精機	7	300 ~ 2800	2 級
LP02	Hukseflux	15	305 ~ 2800	2 級
CMP 3	Kipp & Zonen	5 ~ 15	310 ~ 2800	2 級
ML020VM	英弘精機	約 7	400 ~ 1100	-
SP Lite2	Kipp & Zonen	60 ~ 100	400 ~ 1100	-
PCM-01	ブリード	7 または 10	305 ~ 2800	-



Photo 3.1-1 代表的な日射計。左：MS-402（写真：英弘精機㈱提供）。右：CMP 6（写真 Kipp & Zonen B. V.提供）。

直達日射計

直達日射計には MS-56(英弘精機㈱)や CHP 1(オランダ Kipp & Zonen B.V.), NIP(米国 THE EPPLLEY LABORATORY, INC.) などがある。太陽周辺光の影響を除去するため、開口部を小さくし内部反射を抑制した円筒が用いられる。連続測定には、自動的に太陽を追尾する装置（英弘精機製 STR-21, Kipp & Zonen 製 SOLYS 2, EPPLLEY 製 SMT-3 など）を用いる（Photo 3.1-2）。



Photo 3.1-2 直達日射計（MS-56）。太陽追尾装置（STR-21）にとりつけたもの。（写真：英弘精機㈱提供）

散乱日射計

直達光を取り除くため、遮蔽バンドあるいは遮蔽板（球）（㈱ブリード製 PSB-100，Kipp & Zonen 製 CM 121B，EPPLEY 製 SBS など）を全天日射計に取り付けて測定する。連続測定には、太陽の位置によって自動的に遮蔽板の傾きが変わる装置（Kipp & Zonen 製 SOLYS 2，英弘精機製 STR-22）を用いる（Photo 3.1-3）。



Photo 3.1-3 散乱日射測定の様子。左：SOLYS 2（写真：Kipp & Zonen B. V.提供），右：STR-22（写真：英弘精機㈱提供）

Tips!

スイス・ダボスにある世界放射基準センターにおいて絶対放射計準器が維持されている。世界気象機関（WMO）の各地区協会毎に WMO 地区放射センターが指定されている。地区放射センターは地区準器を維持し、地区内の放射測器の相互比較をするとともに、5 年に 1 回開催される国際比較観測において、世界準器と比較校正を行っている。アジアの地区放射センターは日本およびインドにある。

Tips 3.1-1

測定方法

全天日射量を測定する場合は、日射がいずれの方位からも遮蔽されない場所を選び、水平に設置する。地表面の放射エネルギー収支やアルベドを測定する場合には、特性の揃った 2 台の全天日射計を上向き・下向きに設置する。上向き・下向き日射計が一体になったアルベドメータも市販されている。ガラスドームの汚れは誤差の原因となるため、定期的にキムワイプ（日本製紙クレシア㈱）、あるいはアルコールと脱脂綿などを使用して清掃する。

一般に日射計の出力は $7\text{mV}(\text{kWm}^{-2})^{-1}$ 程度と小さく、また、外来ノイズを避けるため、長い距離を伝送する場合には、シールド付きの太い信号線を使用する。長期間の観測の際は、誘導雷などによる破損を防ぐため、端子台に避雷器を設置することが望ましい。

Tips!

分解能 0.01mV のデジタルマルチメータ（テスタ）が一台あると、出力の小さい放射計の出力チェックに便利である。

Tips 3.1-2

校正

日射量は、地表面のエネルギー収支を対象とする際、非常に重要な要素であることから、測定精度の維持には細心の注意を払う必要がある。南中時前後時間帯の測定値を信頼性の高い日射計と比較し、校正を行う。(Appendix 3.1-1 を参照。)

以前は受熱板の塗料の劣化によって経年変化するため、2～3 年毎に検定を受けることが推奨されていたが、現在発売されている測器の多くは、経年変化の程度は軽減されている。

3.1.2 長波放射量

概要

大気自身や地表面が射出する、日射と比べて波長の長い放射(3～100 μm)を長波放射または赤外放射と呼ぶ。

測器

日射計のヒートシンク型と同様に受光面とヒートシンクとの温度差をサーモパイル(熱電堆)で測定する。ただし、センサ風防用のドームはガラスではなく、日射を反射し長波放射のみを透過するシリコンドーム(ウィンドウ)である。また、受感部は Stefan-Boltzmann 法則によって放射エネルギーを射出しているため、ドームを通過する長波放射 R_d [Wm^{-2}] は以下の式で求められる。

$$R_d = \frac{\Delta E}{k} + \sigma T_b^4 \quad (3.1-1)$$

ここで、 ΔE はサーモパイルの出力電圧 [mV]、 k はサーモパイルの感度 [$\text{mV}(\text{Wm}^{-2})^{-1}$]、 σ は Stefan-Boltzmann 定数 ($5.67051 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)、 T_b はセンサボディの温度 [K] である。また、シリコンドームの使用によって日射吸収によるドーム加熱の影響は軽減されているが、完全ではないことが多く、正確な測定には加熱されたドームによる放射を補正する必要がある。一般的に用いられている補正式は以下の Albrecht et al. (1974) の式である。

$$R_d = \frac{\Delta E}{k} + \sigma T_b^4 + k_d \sigma (T_b^4 - T_d^4) \quad (3.1-2)$$

ここで、 k_d はドーム係数、 T_d はドームの温度 [K] である。

廣瀬・柴田(2000)が提案した次式(3.1-3)を用いた値は、2006 年に制定された世界基準による観測値と良い一致がみられた(大河原・高野, 2008)。ただし、一般的には高層気象台が所有する赤外放射計検定装置による検定を行うことは難しいため、上述の2式のいずれかを用いる場合が多い。

$$R_d = \frac{\Delta E}{k} (1 + k_1 \sigma T_b^3) + k_2 \sigma T_b^4 + k_3 \sigma (T_b^4 - T_d^4) \quad (3.1-3)$$

ここで、 k_1 、 k_2 、 k_3 ：赤外放射計の温度に関する係数である。

市販されている主な測器を Table 3.1-2、Photo 3.1-4 にあげる。

Table 3.1-2 代表的な赤外放射計の特性。

機種	メーカー	感度	波長範囲	ドーム加熱によるオフセット	温度依存性	ドーム温度の測定
		[mV(kWm ⁻²) ⁻¹]	[nm]	[Wm ⁻²]	[%°C ⁻¹]	
MS-202	英弘精機	約 4	3,000 ~ 50,000	-	-	有
PIR	EPPLEY	約 4	3,500 ~ 50,000	-	1 (-20 ~ 40°C)	有
CGR 4	Kipp & Zonen	5 ~ 10	4,500 ~ 42,000	4 以下	1 (-20 ~ 50°C)	無
CGR 3	Kipp & Zonen	5 または 7	4,500 ~ 42,000	15 以下	5 (-10 ~ 40°C)	無

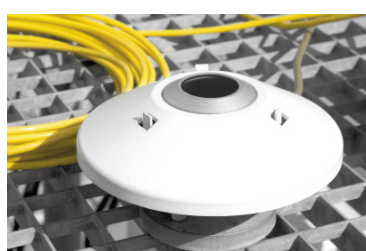


Photo 3.1-4 赤外放射計。左：CGR 4。(写真：Kipp & Zonen B. V.提供)，右：EPPLEY 製 PIR。

測定方法

下向きの放射を測定する場合、いずれの方位からも遮蔽されない場所を選び、上向き水平に設置する。上向きの放射を測定する場合は、測器を下向きに水平に設置する。上向き放射の測定の場合は、測定高度にも注意を要する。高すぎると測定対象外の影響受け、低すぎる場合は放射計自信の影響を強く受ける場合がある。

Tips!

PIR 用温度変換器 IRI-01 (プリード) は、アンプによってサーモパイルの電圧を 1000 倍に増幅して出力している。アンプの使用は、しばしばノイズの原因となる。また、増幅時の誤差が含まれる場合がある。直流標準電圧発生器 (3K02, NEC Avio 赤外線テクノロジー(株)) などを用いて、アンプを経由した場合の出力をチェックしておく必要がある。

Tips 3.1-3

校正

センサの感度は経年変化するため、定期的な検定が必要である。また、上向きと下向きの長波放射量の差は、日射量の場合ほど差が生じないため、器差による影響がないように、十分器差の有無を調べておく必要がある。

3.1.3 正味放射量

概要

日射と長波放射を区別せず，すべての波長域の放射を全波放射と呼ぶ。下向き全波放射と上向き全波放射の差し引きを正味放射と呼ぶ。

測器の種類

正味放射量を直接出力するタイプ（放射収支計）と，下向き・上向き短波放射計および下向き・上向き赤外放射計が一体となったタイプ（4成分放射計）がある。

放射収支計

上下に受光面を持ち，その温度差をサーモパイルで測定するものである（Table 3.1-3，Photo 3.1-5）。風防のために全波長を透過するポリエチレンドームが取り付けられている。従来型（例えば英弘精機製 MF-11）は，ポリエチレンドームが柔らかいため，内部を乾燥空気で加圧している。Q*7（米国 Radiation and Energy Balance Systems, Inc., REBS）は硬質のポリエチレンドームを採用することによって，加圧すること無しに測定することが可能である。また，NR Lite2（Kipp & Zonen）は，ポリエチレンドームの代わりに，受光面をテフロンコーティングすることによって，メンテナンスの労力を軽減している。

Table 3.1-3 代表的な放射収支計

機種	メーカー	波長範囲 [μm]
MF-11	英弘精機	0.3 ~ 30
NR Lite2	Kipp & Zonen	0.2 ~ 100
Q*7	REBS	0.25 ~ 60

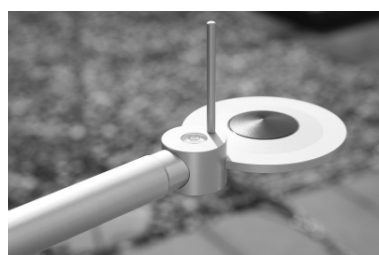


Photo 3.1-5 放射収支計。左：NR Lite2。（写真：Kipp & Zonen B. V.提供），右：MF-11。（写真：英弘精機(株)提供）。

Tips!

一般に放射計はカラスなどの鳥によって破損する場合があります。特に、ポリエチレンドームを使用する場合は、センサの周辺に針金を数本立てたり、鳥の留まりそうなところに釣り糸を張り巡らせるなどして、防御策をとる必要があります。

Tips 3.1-4

4 成分放射計

比較的小型の日射計および赤外放射計がそれぞれ上向き・下向きに取り付けられたセンサである (Table 3.1-4, Photo 3.1-6)。容易に放射の4成分およびそれぞれを足しあわせることによって正味放射量を求めることが出来るため、近年は、上記の放射収支計に代わって用いられることが多い。

Table 3.1-4 代表的な4成分放射計

機種	メーカ	波長範囲[μm]		赤外放射計の温度センサ
		日射計	赤外放射計	
MR-60	英弘精機	0.305 ~ 2.8	5 ~ 50	受感部
CNR 1 (製造終了)	Kipp & Zonen	0.305 ~ 2.8	5 ~ 42	受感部
CNR 2	Kipp & Zonen	0.310 ~ 2.8	4.5 ~ 42	無し
CNR 4	Kipp & Zonen	0.300 ~ 2.8	4.5 ~ 42	受感部
NR01	Hukseflux	0.305 ~ 2.8	4.5 ~ 50	受感部



Photo 3.1-6 4成分放射計。左：CNR 4。(写真：Kipp & Zonen B. V.提供)，右：MR-60。(写真：英弘精機(株)提供)。

測定方法

他の放射成分測定と同様、いずれの方位からも遮蔽されない場所を選び、水平に設置する。ポリエチレンドームあるいはセンサの風防部の汚れは誤差の原因となるため、定期的にアルコールとキムワイプなどを使用して清掃する。

ポリエチレンドームは、劣化が早いので、頻繁に交換する必要がある。

データ処理

放射収支計の場合、出力電圧とセンサの感度定数で、正味放射量が求まる。

4 成分の放射収支計，あるいは個別に下向き・上向き短波放射および下向き・上向き長波放射を測定した場合，以下の式によって正味放射量を計算する。

$$R_{\text{net}} = S\downarrow - S\uparrow + L\downarrow - L\uparrow \quad (3.1-4)$$

ここで， R_{net} は正味放射量 [Wm^{-2}]， $S\downarrow$ は下向き短波放射量（全天日射量） [Wm^{-2}]， $S\uparrow$ は上向き短波放射量（反射日射量） [Wm^{-2}]， $L\downarrow$ は下向き長波放射量 [Wm^{-2}]， $L\uparrow$ は上向き長波放射量 [Wm^{-2}] である。

3.1.4 光合成有効放射量（光合成有効光量子束密度）

概要

光合成有効放射（PAR）はクロロフィルが吸収できる 400～700nm の波長帯の放射を指す。光合成有効光量子束密度（PPFD）とも呼ばれる。一般に単位は $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を用いるが， Wm^{-2} への変換が可能である（Appendix 3.1-2）。

測器の種類

測定には，波長別の放射量を測定できる分光放射計や，400～700nm の光のみを測定する光量子計を用いる。

分光放射計

全天候型の分光放射計は，回折格子型の MS-700（英弘精機製，測定波長範囲は 350～1050nm）などがある。MS-700 を使用する際は，測定制御・データ保存のためにパーソナルコンピュータ（PC），もしくはデジタル I/O ポートを持つロガー（米国 Campbell Scientific, Inc. 製 CR1000 など）が必要である。

分光放射計による測定は，リモートセンシング分野でよく用いられる葉の波長特性を示す NDVI などの指標も求めることができるが，このマニュアルでは取り上げない。

光量子計

光量子計は，Table 3.1-5，Photo 3.1-7 に示すように多くの種類がある。日射計のような世界準器および世界基準（World Radiometric Reference，WRR）がないため，各メーカーのセンサ間では，値に差が生じる。同じタイプのセンサ間でも，器差が大きく経年変化が大きいため，器差，経年変化の影響を補正するため，基準器を設けて定期的に比較する必要がある。

Table 3.1-5 光量子計。

機種	メーカー
LI-190SA	LI-COR
ML-020P	英弘精機
IKS-27	コイト電工
PQS 1	Kipp & Zonen
PAR-01	プリード
SKP215	Skye



Photo 3.1-7 光量子センサ。左：LI-190 (LI-COR), 右：ML020P (英弘精機)。

測定方法

植物キャノピーに入射する光合成有効放射量を測定するためには、キャノピー高より高い位置にセンサを水平に設置する。

植物キャノピーが吸収する放射量 (Absorbed PAR : $APAR$ [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$]) は、以下のようにして求められる。リモートセンシングの分野では、植物キャノピーより上の位置で測定された下向きの PAR ($PAR_{\downarrow\text{above}}$ [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$]) と反射 PAR ($PAR_{\uparrow\text{above}}$ [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$]) の収支を $APAR$ として計算する。

$$APAR = \left| PAR_{\downarrow\text{above}} \right| - \left| PAR_{\uparrow\text{above}} \right| \quad (3.1-4)$$

農業・森林気象や生態学の分野では、より厳密にキャノピー下端での $PAR_{\downarrow\text{below}}$ [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$] と $PAR_{\uparrow\text{below}}$ [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$] も考慮して計算することが多い。

$$APAR = \left(\left| PAR_{\downarrow\text{above}} \right| - \left| PAR_{\uparrow\text{above}} \right| \right) - \left(\left| PAR_{\downarrow\text{below}} \right| - \left| PAR_{\uparrow\text{below}} \right| \right) \quad (3.1-5)$$

一般に、閉鎖した着葉期の森林内では $PAR_{\uparrow\text{below}}$ は、非常に小さい値をとる場合が多く、この値を考慮しないこともある。

植物キャノピーの下にセンサを設置する場合、場所による値のばらつきが大きいので、複数点の測定値の平均を求めることが望ましい。

ここでは、最も多く使用されている拡散板が表面に露出しているタイプの LI-190SA (米国 LI-COR,

Inc.)と、コレクターとして拡散板を覆うガラスドームが使われている ML-020P (英弘精機) の使用方法について述べる。

LI-190SA

- 1) センサは電流出力のため、電圧測定ロガーの場合は温度係数の小さい精密抵抗(抵抗値 $1\text{k}\Omega$ 程度、精度 0.1% 、金属皮膜または巻き線抵抗)を挿入し、ロガーの直前で電圧に変換する (Fig. 3.1-1)。
- 2) 延長ケーブルが必要な場合は、太めの同軸ケーブル(たとえば規格: RG58A/U)を使用する。
- 3) 防水性のない BNC コネクタが使用されているため、自己融着テープをまき、その上からビニールテープを巻いて防水処理をする (Photo 3.1-8)。できれば、直接水がかからないように簡易な箱に入れるのが望ましい。
- 4) 拡散板は定期的に清掃する。このとき、アルコールは使用してはならない。

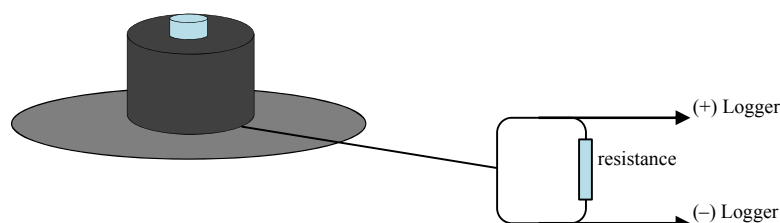


Fig. 3.1-1 LI-190 (電流出力) と抵抗による電圧測定の方法



Photo 3.1-8 LI-190 のケーブル延長の方法。左: BNC コネクタ部分の防水のため、自己融着テープを巻く。右: メスコネクタ (延長ケーブル側) とオスコネクタ (センサ側)。

💡 Tips!

LI-190 に延長ケーブルを取り付ける場合、BNC コネクタのメス側 (BNC-R) を取り付ける。(Photo 3.1-8)

Tips 3.1-5

 Tips!

このセンサは内蔵した干渉フィルタを用いて透過する波長帯を選択しているが、一般的に干渉フィルタは水分への暴露により劣化することが知られている。このため、高温多湿な条件下で LI-190 を使用する際は、センサ底部（特にケーブル取り付け部分）にシーラントを塗り、防水性を高めると良い。

Tips 3.1-6

 Tips!

気温が低く筐体の温度が下がっている場合、純水で湿らせたキムワイプ（あるいは脱脂綿）で拡散版の清掃を行うと、氷の膜を作ってしまうことがあるので、注意を要する。

Tips 3.1-7

ML-020P

- 1) センサ自体は電流出力であるが、放射計内部に挿入された抵抗によって電圧出力に変換されている。そのため、長いケーブルを使用する場合は、出力の電圧降下に注意する必要がある。
- 2) 定期的にガラスドームをキムワイプ、あるいはアルコールと脱脂綿などを使用して清掃する。

 Tips!

雪の重みによってセンサ設置台が傾くことがある。積雪の多い地域では、設置台が積雪・融雪時にも水準が保たれるよう、通常よりも頑丈なものにし、雪解けの後は水準が保たれているか確認する必要がある。

Tips 3.1-8

校正

器差が大きいため、測定開始前に器差を調べておく必要がある。また、経年変化も大きいので、定期的にメーカー検定を受けるか、基準器を設けてチェックする必要がある。

Appendix 3.1-1: 太陽位置を求めるために必要な値

任意の日時・地点における太陽位置を求めるために必要な値の計算方法を示す。

均時差 Ω [h]: 平均太陽時（天の赤道を等速で移動すると仮定したときの時角）と真太陽時（実際の太陽の時角）との差。様々な推定式がある（松本，2005）が，ここでは以下の簡易式を例に示す。

$$\Omega = \frac{1}{60} [0.528276 \cos(\omega J) - 3.354103 \cos(2\omega J) - 0.086077 \cos(3\omega J) - 0.137550 \cos(4\omega J) \\ - 7.341887 \sin(\omega J) - 9.338832 \sin(2\omega J) - 0.304815 \sin(3\omega J) - 0.170209 \sin(4\omega J)]$$

(A3.1-1)

ここで， $\omega = 2\pi/365$ or $2\pi/366$ とし， J は 1 月 1 日 0 時 0 分からの積算日数（実数，たとえば 1 月 1 日 12:00 は $J=0.5$ ）である。

* 1998 年～2005 年までの 8 年間の理科年表データから算出

時角 ζ_a [°]: 太陽の南中後，地球が地軸の周りを回転した角度。南中時の時角は 0°，南中前は負，南中後は正の値をとり，1 時間に 15° の割合で増加する。

$$\zeta_a = 15(t_s - 12 + e) + \gamma - \gamma_0$$

(A3.1-2)

ここで， t_s は標準時における時刻 [h]， γ は経度 [°]， γ_0 は子午線 [°] である。

太陽赤緯（日赤緯） δ [°]: 天球上の太陽の位置を表す。春秋分に $\delta=0^\circ$ ，夏至に $\delta=-23.44^\circ$ ，冬至に $\delta=23.44^\circ$ 。ここでは以下の簡易式を例に示す。

$$\delta = 0.38145 - 22.95333 \cos(\omega J) - 0.38122 \cos(2\omega J) - 0.153343 \cos(3\omega J) \\ - 3.77859 \sin(\omega J) - 0.034839 \sin(2\omega J) - 0.078079 \sin(3\omega J)$$

(A3.1-3)

* 1992 年～2005 年の理科年表データから算出

南中時刻 t_a [h]: 観測地点で太陽が真南になる時刻。

$$t_a = 12 - \frac{(\gamma - \gamma_0)}{15} - \Omega$$

(A3.1-4)

天頂角 β [°]: 天頂と太陽のなす角度。

$$\cos \beta = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \zeta_a$$

(A3.1-5)

ここで， φ は緯度 [°] である。

太陽高度 ζ_s [°]: 観測地点から見た太陽と地平線の角度。

$$\sin \zeta_s = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \zeta_a$$

(A3.1-6)

Appendix 3.1-2: 単位の変換

単波長のモル光子束密度 F_{Q_λ} [$\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$] と放射束密度 F_{E_λ} [Wm^{-2}] との関係は (A3.1-7) 式で表される。

$$F_{Q_\lambda} = \frac{\lambda \cdot F_{E_\lambda}}{A \cdot h \cdot c_1} \quad (\text{A3.1-7})$$

ここで, λ は波長 [m], A はアボガドロ数 ($6.023 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$), h はプランク定数 ($6.626 \times 10^{-34} \text{Js}$), c_1 は光速 ($2.9979 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$) である。したがって, PAR 波長域で積分した光子束密度 F_{Q_λ} [$\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$]

と放射束密度 F_{E_λ} [Wm^{-2}] との関係は (A3.1-8) 式で表される。

$$F_Q = 8.36 \times 10^{-9} \int_{400}^{700} \lambda F_{E_\lambda} d\lambda \quad (\text{A3.1-8})$$

光子センサーで測定された PAR は, 積分された値のみで各波長の値はわからないため, 放射束密度への変換は, McCree (1972) などの実験値から便宜的に定数 α (自然光の場合 4.24 ~ 4.57) を与えて (A3.1-9) 式で計算されることが多い。

$$F_Q = \alpha \times F_E \quad (\text{A3.1-9})$$

しかし, 大気の状態等によって波長毎の放射エネルギーは変化するため, 定数は一定ではないことを念頭に置く必要がある。

3.2 風向・風速

Wind direction/Wind speed (Wind velocity)

概要

空気が移動する方向を風向，一定時間に移動する距離を風速と呼ぶ。スカラー量ではなく風向とセットにしたベクトル量として測定される必要がある。地上付近の風は水平成分に比べ鉛直成分が小さいため，一般的な測定の場合には水平な大気の流れとして扱う。

測器の種類

1) 風向計

風向計は風見鶏の原理を用いた矢羽根（ベーン）式が一般的である。また，近年は 2 軸あるいは 3 軸を配した超音波式風速計によって風向を測定する場合もある。

2) 風速計

風速計には，測定原理により様々なタイプのものがあるが，以下に代表的な風速計を示す。

風杯式風速計

風杯式風速計は 1850 年にロビンソンが考案し，垂直軸に半球殻又は円錐殻の風杯と呼ばれる羽によって測定する風速計であり，ロビンソン風速計とよばれていた。初めは 4 個の風杯をもち，風による力を大きくするために回転半径を大きくしてあった。しかし，風速計としての特性が悪く，現在では 3 杯となり，特性をよくするために腕の長さを短くし，小型軽量型が使用されるようになった。風杯式風速計は風がどの方向から吹いてきても回転できる利点があり，平均風速測定に広く用いられている。風杯の回転軸が動き始める始動風速は小さいほどよいが，風杯の慣性によるまわりすぎには注意する必要がある。

風車型風速計

風杯式風速計と異なり，水平軸に取り付けたプロペラ型の羽によって測定する風速計であり，水平軸と同じ向きの風速を計ることができる。風上を常に向くように風向計と一体型となっているものがほとんどである。

超音波式風速計

超音波（高周波音波）を利用した，超音波風速計は風速変動をはかるのに用いる。これは互いに向かい合った 2 個の発信部からパルス音波を発射するが，音波は風の方向に流されるときはその逆の時よりも早くなるので二つの受信部に到着する時間に差ができる。この到着時間差は風速に比例するので，電氣的に時間差をはかって風速を測定することができる。このタイプの風速計は風杯式風速計や

風車型風速計のように受風部の慣性の影響を受けることがないため、短い時間スケールでの風速の変動を観察することに適している（詳細は 2.1「超音波風速温度計」参照）。また、風速の分解能が高い（ 0.01ms^{-1} 程度）のものが比較的安価に入手できるようになってきている。

熱線式風速計

電熱線を環境中に露出させて通電し、その発熱と風による冷却とが平衡したときの温度から風速を求めるものである。低風速での感度に優れているが、雨や雪などが熱線に当たる条件下では使用できず、また、長時間の連続測定に耐えられないことから、主に屋内の風洞実験用などに用いられている。

測定方法

概ね高度 50m 程度以下の接地境界層内では、水平方向の風速は対数分布し、鉛直方向の各種輸送量が高さ方向に近似的に一定である。接地境界層の下のカノピー層では物質やエネルギーが直接に交換されており、風速分布は複雑である。したがって、その地点での代表的な風速はカノピー層より上で測定される必要がある。

測候所などで定常的に観測する場合は、周辺に建物や木などの障害物のない平らな開けた場所を選び測定する。測定高さは、世界気象機関では測定高は地上高 10m と定めている。日本の AMeDAS では、地上高 6m で測定されている。

研究目的でタワー上において測定するときには、タワーそのものの影響を避けるため、アームなどを用いて、できるだけタワーから離して設置することが望ましい。また、主風方向に突き出すことによってタワーの影響を最小限にすることができる（Photo 3.2-1）。タワーに計測ボックスなどを設置する場合は、その影響を軽減するために、風速計の設置高度から上下に高度差を設けることが好ましい。

樹冠上に4ないし5高度程度に風速計を設置し、風速の鉛直プロファイルを観測することによって、摩擦速度等を計算することができる。その場合、樹冠上の風速はおおむね対数分布するので、鉛直下方にいくにしたがって密に風速計を設置し、高さ方向に対数分布させる方がよい。

可動部のある風杯型や風車型の風速計は、長期に使用する場合、掃除・注油を行い、回転をなめらかに保つ工夫が必要である。また、定期的な機構部品の交換や校正を必要とする。積雪寒冷地では、着雪や着氷に注意が必要である。

風向計設置の際は、地図上の北と磁北はずれているので注意する。

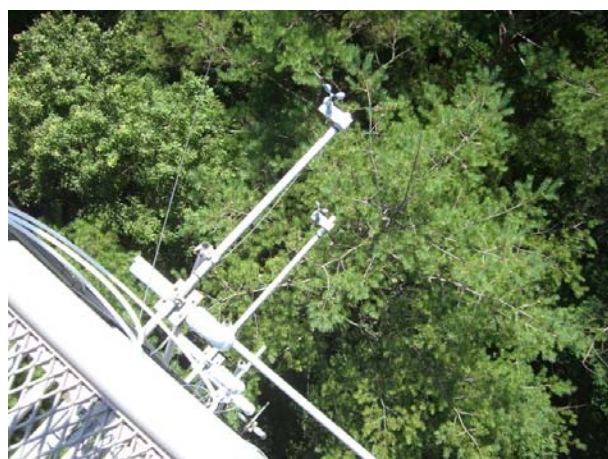


Photo 3.2-1 風速計の設置例。（富士吉田森林気象試験地）

 Tips!

地図上の北（真北）と磁北の差を磁気偏角 $D [^\circ]$ という。偏角は場所によって異なり，時間によっても変化する。2000 年 1 月 1 日 0 時の値（2000.0 年値 $D_{2000.0}$ ）は以下の式で近似することができる（国立天文台，2005）。

$$D_{2000.0} = 7^\circ 37.142' + 21.622' \Delta\phi - 7.672' \Delta\gamma + 0.442' \Delta\phi^2 - 0.320 \Delta\phi \Delta\gamma + 0.675 \Delta\gamma^2$$

$$\Delta\phi = \phi - 37^\circ \text{ N}, \quad \Delta\gamma = \gamma - 138^\circ \text{ E}$$

ここで， ϕ は緯度 $[^\circ]$ ， γ は経度 $[^\circ]$ である。

Tips 3.2-1

風速・風向データの記録

センサからの出力は，風速に関してはパルスカウントを出力するものと電圧を出力するものがあり，風向に関しては抵抗値によって出力するポテンショメータのものが多い。超音波式風速計では X 軸，Y 軸それぞれの風速を電圧出力したり，風向をデジタル出力したりできるものが多い。

校正

風速計の検定は，時々行う必要がある。特に，可動部のある三杯風速計などは，観測の前後に行うことが望ましい。可動部分のない超音波式風速計では，ほとんどメンテナンスを必要としない。ただし，アナログ出力できるタイプの超音波風速計から出力される電圧信号は若干のオフセット（風速 0ms^{-1} のとき出力が $20 \sim 30\text{mV}$ 程度）を持っている場合が多く，このオフセット量は個体により異なるので，設置の際にはゼロ点出力のチェックを行い，取得された電圧出力値に対してゼロ点出力の補正を行うべきである。

風洞がある場合，圧力差を利用して風速を測定するピトー管等を用いて測定した風速を真風速として，検定を行うことができる（Photo 3.2-2，Fig. 3.2-1）。校正する風速計のそばに，流れを妨げないようにピトー管を設置し，風洞内の風速を変化させ十数点で比較・校正を行う。ピトー管の動圧（全圧と静圧の圧力差）は差圧計で測定しておき，空気密度（気温によって変動するので気温も測定しておく）とベルヌーイの定理を用いて風速を計算する。



Photo 3.2-2 風洞での超音波式風速計検定の様子。

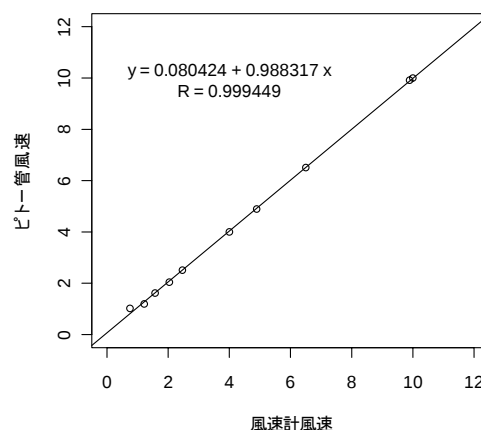


Fig. 3.2-1 ピトー管の動圧から計算された風速(真風速)と検定された風速計の風速との関係。

💡 Tips!

ピトー管による風速 u [ms^{-1}] を求める式 (ベルヌーイの定理)

$$dP = 1/2 \rho u^2$$

ここで, dP はピトー管の風に直面した穴に作用する圧力 (全圧) と風に平行は穴に作用する圧力 (静圧) との差 [Pa], ρ は空気の密度 [kgm^{-3}] である。

Tips 3.2-2

💡 Tips!

(財)日本品質保証機構計量標準総合センターでは環境条件に左右されない地下トンネルを建設し, 微風速計を取り付けた走行台車を走らせて微風速国家標準を作成している。

Tips 3.2-3

データ処理

1) 風向

風向とは風が吹いてくる方向のことであり, 吹いてくる方位を N, NNE などと表すほか, 北を基準に時計回りに $0 \sim 360^\circ$,または全周囲を 16 または 36 に分割して, 16 方位, 36 方位であらわす (Fig. 3.2-2)。

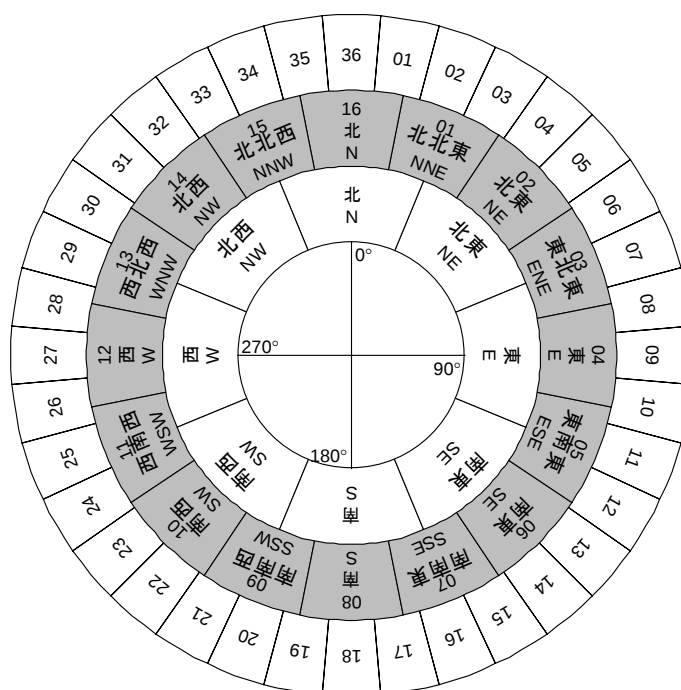


Fig. 3.2-2 風向の表示法。

代表的な風向を表す指標としては、ベクトル平均を用いることが望ましいが、この場合、風向と同時に取得された風速のデータが必要である。ある時間内のスカラ平均や、最多風向を平均風向とする場合もある。無風の場合は、静穏 (calm) として、「 - 」や「00」で表す。

2) 風速

風速には瞬間風速や平均風速がある。特に断りがなければ、風速は、ある一定時間内の測定値の平均を指す。瞬間風速は、何秒以下が瞬間値であるという定義がなく、風速計の応答性と記録方法によって変わってくる。

3.3 気温

Air temperature

概要

気温は解析対象とする空気の温度である。温度計は放射の影響を強く受けるため、正確な測定時には放射を避けるための通風筒（シェルタ）内に温度計を設置する。気温は時間・空間変動が大きいいため、観測の目的に応じて適切な温度計と測定方法を選定する必要がある。温度計の選定にあたっては測温部の時定数，耐久性，必要とされる校正の頻度，設置場所と設置点数，測定範囲等について十分な検討を要する。

気温の単位として国際単位系では K，一般の測定では $^{\circ}\text{C}$ が用いられる。（Appendix 3.3-1 を参照。）

測器の種類

温度計は，Table 3.3-1 のように様々な種類がある。長期的な気象観測には測温部を絶縁体で充填密封した金属保護管（シース）入りの白金測温抵抗体温度計，熱電対温度計等がよく用いられている。ここでは，現在一般的に気温の連続測定に用いられている温度計の特徴について述べる。

Table 3.3-1 温度計の一覧

名称	原理	特徴
電気抵抗温度計	電気抵抗の温度変化	取り扱いが容易だが，測温部が熱電対より大きい
熱電対温度計	熱起電力	測温部が小さくできるが，高精度観測には各接点の慎重な管理が必要とする
放射温度計	熱放射量	広範囲・遠隔測定が可能だが，測定精度の管理が困難
金属製自記温度計	金属の膨張	ゼンマイで自記可能だが，測定精度が低い
液体封入温度計	液体の膨張	安価で高精度だが，読み取りを必要とする
超音波風速温度計	超音波のドップラー効果	顕熱フラックスの観測に適すが，高価で補正が必要

サーミスタ温度計

温度が上昇すると抵抗値が減る金属抵抗体を用いた温度計で，温度変化に対する抵抗値の変化率が大きいことから微細な温度変化測定に適している。白金測温抵抗体に比べてサーミスタ素子は小さくできることから，測温部分を小さくできる利点がある。また，信号出力や素子の電気抵抗を大きくすることでリード線の抵抗などによる誤差，ノイズの影響を小さくすることが可能で，リード線を長くとりデータロガーから離れた場所の測定を行うことができる。一方，自己発熱の影響を受ける場合があり，素子の経年変化が比較的大きく，定期的な検定を必要とする。また，非直線性が強く，素子の規格が統一されていないため，一般には専用のリニアライザを組み込んだ変換器とともに用いられる。米国 Onset Computer Corporation 製の HOB0 シリーズ（Photo 3.3-1），(株)ティアンドデイ製のおんどと



Photo 3.3-1 Onset 製 HOB0 (サーミスタ温度計)



Photo 3.3-2 T&D 製 おんどとり (サーミスタ温度計)

りシリーズ (Photo 3.3-2) 等に代表されるような、電源やデータロガーとセットになった安価でコンパクトな製品が多く市販されており、野外において低コストで温度環境を自動連続測定あるいは多点観測する際に多く用いられる。

💡 Tips!

リニアライザを用いない場合、素子の温度と抵抗値の関係 (サーミスタのメーカーから提供されることも多い) を求め、定電圧の電源を供給し電圧を測定することでも温度変換が可能となる。

Tips 3.3-1

白金測温抵抗体温度計

規格が統一されており、Pt100 とは 0 °C での抵抗値が 100Ω を示す規格を意味する。一般に気象観測によく用いられている 3 線式及び 4 線式 (Photo 3.3-3) はブリッジ回路の出力電圧を測定することでリード線の抵抗値を相殺できるため測定精度が高く、長期間安定的に観測を行う場合に適する。一方、配線抵抗を揃えるためにリード線については各線とも同じ径、材質、長さのリード線を用い、全ての接点について防錆等の処理を行うこと等に注意する。また、配線が長くなることで抵抗が大きくなり過ぎ、データロガーで収録できない場合もある。抵抗素子の熱容量は熱電対に比較すると大きいいため、応答速度も遅い。シース白金測温抵抗体温度計は経年変化が少なく、長期観測に適しているが、測器の特徴として振動や衝撃に弱いいため、取り扱いに注意を要する。



Photo 3.3-3 Vaisala 製 HMP45D (白金温度計)

HMP45D は 2009 年 3 月で製造を終了しており、2011 年現在は後継機の HMP155 が販売されている。

**Tips!**

Pt100 の場合，100 における抵抗値 R_{100} [Ω] と 0 における抵抗値 R_0 [Ω] の比 R_{100}/R_0 は 1.3850 であり，IEC（国際電気標準会議）の規格に準拠している。1989 年以前の JIS 規格は IEC の規格と異なっていたため，1989 年以前の JIS 規格のもの（ $R_{100}/R_0=1.3916$ ）は JPt100 として区別されている。

Tips 3.3-2

熱電対温度計

温度勾配の与えられた金属中では自由電子の密度の差によって熱起電力が生じる。温度あたりの熱起電力の異なる 2 種類の金属線の両端を接続して回路（熱電対）とし，二つの接点に温度差を与えた場合には，一定方向に電流が流れる。これはゼーベック効果と呼ばれ，この現象を利用して温度を測定する（Fig. 3.3-1）。構造が比較的単純で安価な上，統一規格があるため互換性がある。データロガーに接続する側の接点は基準温度接点，あるいは冷接点と呼ばれ，この部分の温度が温度検出端で測定される温度の基準となる。データロガーでは端子の温度をサーミスタ等で測定することで測温接点の温度を求めている。従って端子間に温度差が生じないようにする必要があり，放射等の影響を減らすため端子カバー等が用いられる場合がある。熱電対温度計では構成する 2 種類の金属の形状と大きさが異なっても熱起電力には影響しないが，起電力に対して素線の抵抗が大きいため，ノイズの影響を受けやすい特徴もある。また，延長には熱電対の端子部とロガーの端子部との間の熱起電力を補うため，熱電対の種類に合った専用の補償導線を使用する必要がある。

タワー観測では熱起電力が大きく抵抗の少ない銅-コンスタンタン熱電対（T 型熱電対）がよく用いられている。銅は特に酸化しやすいため，接続部の酸化に注意を要する。タワー観測においては，シース熱電対（Photo 3.3-4）2 本を通風筒に入れ，一方を乾球温度計，もう一方を湿球温度計としたものが，温湿度の鉛直分布観測用によく用いられている。

応答性の高い温度測定が必要な場合には，0.1mm 程度の細い銅線とコンスタンタン線の先端部を磨いて電気溶接あるいは銀ろう付けし，その接合部を小さく磨いて薄膜の絶縁体で被覆したものが用いられる。自作も可能だが，オメガなどから熱電対素線が 13μm 程度の細さまで先端溶着加工済みの極細熱電対が市販されている。熱電対は細くなるほど応答性は高まるが振動にも弱くなるため，より慎重な取り扱いを要する。

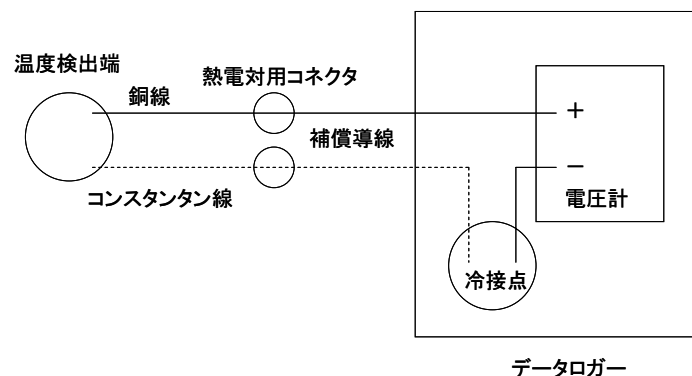


Fig. 3.3-1 熱電対の回路。



Photo 3.3-4 シース熱電対。

💡 Tips!

銀ろう付け（銀ろう溶接）は、銅のるつぼ、あるいは銅板を火力の強いバーナーで加熱し、そこへほう砂、銀ろうの順で溶かし、接点部を磨いた熱電対の断面を入れて接合する。この接合部を必要に応じて線径を整え、絶縁被覆する。電気溶接にはスポット溶接機とオプションの熱電対用溶接ピンセットが適している。簡単に溶接キット（大谷，1999b）を作成することができるが、抵抗部分はかなりの熱を持つので、注意を要する。細い熱電対を作成する場合は、電圧とパルス幅が調節できる溶接機を必要とする。

Tips 3.3-3

測定方法

気温を測定する場合、放射や雨・雪の影響を防ぐために温度計をシェルタに入れて測定する。日本においては通風速度 3ms^{-1} 以上のファン付きのシェルタ（通風筒，Photo 3.3-5）が用いられることが多い。シェルタが水平の場合、日射が筒の内部に入らないように注意して設置する。また、ファンによる発熱の影響を受けない風向で通風するよう注意する。

一般気象観測における気温測定では、周辺に障害物のない開けた観測露場で測定する。測定高は気象庁で地面（雪面）から 1.5m，WMO（世界気象機関）は 1.25～5m を基準にしている。

気温の鉛直分布を連続的に観測する場合には、特に高い測定精度が必要とされる。大気の静的安定度を評価する際、鉛直分布の評価では温位（断熱状態で標準気圧にした場合にその空気塊がもつ温度）がその対象となるが、接地層の高度範囲では温位差は近似的に気温差に等しいことから、しばしば気温が用いられる。測定高は森林の場合、樹高の 2 倍以上の高さで鉛直勾配の小さくなる位置に上端を設定し、少なくとも群落上の 2 高度、群落頂部、樹冠内、地表面付近に測定点を設置する。測定点は多いほど望ましい。

放射温度計は群落の表面温度を広域的に測定するのに適しているが、観測角度、温度計自身による放射や被陰、群落以外からの放射、射出率の影響等に注意して取り扱う必要がある。



Photo 3.3-5 通風筒。

💡 Tips!

通風筒のファンは異物を吸い込んで故障することが多い。ファンが回っているかどうか、常に点検し、故障の際はすぐに交換できるように予備のファンを備えておく。特に夏季は微細な昆虫類が大量に通風筒内に吸い込まれる場合が多いため、ファンや感温部の頻繁な清掃が必要である。ただし、通風筒の空気吸い込み口部分に網（台所シンクまたは三角コーナー用のものなど）をとりつけることで、清掃回数を減らすことができる。

Tips 3.3-4

校正

簡易的には定期的に同一高度に基準器を設置し器差の較正を行う。基準器は定期的にメーカー検定を受け、経年変化についてもチェックする。

比較校正用の温度検定槽が市販されているため、これによる検定がさらに望ましい。防水型の温度計の場合、水循環装置と温度制御ユニットを装備した恒温水槽による検定が一般的である。

💡 Tips!

恒温水槽による検定の場合、低温域で水が凍らないように、不凍液を混ぜて使用する。

Tips 3.3-5

Appendix 3.3-1: 単位の変換

セルシウス度（摂氏） C [] と絶対温度 T [K] の関係

$$C = T - 273.15$$

$$T = C + 273.15$$

セルシウス度（摂氏） C [] とファーレンハイト度（華氏） F [°F] の関係

$$C = \frac{5}{9}(F - 32)$$

$$F = \frac{9}{5}C + 32$$

3.4 湿度

Humidity

概要

湿度は解析対象とする空気に含まれる水蒸気量を示す概念であり、目的に応じて異なった指標を用いる。これらの指標は相互に変換可能であるが、変換の際には気温や気圧の情報が必要となる。また、分野によって用語の使い方が多少異なっていることにも注意する必要がある。(Appendix 3.4-1 を参照。)

測器の種類

観測に用いられる主な湿度計には下記の種類がある。赤外線式湿度計以外では、放射等の影響を避けるため、気温測定と同様、シェルタを利用して測定する。通常、1つのシェルタに気温測定用の温度計と湿度計を設置する。

乾球湿球温度計

2本並べた温度計のうち1本を乾球温度計、1本の感部をガーゼで包んで水タンクから供給した水で濡らして湿球温度計とする。2本の温度計のうち蒸発熱によって湿球温度が低下する。空気中の水蒸気量と乾湿球温度には一定の関係があるため、この関係を用いて湿度の測定を行う。

温湿度の鉛直分布（プロファイル）の自動観測には白金抵抗温度計やシース熱伝対温度計がよく用いられる。水銀温度計を用いた持ち運び可能なアスマン通風乾湿計は測定精度が高いため、簡易な校正用に用いられる。

露点湿度計

塩化リチウムの吸湿電導性を利用した湿度計で、露点温度に対応した抵抗値を示す。特に高湿度条件下でも高精度の連続測定が可能な特徴を持ち、積雪地等での観測に適している。ただし、平衡温度が気温より低くなるような低湿度は測定できない。他に比較的高額ではあるが、冷却式の露点湿度計もある。これは測定対象の空気中に鏡をおいて冷却し、鏡表面に霜が付着した時の温度を測定する。

高分子センサ湿度計

有機高分子を感湿体に用い、大気中の水分量の変化に伴って変化する高分子膜の電気的特性を検出して測定する。代表的なものにフィンランド Vaisala, Oyj. の HMP45 シリーズ (Photo3.4-1) がある。(ただし HMP45 は 2009 年 3 月で製造を終了しており、2011 年現在は後継機の HMP155 が販売されている。) 本器は外部電源を必要とするが小型なことからラジオゾンデ等にも用いられる。また、乾球湿球温度計等と比べ保守が簡便なことから、連続観測にも用いられる。センサの応答時間が約 15 秒とやや長いこと、感部が凝結すると 100% を示し続けて復帰までに時間を要する点等に注意する必要がある。



Photo3.4-1 HMP45D の高分子薄膜フィルム湿度センサと白金抵抗温度センサ (Pt100)。

赤外線式湿度計

水蒸気による赤外線の吸収を利用した湿度計で非常に応答速度が速い特徴がある。高湿度の空気を観測すると赤外線式湿度計のセルが汚れやすいため、高頻度での清掃と校正が必要となる。(詳細は 2.2「オープンパス型 CO₂ / H₂O 分析計」、2.3「クローズドパス型 CO₂ 分析計」を参照のこと)

測定方法

乾球湿球温度計の湿球部の汚れは水の蒸発を悪くさせて大きな誤差の原因となるため、定期的なガーゼの交換を必要とする。湿球温度計用のガーゼを用意する場合、事前によく煮沸し、糊、油などの汚れを除去した上で、清浄な状態で乾燥させておく。ガーゼを濡らす水には蒸留水を用いることが望ましく、湿球に薄い水膜ができる状態を保たせる。湿球感部は水タンク水面より約 2cm 上になるように設置し、水面位置を一定に保つ。乾球部にも汚れや水滴が付着しないように定期的な清掃を行う。

高分子センサ湿度計はセンサ保護のため防塵フィルタ付きの樹脂ケースの中にセンサ部が組み込まれている。この防塵フィルタやセンサの汚れには注意し、汚れがひどい場合には蒸留水を用いて清掃を行う。湿度測定用チップは特に傷付きやすいため慎重に扱う。

気温測定時と同様、通風筒に付着するごみは定期的に取り除く。

赤外線式湿度計の場合はセルが清浄である必要があり、定期的に 50%エタノールとスポンジを用いてセルの清掃を行う。また、クローズドパス式湿度計にチューブ等を用いてサンプル空気を取り込んでいる場合、チューブの漏れ、汚れ、内部での凝結、雨水の浸入等が生じないように注意し、定期的に配管の点検、清掃、交換を行う。

湿度計は温度計等と比べ器差が大きいいため、平均湿度の鉛直分布を測定する場合、各高度から空気をサンプリングして同一の分析計で測定する方式をとることが望ましい。一方、この方式では一地点での連続測定ができないというデメリットが生じる。また、保守頻度の低い遠隔地でこの方式の保守は比較的困難であることから、保守が容易な HMP45 シリーズを複数設置し、同一高度で定期的に校正する方法が用いられる場合が多い。

 Tips!

通風乾湿計のガーゼは汚れに応じて頻繁に交換できるよう十分な量を準備しておく必要がある。ガーゼの洗浄や水タンクへの給水には 500ml 程度の洗浄瓶を用いると良い。

Tips 3.4-1

 Tips!

HMP45 シリーズはセンサ部分の交換を容易にするために差し込み式となっており、ケーブルに張力がかかると抜ける構造であるため、ケーブルの配線時には十分な注意を要する。センサ付近の配線を 1 巻きから 2 巻きしてリングを作って固定するようにする。

Tips 3.4-2

校正

基準器を設け、定期的に同一高度に設置して器差の校正を行う必要がある。経年変化したセンサやパッキン、接続部分は交換を要する。基準器の校正を行う場合、試験槽に塩類の飽和水溶液を入れて蓋をし、恒温状態で 1 時間以上放置して試験槽内の相対湿度を一定にして行う（Appendix 3.4-2 を参照）。HMP45 シリーズ用には校正に用いる専用試験槽が市販されており、測器の出力値の調整が可能である。また、必要に応じて湿度測定用チップのみ、あるいはモジュール部分の交換も可能である。

Appendix 3.4-1: 湿度の定義一覧

名称 (単位)	換算式	定義
水蒸気圧 e [Pa]	Sprung の式など 1)	湿潤空気中の水蒸気の分圧
飽和水蒸気圧 e_s [Pa]	Goff-Gratch の式など 2)	ある温度で空気を含みうる最大の水蒸気圧
飽差 e_d [Pa]	$e_s - e$	飽和水蒸気圧と水蒸気圧の差
相対湿度 ϕ_r [%]	$\frac{e}{e_s}$	飽和水蒸気圧に対する湿潤空気の水蒸気圧の百分率
比湿 q [kgkg ⁻¹]	$\frac{x}{1+x}$ or $\frac{\varepsilon e}{p - (1 - \varepsilon)e}$	湿潤空気 1kg に含まれる水蒸気の質量 ε : 乾燥空気の分子量に対する水蒸気分子量の比, ≈ 0.622
混合比 x [kgkg ⁻¹] 工学系の一部では絶対湿度と呼ぶ	$\frac{\varepsilon e}{p - e}$ or $\frac{q}{1 - q}$	乾燥空気 1kg に対する水蒸気の質量 ε : 乾燥空気の分子量に対する水蒸気分子量の比, ≈ 0.622
絶対湿度 ϕ_a [kgm ⁻³] 工学系の一部では水蒸気密度と呼ぶ場合がある	$\frac{0.00794e}{1 + 0.00366(T - 273.15)}$	単位体積の湿潤空気に含まれる水蒸気の質量
比較湿度 (飽和度) ϕ_p [%]	$100 \frac{x}{x_s}$	飽和空気の混合比 (x_s) に対する湿潤空気の絶対湿度の百分率
露点温度 C_{dp} []	近似式 3) (林, 1988)	湿潤空気が冷却されて飽和に達する温度 (凝結をはじめる温度)

$$1) \quad e = e_s - \frac{j(C_d - C_w)p}{755}$$

C_d : 乾球温度 [], C_w : 湿球温度 [], p : 空気の全圧 [Pa], e_s : 湿球温度 C_w における飽和水蒸気圧 [Pa], j : 定数 (湿球部が氷結していない時に 0.5, 氷結している時に 0.44)

2) 水面上

$$\log_{10} e_s = 10.79574 \left(1 - \frac{T_l}{T_a} \right) - 5.02800 \log_{10} \left(\frac{T_a}{T_l} \right) + 1.50475 \times 10^{-4} \left\{ 1 - 10^{-8.2969 \left(\frac{T_a}{T_l} - 1 \right)} \right\} \\ + 0.42873 \times 10^{-3} \left\{ 10^{4.76955 \left(1 - \frac{T_l}{T_a} \right)} - 1 \right\} + 0.78614$$

氷上

$$\log_{10} e_s = -9.09685 \left(\frac{T_1}{T_a} - 1 \right) - 3.56654 \log_{10} \left(\frac{T_1}{T_a} \right) + 0.87682 \left(1 - \frac{T_a}{T_1} \right) + 0.78614$$

T_a : 絶対温度で表した気温 [K], T_1 : 水の三重点温度 (273.16K)

$$3) \quad C_{dp} = -c_2 \frac{\ln \left(\frac{e}{6.1078} \right)}{\ln \left(\frac{e}{6.1078} \right) - c_1}$$

c_1 および c_2 : いずれも定数 (水面上 $c_1=17.2693882$, $c_2=237.3$, 氷上 $c_1=21.8745584$, $c_2=265.5$)

Appendix 3.4-2: 塩類の飽和水溶液と共存して平衡にある気体の相対湿度

	0	5	10	15	20	25	30
KNO ₃	97	96	95	95	94	93	92
KCl	88	87	86	86	85	84	-
NaCl	76	76	75	75	75	75	75
MgCl ₂ · 6H ₂ O	34	33	33	33	33	33	32

(単位 %)

(日本工業規格 規格番号 JIS Z 8806:2001 湿度測定方法)

3.5 地温・地中熱流量

Soil temperature and soil heat flux

3.5.1 地温

概要

地表面近傍の地温は、日射の影響を受けて昼に高くなり夜に低くなるサインカーブ状の日変化を示す。測定深度が深くなるにつれ、日変化のサインカーブは、振幅が小さくなり、位相も後ろにずれる。森林では地表面を覆う落葉層は寒冷気候であるほど多い傾向にあり、落葉層と土壌の境界は不明瞭となるため、測定深度には注意を要する。

測器の種類

一般に地温測定に用いられる温度センサには、熱電対、サーミスタ (Photo 3.5-1)、白金抵抗体 (Photo 3.5-2) の 3 種類がある。詳しくは、3.3「気温」を参照されたい。土壌は空気に比べると時定数が大きいので、感部が小さい必要はない。むしろ含有水分が大きいために、感部を大きくしてでも防水性を高めたものの方が適している。



Photo 3.5-1 サーミスタ温度計 107-L
(Campbell)。(写真：クリマテック株式会社提供)



Photo 3.5-2 白金抵抗体温度センサ
C-HPT-5-JM(クリマテック)。(写真：クリマテック株式会社提供)

熱電対は自作することもできる。地温観測には、T タイプと呼ばれる銅 - コンスタンタンのものを使うのが一般的である。銅とコンスタンタンの導線から成る補償導線を購入し、一端を結合させれば、熱電対となる。結合は、電気溶接、銀ろう溶接やはんだ付けで行われる。冷接点回路を内蔵しているデータロガーで、熱電対による温度を測定することができる。補償導線には様々な径のものがあるが、土壌の時定数は大きいので、数 mm 程度と太めのもののほうが丈夫で使いやすい。熱電対よりも少し太い金属パイプなどに挿入し、樹脂 (シーラント) を挿入すれば、耐水性は高くなる。

サーミスタは電導物の温度と、その物の電気抵抗の間の比例関係を利用した温度センサである。比例定数は電導物によって異なる。そのためサーミスタとそれを接続するデータロガーは、セットで販売さ

れていることが多い。

白金抵抗体は、一般に 3 線式と 4 線式がある。経年変化が小さいため、頻繁に交換することが難しい地温測定に適している。

そのほか、地表面温度にはしばしば放射温度計 (Photo 3.5-3) が用いられる。物体の表面からは、その表面温度に対応した波長の長波がでてくる。この長波をとらえ温度に変換してものの表面温度を表示するのが放射温度計である。非接触で観測を行えるメリットはあるものの、精度は 2 程度と、接触型に比べると劣る。



Photo 3.5-3 放射温度計 IR-SA。右側はテレスコープ付。(写真：㈱チノー提供)

測定方法

土壌の浅い部分ほど地温 T_s [K] の時間変化、垂直変化は大きいので、浅い部分ほど密になるように温度センサを設置する。設置方法は、穴を掘って非攪乱断面に温度センサを差込み (Photo 3.5-4)、その後穴を埋め戻す。あるいは細い穴を鉛直に開け、穴に温度センサを差し込み、その後穴を同じ土で埋める。前者は周辺の土壌を攪乱するので注意して埋め戻す。後者は深くなると土壌との接触を確認できないので、浅層の地温測定の場合に行なう。いずれの場合にも、センサやケーブルの防水には注意を払う。

フラックス測定では、地表面など、熱・物質交換面の表面温度が重要である。そのため表面温度の測定方法について特に説明する。表面温度を測定するためには表面温度計を使用するのが最も簡便で正確である。接触型温度センサで表面温度を測るには、できるだけ感部の小さなセンサを、できるだけ表面近くに設置しなければならない。設置したセンサ感部には、直接日射が当たらないようにするのが一般的である。



Photo 3.5-4 熱電対温度センサ(棒の左側)と土壌水分計(棒の右側)の埋設断面。(カンボジア国クラティエ州の季節林)

 Tips!

1ヶ所で複数の深度の地温を測定する場合、センサを埋設した後は、どのケーブルがどの深度のセンサのものか解らなくなる。そのため地表面付近やロガー結線部などに、測定深度を記したタグをつけておくと、その後のメンテナンス時に便利である。

Tips 3.5-1

 Tips!

スパイラルチューブあるいは樹脂製の保護管でケーブルを保護することにより、ネズミなどに噛み切られることを防ぐことが出来る。

Tips 3.5-2

 Tips!

温度センサと一体となった防水型のデータロガーの内部にシリカゲルを入れてしっかりと密閉すると、基盤の結露による不具合を防ぐことが出来る。シリカゲルは適時、交換する。

Tips 3.5-3

3.5.2 地中熱流量

概要

地表面における地中熱流量は、土壌と大気の間における熱交換の大きさを表し、 Wm^{-2} の単位で表示される。地中熱流量はその深さでの温度勾配に比例するため、地温の鉛直プロファイルから計算することも可能である。しかし熱流板によって測定するほうが簡便なため一般的である。

測器

熱流板 (Photo 3.5-5, 3.5-6) は、薄い一定の熱伝導率を持つ板 (熱抵抗板) の表裏の温度差が通過熱量に比例するという原理に基づいて作られている。熱流量は、熱流板の出力値 [mV] を感度常数 [$\text{mV}(\text{Wm}^{-2})^{-1}$] で除して求める。

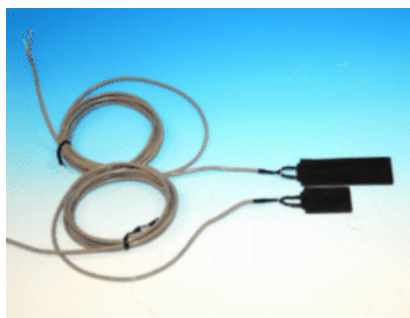


Photo 3.5-5 熱流板 PHF-100。(写真：㈱ブリード提供)

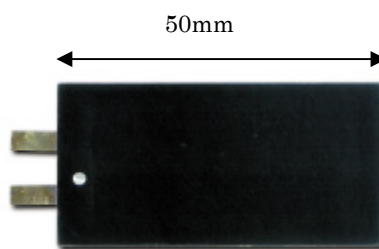


Photo 3.5-6 熱流板 MF-180M。(写真：英弘精機㈱提供)

測定

平たい面が水平方向になるように、熱流板を埋設する (Photo 3.5-7)。地表面の熱流量を測定したい場合、熱流板より浅い土壌による熱貯留量を無視することになるので、埋設する深度は浅いほど良い。しかし浅すぎると、水分移動を熱流板が遮断することによる誤差や日射の影響を受けることになる。定説は無いが、1～3cmの深度に埋設することが多い。土壌と密着させるように十分注意することが必要である。



Photo 3.5-7 熱流板埋設の様子。(川越森林気象試験地)

(3.5-1)式のように、各土層の地温変化と熱容量から熱流量を算出する方法を温度積分法 (Fig. 3.5-1) という。

$$Q = \sum_{i=1}^{i=1} Q_i + Q_b = \sum C_{v_i} \Delta z_{d_i} \Delta T_{s_i} + Q_b \quad (3.5-1)$$

ここで Q は地中熱流量 [Wm^{-2}]、 C_v は土壌の体積熱容量 [$\text{Jm}^{-3} \text{ } ^{-1}$]、 Δz_d は各土層の厚さ [m]、 T_s は地温、 Q_b は最下層土層の下面における地中熱流量、添字 i は各層 i を表す。体積熱容量は、土壌の構成成分のほかに土壌水分の影響も強く受ける。そのため土壌水分の測定も必要となる。

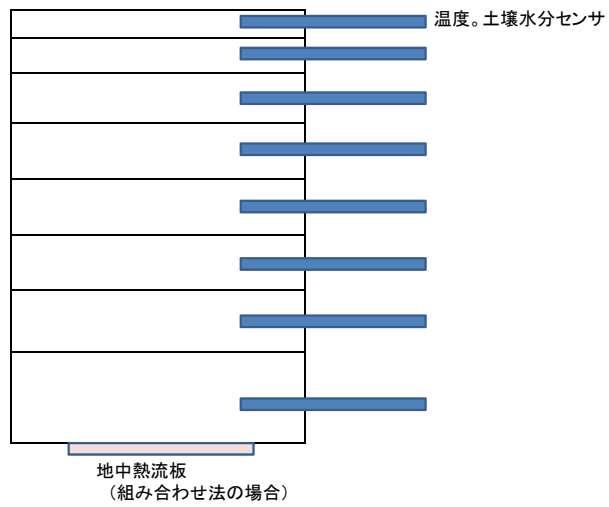


Fig.3.5-1 温度積算法と組み合わせ法の概念図。

3.6 土壌水分

Soil moisture

概要

土壌水分を表わす主な指標には、体積含水率 θ [m^3m^{-3}] とマトリックポテンシャル Ψ [Pa] がある。前者は、土壌全体積のうち水分が占める体積の割合を示し、土壌水の不飽和拡散係数を求めるときなどに使われる。后者は、根による吸水や土壌中の水分移動を論ずるときに使われる。土壌中には大小、様々な大きさの孔が存在する。小さな孔にある水分ほど、吸い出すのに大きなエネルギーを必要とする。そのため土壌水分が少なくなるにつれ、大きな孔にある水分から無くなっていく。マトリックポテンシャルとは、土壌水分が毛管作用や吸着により孔に引き付けられているエネルギーの大きさを示す。すなわち、根が吸水するのに必要なエネルギー量ともいえる。土壌水分が飽和しているときは正の値を、不飽和のときは負の値を示す。マトリックポテンシャルの単位は、単位体積あたりのエネルギーとしたとき、 $\text{Jm}^{-3} = \text{Nm}^{-2} = \text{Pa}$ である。また、単位重量あたりのエネルギーとして定義される水頭 [$\text{Jkg}^{-1}\text{m}^{-1}\text{s}^2 = \text{m}$] は、ポテンシャルの大小を水柱の高さとして実感しやすいことからよく使用される。 $1\text{m} = 9.86\text{hPa}$ である。

土壌水分を表す指標には他に、含水比 Θ [kgkg^{-1}]、飽和度 S_a [m^3m^{-3}] もあり、それぞれ式 3.6-2, 3.6-3 によって算出される。土壌には、水が占めている部分、空気が占めている部分、土壌粒子が占めている部分があり、それぞれ液相、気相、固相という。液相と気相の体積を合わせて全間隙体積という。

$$\theta = \frac{V_r}{V_r + V_s + V_a} = \frac{W_r}{V_r + V_s + V_a} \quad (3.6-1)$$

$$\Theta = \frac{W_r}{W_s} \quad (3.6-2)$$

$$S_a = \frac{V_r}{V_r + V_a} \quad (3.6-3)$$

ここで添え字の r, s, a はそれぞれ液相、固相、気相の、 V は体積を、 W は質量を意味する。

測器の種類

土壌の体積含水率の測定について用いられるものに米国 Campbell Scientific Inc. の CS616-L (Fig. 3.6-1) などの TDR (Time Domain Reflectometry) 水分計がある。これは土壌の誘電率が体積含水率により変動することを利用して高周波電磁波の反射により土壌の誘電率を測定する。TDR 水分計は、多くの土壌で広い含水率範囲において、プローブの長さに対応する土層内の平均体積含水率の計測が可能であるが、温度や土壌塩分の影響により誤差が生じる可能性もある。近年、普及しつつある静電容量法を用いた安価な誘電率水分計 (例えば米国 Decagon Devices, Inc. 製 EC-5, Photo 3.6-1 など) にも同様の温度・塩分の影響がある。センサの感部長は、5cm ~ 1m 以上と多様である。測定したい土壌部位に応じて使い分ける。

マトリックポテンシャルの測定には、テンシオメータ（Photo 3.6-2）を用いる。テンシオメータは、脱気水を満たした素焼きのポーラスカップを、オーガーなどを用いて土層中の測定する深さに埋めてカップ周辺の土壌水と連続させ、カップ内の水が引き付けられる力を、圧力センサで測定する。



Fig. 3.6-1 TDR 土壌水分計 CS616-L。（画像：Campbell Scientific Inc.提供）



Photo 3.6-1 誘電率土壌水分計 EC-5。（写真：Decagon Devices, Inc.提供）

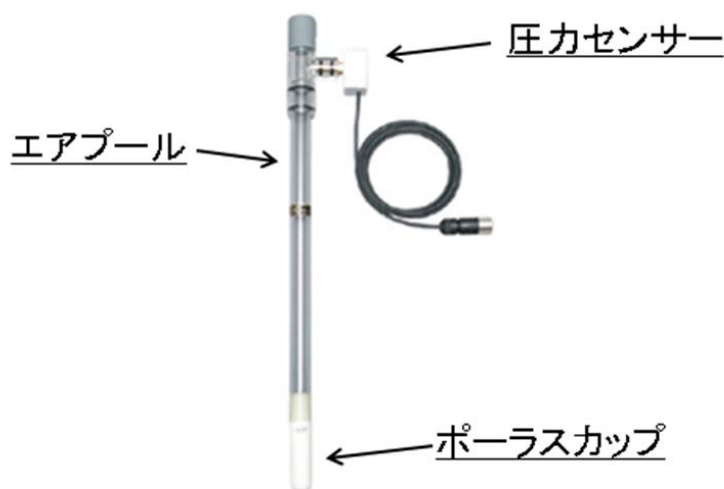


Photo 3.6-2 テンシオメータ DIK-3000 シリーズ（写真：大起理化学工業㈱提供）

測定方法

センサの設置に関しては基本的に土壌温度の測定点と同じ場所にとすることとする。フラックス観測を目的とした場合の土壌水分の測定深度の選定においては、植物の根の存在する深度領域内での水分の状況を十分に把握することを念頭に置いて各観測サイトの状況に応じて判断するべきである。一例として森林総合研究所のカンボジア国コンポントム州の常緑林サイトにおいては、樹木の根は主に 2m 程度の深度までに分布していることから、地表から 20, 50, 100, 150, 200, 250cm の深度において観測を行っている。また、土壌環境は空間的に非常に不均一であるので、可能な限り、面的・深度的に十分な反

復を行うことを薦める。

体積含水率計のセンサ感部やポーラスカップを土中に挿入するときは、付け根まで隙間が生じないように押し込む。深い部分に設置する際には、土壌断面を作成して横方向に挿入して (Photo 3.6-3) 埋め戻す。大きな攪乱を避けたい場合には、所定の深度までオーガーで鉛直方向の穴を開け、延長ロッドの先端に取り付けたセンサ感部を挿入する。また体積含水率計のセンサ感部やテンシオメータのポーラスカップの周りに隙間があると、豪雨時などに水が流れ込むことがあるので、土を流し込んで隙間を埋めておく。



Photo 3.6-3 土壌水分計 (EC-5) 設置のために作成した土壌断面。(筑波大学陸域環境研究センター, 写真: 森林総合研究所飯田真一氏提供)

テンシオメータのポーラスカップを挿入する時、強い力をかけるとポーラスカップが割れるので注意する。テンシオメータのエアプール内の水は次第に減るので、空にならないように適時、水を補給する必要がある。一端水を補給すると、ポーラスカップ内の水は大気圧に開放されるので、再び正しい値を示すようになるには1~24時間を要する。エアプールの栓をする時や設置の時、許容範囲を超えた圧力をかけるとセンサを破壊するので注意する。圧力センサを含む地上部に直射日光が当たると、温度変化によりエアプール内の空気の膨張収縮、センサ出力の温度ドリフトが生じ、大きな誤差となるので、日除けをする。テンシオメータ内の水分が凍結するとセンサが破壊されるので、凍結の恐れのある期間は測定を休止し、水を抜いておく。

次式に示すような土壌水分特性曲線を用いると、体積含水率とマトリックポテンシャルをお互いに換算することができる。

$$\Psi = c_1 \left(\frac{\theta}{\theta_{\text{sat}}} \right)^{c_2} \quad (3.6-4)$$

ここで θ_{sat} は飽和体積含水率 [m^3m^{-3}]、 c_1 、 c_2 は定数で、一般に加圧板脱水装置を用いた加圧板法によって求められる。加圧板法とは採取した土壌サンプルの下面を大気圧に開放し、上面に高圧をかける。その圧力差で土壌水分を減少させる方法である。

校正

センサが直接測定する土壌の中性子透過率，電気抵抗，熱伝導率，誘電率などと体積含水率の関係式は，土壌組成，含有物などによって大きく変化する。したがって土壌水分センサから出力された値をそのまま鵜呑みにせず，炉乾法などによる値で校正を行なう必要がある。

幅広い土壌含水率が得られるように，土壌が湿っている時や乾燥している時も含めるようにして，土壌を採取してくる。このとき，100cc や 400cc の試料円筒に採取するのがよい。サンプルの重さを測ったのち，105℃ の乾燥炉に入れて水分を蒸発させる。その時の減少重量 [g] を試料円筒の体積 [cm^3] で割ると，体積含水率が得られる。炉乾法によって得られた体積含水率と，センサによる測定値の関係を比較し，近似式を得る。センサによる観測値を得られた近似式に代入することにより，より正確な体積含水率を得ることができる。

3.7 降水量(降雨・降雪), 積雪調査(積雪深・積雪重量)

Precipitation / Snow Water Equivalent (SWE)), Snow survey (Snow depth, Snow weight)

概要

降水量は、一定時間内に地表面に到達した降水の量のことであり、一般に平面に溜まった水の高さで表現される。また、降水量のなかで、降雨で供給されたものを降雨量、降雪で供給されたものを降雪量と区別する場合もある。降雪は固体である雪によって供給されるが降雪量は降水量と同じように水量に換算して用いる。単位は mm を用いる。

降雪が溶けずに地面に堆積する場合、積雪となる。積雪は周辺環境に与える影響が大きいため、積雪が存在する場合様々な測定が行われるが、ここでは堆積している積雪の厚さを示す積雪深と、単位面積あたりの積雪の重さである積雪重量について述べる。

3.7.1 降水量(降雨・降雪)

測器の種類

測定は通常、転倒マス型雨量計や貯留型雨量計を用いて行われる。

転倒マス型雨量計

円筒形の受水口から入った降水を漏斗で転倒マスに注ぎ、この転倒回数によって降水量を測定する (Photo 3.7-1)。

転倒マス型雨量計

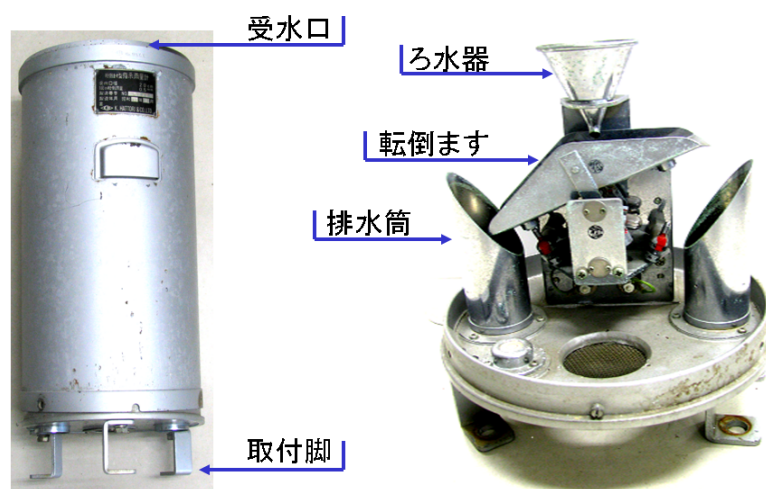


Photo 3.7-1 転倒マスの外観と構造。

貯留型雨量計

円筒形の貯水バケツを地中に埋め込み受水口から入った水を貯水バケツ内の貯水ビンで受けて、ビンに溜まった雨をメスシリンダで測定する。

降雪量は、降水量と同じく転倒マス型雨量計を用いて行うが、雪を溶かすための工夫と風の影響で積雪量が過小評価されることを防ぐための工夫が必要である。

溢水式転倒マス

降雪を測定するために、バケツ内にヒータで温めた水を張り、降雪をこの水で溶かし、バケツから溢れた水の量を転倒マスで量ることによって降雪量を求める。バケツの上にオイルを定期的に供給し、ヒータで温めた水の表面からの蒸発を止める必要がある。

測定方法

雨量計の設置場所は水平で、周辺の建物や樹木等の高さの4倍以上離れた場所に設置することが必要であるとされる。一般に森林においてこれらの条件を満たすことは困難で、樹木の伐採を行って対応する場合が多い。この場合、周囲の樹木の生長によって降水量が大幅に変動してしまうことが多い。そのため気象観測タワーの中間部等の樹木影響が少ないところに補助的に転倒マスを設置したり、複数の観測点をもうけるなどし、経年変化をモニタすることで設置場所の環境変化の影響評価を行うことがある。

設置した雨量計の転倒マスがなめらかに動くかどうかを確認し、1 転倒毎にパルスデータが出力されるかどうかを確かめ、接点や運動部への注油を行う等のメンテナンスを定期的に行う。

積雪地域では、冬季、雨量計が雪に埋まらないように除雪を行うか、雪に埋まらない高さに雨量計を設置する必要がある。また、降雪強度が極端に高い場合はヒータによる融解が間に合わずバケツの上端が雪でふさがれてしまう場合がある。積雪強度が高い地域では注意が必要である。いったんバケツの上端がふさがれてしまうと長期にわたってデータが欠測になるため、高い降雪強度が予想される場合にはヒータの温度をやや高めに設定する。

溢水式転倒マスは冬季以外は水を張っていると大量の虫が溜まり、測定が困難になるため、冬季以外は通常の転倒マスで測定する必要がある。

Tips!

転倒マスはスイッチによって矩形波のシグナルを送るためノイズの混入が多い。チャタリング防止のために、出力の二端子の間に小容量のコンデンサーを挟み込むか、データロガー側で短時間での連続データ（1 秒程度）については一つのデータと見なすなどの手法を用いてチャタリングノイズ対策を行うと良い。

Tips 3.7-1

Tips!

降雪量測定時には風による補足率の低下を防ぐために転倒マスの周囲に風よけを設置するとよい。風よけの大きさは測定場所の風速や雪質等に強く依存するため一定ではないが、比較的風の強い地域では一つの転倒マス測定について高さ 2m 以上の防風板を多重に設置する必要があると提案された例も存在する。通常はバケット円筒の 2 倍から 3 倍程度の円筒を、バケットの上 20cm 程度につきだした形で設置する程度でもデータの信頼性は著しく向上する。

Tips 3.7-2

校正

転倒マスの校正はメスシリンダで測定した水によって行う。通常校正が必要なほど転倒マスの大きさが変化することは少ない。

3.7.2 積雪調査（積雪深・積雪重量）**測器の種類**

降雪は空間的な分布が非常に大きいことと積雪という形で降った雪が地表面に残ることから、積もった雪の量を連続的に測定することによって降雪に関する情報を得る方法も広く用いられている。

積雪深

目視観測の場合、雪尺が用いられる。自動測器では、AMeDAS で用いられている超音波式その他、レーザ式、光学式がある。超音波式およびレーザ式センサは、雪面より上に取り付けられたセンサから雪面までの距離を測定する(Photo 3.7-2)。光学式センサは、積雪のある部分は光を通さないことを利用して、積雪深を測定する。



Photo 3.7-2 超音波積雪深計の測定風景。(十日町試験地)

積雪水量

積雪重量計を用いて不凍液を入れたスノーピロー（メタルウェファ）を観測露場に設置し積雪の重量をスノーピローにかかる圧力の変化によって測定する。もしくは、断面積がわかっている円筒形の筒を積雪層内にさしこみ、地面までの雪の全層をサンプルして重量を測定する。得られた重量から積雪水量を計算する。

測定方法

積雪調査を行う場所は、雨量計設置場所と同様、樹木等の影響を受けない水平なところで行う。

固定式の積雪深計測定の他に、可能であれば定期的にスノーサンプラーによる多点測定を行うことが望ましい。多点サンプルを行うことによって空間的なばらつきの評価ができ、積雪深と積雪重量から積雪密度がわかる。スノーサンプラーは市販の製品も多く存在しているが自作でも十分に対応可能である。

スノーピローによって積雪重量を測定する場合、スノーピローの大きさに比べて積雪が多くなるとピローの上部の雪がつながり合って測定重量が過小評価される場合が多い。これまでの研究例ではスノーピローは1辺の長さが最大積雪水量程度あるとよいとされている。したがって、予想される最大積雪重量から、スノーピローの1辺の長さを決定する。

校正

積雪深計周辺では、柱やポール周辺に融雪によるくぼみができたりして、測定誤差の原因になる。測深棒によって周辺の積雪深を実測し、必要に応じて補正を行う必要がある。

3.8 水位，水温，灌漑・排水量

Water level, Water temperature, Irrigation and drainage

概要

湛水している場所，あるいは地下水面が高い場所では，水位・水温の変化が地表面特性に大きな影響を及ぼす。底の定まった系では，水位の増加とともに系の熱容量が大きくなる。高層湿原では，水位の増減とともに地表面の空気力学特性および蒸発効率が見かけ上変化する。水体の貯熱量を算出するためには，水位と水温の両方を測定する必要がある。また，水位・水温の急激な変化からは，水の水平方向の移動に関する情報を得ることができる。灌漑農地では，灌漑・排水量の把握が水収支を評価する上で不可欠である。系によっては，灌漑・排水にともなう溶存・非溶存態の炭素および窒素の流入出が各々の収支において無視できない場合もある。

水位は，基準面に対する水面の高さである。水面に対して垂直に設置した定規等の目盛りを，目視あるいはコマ落としカメラ等で観測する方法は，最も基本的で信頼性が高く，センサを用いた測定の校正にも用いられる。水位センサには，測定原理の異なるものが各種揃っており，水位変動の大きさに応じて使い分ける。これらは，蒸発量を測定するためのライシメータやパン，後述の流量を測定するための量水堰にも用いられる。

大気と同様に水体にも温度成層が生じるため，水温の測定は気温（地温）と同様に測定する高さ（深さ）に注意する必要がある。水位の変化が早く大きい場所では，水位とともにセンサの感部が上下に移動するような仕組みが求められる。

灌漑農地について，広域では用水計画からおおよその灌漑水量を知ることができるが，フラックス観測に対応する圃場レベルでの灌漑・排水量は，量水堰を用いた実測が基本となる。日本国内の圃場整備が行われた農地では，耕区単位で開水路あるいは管水路から直接灌漑がなされるため，灌漑量は比較的精度よく測定できる。一方，排水は形態が多様で1枚の圃場で複数の排水経路を持つ場合も多いが，本節では水田の表面排水を主に扱う。暗渠の有無と種類，土壌の浸透性，地下水面の高さ等を事前に把握できれば，効果的な測定が可能となる。

3.8.1 水位

測器の種類

水面上の基準点から水面までの距離を測定する方法と，水面下の基準点から水面までの距離を測定する方法がある。

フロート式水位計

浮子（フロート）の動きから水位を読み取る。フロートの上下動がプーリーのシャフトの回転に変

換できるため，簡便な装置で連続測定が可能である。ただし，可動部が多く，精度を維持するためには頻繁なメンテナンスが必要である。

超音波式水位計

超音波パルスを水面に向けて発射し，その反射時間から水面までの距離を測定する。可動部がないため測器自体はメンテナンスを要さないが，超音波のパス内に障害物が侵入していないかを定期的を確認する必要がある。音波を利用するため，音速の温度依存性を補正する必要があるが，通常は補正回路が内蔵されている。ただし，井戸等，水体とセンサの温度が大きく異なる場合には補正の精度が低下する恐れがある。

光波（レーザ）式水位計

上述の超音波の代わりに水面に向けてレーザを照射し，反射光が到達するまでの時間を水面までの距離に換算する。ミリ単位の測定には，レーザ変位計を用いる。対象とする水が懸濁していない場合は，レーザの透過を防ぐため平らな浮子を用いることがある。

静電容量式水位計

電極間の静電容量が流体の量に比例することを利用し水位を測定する。市販されているのは電極の長さが 0.5～2m 程度のものである。1 台で対応できる測定レンジが他のセンサに比べ狭いため，水位の変化幅を予め調査し，最適な長さのものを選定する。

圧力式水位計

ダイアフラムの変位から水压を求め水位に換算する。大気圧を同時に測定する必要があるが，負圧側を大気に開放し大気圧の補正を要しないタイプもある。ダイアフラムの性質上，耐圧性が高いものは分解能がよくない。

測定方法

水流が生じて動くことがないように，センサは基礎の強固な支柱に確実に固定する。温度依存性の大きいセンサ用いる場合は，センサに日射が当たらないように日よけを工夫する。超音波式およびレーザ式では，センサと水面の間に葉などの障害物が侵入しないように，塩ビパイプや筒状の網で測定パスを確保する。ただし，それ自身が測定パスを遮らないように，とくに音波の場合は検出領域を取扱説明書等で事前に確認しておく必要がある。大気圧補正が必要な圧力式水位計は，大気圧を同時に測定する。圧力式水位計で深さが足りない場合は，水底を掘り下げ塩ビパイプを挿入し，見かけ上水深を大きくする。

実際の水位および基準点からセンサのゼロ点までの距離を定期的に測定し，センサの出力値と比較し問題がないことを確かめる。水田のような比較的狭い水面では，強風時に水が風下側に吹き寄せられることがある。そのため，サイト訪問時，圃場内に設けた複数の観測定点で水位を記録しておくこと後の解析に有用である。

校正

超音波式とレーザ式の水位計は、適当な平板を準備し、その平板までの距離を変えて測定することで、室内での校正が可能である。また、静電容量式と圧力式の水位計のうちレンジの小さいものも、水槽あるいはバケツを用いて室内で校正できる。温度補正回路を持つものは、その確認のため、サイトに設置後も定期的に水位を実測し、センサの出力と比較する。

3.8.2 水温

測器の種類

水温測定には、気温あるいは地温と同様に、熱電対、サーミスタ、白金抵抗測温体が一般に用いられる。各々の特徴については、3.3「気温」、3.5.1「地温」を参照されたい。

測定方法

水面からの深さを一定になるように測定する場合は、センサを浮子につり下げる（Photo 3.8-1）。水底からの高さが一定になるように測定する場合は、センサに重りを付けて沈め、浮子で水中に浮揚させる。いずれも、浮子およびセンサが風や水流で流されないように、筒状の網で浮子とセンサの全体を覆うとよい。ただし、測温部がその網に触れないように注意する。



Photo 3.8-1 浮子を用いた田面水温の測定例。（真瀬水田フラックスサイト）

💡 Tips!

水田では、植物が生長する前は水底が熱源となるため水温が比較的均一であるが、植物が十分に繁茂した状態では水面が熱源となるため温度成層が発達しやすい。水温を複数の深度で測定しておくと、水体の貯熱変化量の解析に有用である。

Tips 3.8-1

校正

気温測定用のセンサと同様に恒温槽を用いて行う（3.3「気温」参照）。

3.8.3 灌漑・排水量

測器の種類

基本的に流量の測定となる。流量が $1 \sim 2 \text{ Lmin}^{-1}$ 程度で適当な落差がある場合は、バケツ、ビーカー、ストップウォッチを用いて直接測定できる。しかし、長期に渡り連続的に測定するためには、下記の測器を用いる。

堰式流量計

堤頂部が矩形または三角形に切り取られた堰（量水堰）で流水を貯め、その切欠き部分から溢れる水量と堰の水位から流量を算出する（Photo 3.8-2）。水位センサには堰の深さに対応したものをを用いる。水位と流量の関係は、切欠きの形状によって決まる。切欠きが直角三角形の三角堰、矩形の四角堰について流量公式が JIS で定められている（JISK0094: <http://www.jisc.go.jp/> から閲覧可）。灌漑・排水量の測定に適用する際は、通常、切欠きを設けた水槽を用いる。例えば、管水路からの直接灌漑の場合、給水栓から出た水を一旦この水槽に貯め、その水位を測定する。

パーシャルフリュウム式流量計

開水路の流量測定には、パーシャルフリュウムも用いられる。パーシャルフリュウムは、鼓のような形をした金型で、狭窄部で水位が上昇することを利用して流量の測定を行う（Photo 3.8-3）。土砂が堆積しにくい構造のため、メンテナンスは堰・水槽型ほど頻繁に行う必要がない。

水道メータ

管水路で最大流量が水道程度であれば、プロペラ式の水道メータが利用できる。家庭用で主に用いられる接線流式は構造が単純で故障が少なく安価（数千円／個）である。ただし、農業用水は、メータの故障の原因となる藻などのごみが十分に除かれていない場合が多く適していない。一方電磁式の水道メータは高価ではあるが、可動部がなくプロペラ式に比べて適用範囲は広い。いずれも通常は上水道での使用が前提となっているため、保証の条件に注意する必要がある。



Photo 3.8-2 水槽型量水堰（三角堰）を用いた排水量の測定例。（真瀬水田フラックスサイト）



Photo 3.8-3 開水路の流量測定に用いられるパーシャルフリュームの設置例。（写真：㈱セネコム提供）

測定方法

まず、圃場の灌漑・排水の様式、および取水・排水口の位置と落差を把握する。取水・排水口から水面までの落差が大きい場合は、その間に水槽型の量水堰を設置する。管水路で十分な水圧が与えられている場合は、水槽を蛇口付近に設置し、ホースで水槽に水を導入する。パーシャルフリュームは、開水路に直接挿入する。水路の幅がパーシャルフリュームの入り口の幅より広い場合は、盛り土等で上流からパーシャルフリュームの入り口に向けて徐々に狭くする必要がある。このため、一般に三面張りの水路には適していない。いずれも、水位から流量を正しく算出するためには、設計どおりに（通常は水平）設置しなければならない。また、堰が水流で移動しないように、大雨時の流量および貯水時の重さを十分考慮して足場パイプ等で確実に固定しておく。水道メータは必要に応じて異径パイプ等を用いながら給水栓に直接設置する。堰およびパーシャルフリュームの水位は、静電容量式あるいは圧力式の水位計を用いて 10～30 分間隔で測定する。補助データとして、サイト訪問時に灌漑・排水の状態を記録しておく。

校正

特殊な量水堰を用いる場合は、予め水位と流量の関係を実測し水位流量曲線を作成しておく。流量は、一定時間内に堰から流出する水をバケツに貯め、その量を秤あるいはメスシリンダで測定する。水位センサを用いる場合は、前述の水位センサの校正も実施しておく。サイトに設置した状態で水位と流量をチェックしておくことも有用である。

3.9 データロガー

Data Logger

概要

微気象観測では、2 章の乱流変動法によるフラックス測定のような高速サンプリングのデータロガーは必要としない。データロガーはセンサから出力される信号の種類、消費電力などを考慮して選定する。

種類

データロガーは大別すると、センサから出力される様々な信号（電圧、パルスなど）に対応した多チャンネルのロガーと、センサとロガーが一体化または、記録できる信号が 1 種類の単機能ロガーがある。

多チャンネルデータロガーは米国 Campbell Scientific Inc. の CR800、CR1000、江藤電気株の CADAC2、CADAC21（CADAC2 は製造終了）、グラフテック株の GL-220、GL-820 など、多数のメーカ、形式のデータロガーが市販されている。ここでは、CR1000、CADAC21、GL-820 について簡単に紹介する。

CR1000

消費電力が非常に小さい（1Hz サンプリング時 0.6mA）。メモリは 4MB で、オプションのコンパクトフラッシュ（CF）モジュール（CFM100）を取り付けることにより、CF カードにデータを保存することが可能である。RS-232C か専用ケーブル（オプション）を用いて PC と通信し、専用ソフトによってデータ回収、制御プログラムの転送、各種設定を行う。デジタル出力のセンサにも対応可能である。CRBasic というプログラミング言語を搭載し、計測インターバルや印加電圧の制御等を自由に行うことができる。また、オプションの追加によりチャンネル数の追加、リレー制御等も可能になるなど、汎用性・拡張性が高い。

CADAC21

メインユニット（9201A）にスキャンユニット（MODEL 9220A～9223A）を接続して使用する。RS-232C やイーサネット接続（出荷時オプション）を通じて PC と接続し、ユニット制御とデータ転送を行う。メモリは 8MB で、測定チャンネルが多くデータ容量が多い場合は、PC を常時接続し、PC にデータを保存することもできる。スキャンユニットの増設により、測定チャンネルは最大 80 まで可能である。付属のソフトで計測インターバルなどの設定が行えるため、初心者にも扱いが容易である。

GL-820

単体でのチャンネル数が 20ch で、拡張することにより最大 200 チャンネルまで測定可能である。拡張性が高く、前述 2 機種に比べて安価である。ただし、入力信号の種類によっては測定精度が低い。

単機能ロガーは、近年安価で手軽なものが多数市販されている。ここではデータミニ（日置電機㈱）について簡単に紹介する。

データミニ

データミニのシリーズには、電圧ロガー3635（製造終了）、LR5041、LR5042、LR5043、パルスロガーLR5061 などがある。また、温度、湿度センサが内蔵されている温度ロガー3632（製造終了）、LR5011、LR5001 などもあり、目的に応じて使い分けることが可能である。測定間隔等の設定は、ロガー表面のボタンを用いて行えるほか、メーカー側から提供されているソフトを使用して容易に行える。ただし、データ回収は、コミュニケーションベースと呼ばれる専用のデータ回収機を用いて、それぞれのロガーからデータを吸い上げ、コミュニケーションベースを介して PC に取り込む必要がある。

Tips!

PAR センサなど出力の小さいセンサを用いて林内で広範囲に測定したい場合などには、プレヒート機能を使用せず電圧ロガー3645（製造終了）の測定レンジ 50mV（表示分解能 0.01mV）を用いると、ケーブル長を短く、多点観測が安価に行える。

Tips 3.9-1

選定のポイント

日射計や PAR センサなどの放射計センサは、一般に出力範囲が 0～10mV と小さいため、これに見合う精度をもつデータロガーが必要である。例えば米国 LI-COR, Inc.の光量子センサ（LI-190B）は 0～10mV が $0 \sim 3000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光量子量に相当する電圧出力であるので、もしデータロガーの分解能が 1mV であれば、物理量になおすと、 $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の分解能しか持たないことになる。したがって、0.01mV 程度の分解能を持つロガーを選ぶ必要がある。

また、センサの測定精度を十分活かすためには、分解能と共に測定精度にも留意する必要がある。

測温抵抗温度計など、印加電圧やプレヒート（測定前に何秒間か通電する）が必要な物がある。このような測器の場合、ロガーから印可電圧やプレヒートの制御が可能なものを選定すると、測定が容易となり、消費電力を抑えることができる。

3 章関連情報

参考文献

- AsiaFlux 運営委員会編 (2003) 陸域生態系における二酸化炭素等のフラックス観測の実際, 116pp, 国立環境研究所.
- 近藤純正編 (1994) 水環境の気象学 - 地表面の水収支・熱収支 -, 348pp, 朝倉書店.
- 日本工業規格 JIS Z 8806 (2001) 湿度 - 測定方法, 日本規格協会.
- 日本農業気象学会関東支部編 (1988) 農業気象の測器と測定法, 332pp, 農業技術協会.
- 日本農業気象学会編 (1997) 新訂農業気象の測器と測定法, 345pp, 農業技術協会.
- 日本雪氷学会北海道支部編 (1991) 雪氷調査法, 244pp, 北海道大学図書刊行会.
- 森林立地調査法編集委員会編 (1999) 森林立地調査法 - 森の環境を測る -, 284pp, 博友社.
- 種生物学会編 (2003) 光と水と植物のかたち 植物生理生態学入門, 319pp, 文一総合出版.
- 鈴木宣直編 (1996) 気象研究ノート 185 号 気象測器 - 地上気象観測篇, 155pp, 日本気象学会.
- 塚本修・文字信貴編 (2001) 気象研究ノート第 199 号 地表面フラックス測定法, 242pp, 日本気象学会.
- 渡部一郎編 (1987) 農業環境実験法 - 農業気象学・農業環境工学, 285pp, サイエンスハウス.
- 吉野正敏, 浅井富雄, 川村武, 設楽寛, 新田尚, 前島郁雄編 (1986) 気候学・気象学辞典, 742pp, 二宮書店.

機器情報

斜体で表示する型式番号は製造を終了している製品である。

3.1

日射計

- ・ 英弘精機(株) (MS-802 , MS-402 , MS-601 , ML020VM) <http://www.eko.co.jp/>
- ・ Hukseflux Thermal Sensors B.V., The Netherlands (SR11 , LP02) <http://www.hukseflux.com/>
- ・ Kipp & Zonen B.V., The Netherlands (CMP 21 , CMP 6 , CMP 3 , SP Lite2)
<http://www.kippzonen.com/>
- ・ (株)ブリード (PCM-01) <http://www.prede.com/>
- ・ THE EPPLEY LABORATORY, INC., US (PSP) <http://www.eppleylab.com/>

直達日射計

- ・ 英弘精機(株) (MS-56 , *MS-101D*) <http://www.eko.co.jp/>
- ・ THE EPPLEY LABORATORY, INC., US (NIP) <http://www.eppleylab.com/>
- ・ Kipp & Zonen B.V., The Netherlands (*CH 1* , CHP 1) <http://www.kippzonen.com/>

サントラッカー (太陽追尾装置)

- ・ 英弘精機(株) (STR-21 , STR-22) <http://www.eko.co.jp/>
- ・ THE EPPLEY LABORATORY, INC., US (SMT-3 , ST-1 , ST-3) <http://www.eppleylab.com/>
- ・ Kipp & Zonen B.V., The Netherlands (SOLYS 2 , 2AP) <http://www.kippzonen.com/>
- ・ (株)ブリード (ASTX-2) <http://www.prede.com/>

シャドウバンド

- ・ Kipp & Zonen B.V., The Netherlands (CM 121B , CM 121C , SOLYS 2 , 2AP)
<http://www.kippzonen.com/>
- ・ (株)ブリード (PSB-100 , PRB-100) <http://www.prede.com/>
- ・ THE EPPLEY LABORATORY, INC., US (SBS , SDK) <http://www.eppleylab.com/>

長波 (赤外) 放射計

- ・ 英弘精機(株) (MS-202) <http://www.eko.co.jp/>
- ・ THE EPPLEY LABORATORY, INC., US (PIR) <http://www.eppleylab.com/>
- ・ Kipp & Zonen B.V., The Netherlands (CGR 3 , CGR 4) <http://www.kippzonen.com/>

正味放射計・4成分放射計

- ・ 英弘精機(株) (MF-11 , MR-60) <http://www.eko.co.jp/>
- ・ Hukseflux Thermal Sensors B.V., The Netherlands (NR01) <http://www.hukseflux.com/>
- ・ Kipp & Zonen B.V., The Netherlands (NR Lite2 , *CNR 1* , CNR 2 , CNR 4)
<http://www.kippzonen.com/>
- ・ Radiation and Energy Balance Systems, Inc, US (Q*7) または Campbell Scientific, Inc., US (Q7.1)
<http://www.campbellsci.com/>

分光放射計

- ・ 英弘精機(株) (MS-700) <http://www.eko.co.jp/>

- ASD Inc., US (FieldSpec Handheld2) <http://www.asdi.com/>
- THE EPPLEY LABORATORY, INC., US (PSP) <http://www.eppleylab.com/>

光量子センサ

- LI-COR, Inc., US (LI-190) <http://www.licor.com/>
- 英弘精機(株) (ML-020P) <http://www.eko.co.jp/>
- Kipp & Zonen B.V., The Netherlands (PAR Lite , PQS 1) <http://www.kippzonen.com/>
- コイト電工(株) (IKS-27) <http://www.koito-ind.co.jp/eco/koito-environ/>
- (株)ブリード (PAR-01) <http://www.prede.com/>
- Skye Instruments Ltd, UK (SKP 215) <http://www.skyeinstruments.com/>

3.2

風向風速計

- R. M. Young Company, US (Model 12005 Microvane & 3-Cup Anemometer , Model 05103 Wind Monitor) <http://www.youngusa.com/>

風向計

- (株)牧野応用測器研究所 (VR536) <http://business1.plala.or.jp/manox/>
- 横河電子機器(株) (A802) <http://www.yokogawa.com/jp-ydk/>
- Windspeed Limited trading as Vector Instruments, UK (W200P) <http://www.windspeed.co.uk/ws/index.php>

風速計

- (株)牧野応用測器研究所 (AF750) <http://business1.plala.or.jp/manox/>
- 横河電子機器(株) (A702) <http://www.yokogawa.com/jp-ydk/>
- Windspeed Limited trading as Vector Instruments, UK (W100 シリーズ) <http://www.windspeed.co.uk/ws/index.php>

超音波風速計

- R. M. Young Company, US (Model 85000 Ultrasonic Anemometer) <http://www.youngusa.com/>
- Vaisala Oyj, Finland (WMT700 WINDCAP) <http://www.vaisala.com/>
- Gill Instruments Ltd., UK (WindSonic) <http://www.gill.co.uk/>

ピトー管

- (株)岡野製作所 <http://www.okanoworks.com/>

差圧計

- Setra Systems, Inc., US (Model 239) <http://www.setra.com/tra/>

3.3

白金測温抵抗体温度計

- Vaisala Oyj, Finland (HMP45A , HMP45D) <http://www.vaisala.com>

HMP45D は 4 線式抵抗値として温度が出力され、HMP45A は 0 ~ 1V の電圧で温度が出力される。この HMP45 シリーズの製品は 2009 年 3 月末日を持って製造終了しており、後継機種と

して HMP-155 シリーズが販売されている。

- ・ 川惣電機工業(株) (シース測温抵抗体)
- ・ 林電工(株) (リード線直結形測温抵抗体)

<http://www.kawaso.co.jp/>

<http://www.hayashidenko.co.jp>

熱電対温度計

- ・ Grant Instruments (Cambridge) Ltd , UK (CS-U-VL50-0)
- ・ クリマテック(株) (Ct-0.32)
- ・ 林電工(株) (シース熱電対)

<http://www.grant.co.uk/>

<http://www.weather.co.jp/>

<http://www.hayashidenko.co.jp>

サーミスタ

- ・ Campbell Scientific (107-L)
- ・ Onset Computer Corporation, US (HOBO)

<http://www.campbellsci.com/>

<http://www.onsetcomp.com/>

HOBO には熱電対タイプ (ホボ U12 熱電対ロガー) もある。

- ・ (株)ティアンドデイ (おんどとり)

<http://www.tandd.co.jp/>

おんどとりには白金温度計タイプ (おんどとり Pt) もある。

- ・ 日置電機(株) (データミニ)
- ・ (株)タカラ・サーミスタ (D717)

<http://www.hioki.com/>

<http://www.tateyama.jp>

放射温度計

- ・ クリマテック(株) (C-IRR-P)
- ・ NEC Avio 赤外線テクノロジー(株) (赤外線サーモグラフ)

<http://www.weather.co.jp>

<http://www.nec-avio.co.jp/>

通風筒

- ・ クリマテック(株) (CPR-AS-1 ・ 縦型)
- ・ (株)プリード (PFH-01)
- ・ 英弘精機(株) (MH-120)

<http://www.weather.co.jp>

<http://www.prede.com/>

<http://www.eko.co.jp>

ユニット恒温槽および低温水槽ユニット

- ・ タイテック(株) (SX-10R , CB-40)

<http://taitec.net/>

3.4

通風乾湿計

- ・ (株)プリード (PFH-01)
- ・ クリマテック(株) (CPR-AS-1/2)
- ・ 英弘精機(株) (MH-120)

<http://www.prede.com/>

<http://www.weather.co.jp/>

<http://www.eko.co.jp/>

露点湿度計

- ・ 横河電子機器(株) (E-771)

<http://www.yokogawa.com/jp-ydk/>

高分子センサ湿度計

- ・ Vaisala Oyj, Finland (HMP45A , HMP45D)

<http://www.vaisala.com>

このシリーズはプローブ先端が焼結 PTFE フィルタによって保護されており, 90%応答時間が 15 秒から 60 秒へと長くなっている。また, 形状的にも根元部分の直径が 24mm から 40mm へ, 全長が 240mm から 279mm へと大型化しているため, 取り付け時の互換性に注意する必要がある。ただし, 上記製品は 2009 年 3 月末日を持って製造終了しており, 後継機種として

HMP-155 シリーズが販売されている。

赤外線式湿度計

- LI-COR, Inc., US (LI-840 , LI-7000 , LI-7500) <http://www.licor.com/>

3.5

サーミスタ

- Onset Computer Corporation, US (S-TMA) <http://www.onsetcomp.com>
- Campbell Scientific, Inc., US (107-L) <http://www.campbellsci.com/>

白金抵抗体

- クリマテック(株) (C-HPT-5-JM) <http://www.weather.co.jp/>

表面温度計

- (株)チノー (IR-SAB) <http://www.chino.co.jp>

熱流計

- (株)ブリード (PHF-100) <http://www.prede.com>
- 英弘精機(株) (MF-180M) <http://www.eko.co.jp>

3.6

体積含水率計

- Decagon Devices, Inc., US (EC-5 , 静電容量法による誘電率水分計) <http://www.decagon.com>
- Campbell Scientific, Inc., US(CS616-L ,Time Domain Reflectrometry 方式による誘電率水分計) <http://www.campbellsci.com>
- Stevens Water Monitoring Systems, Inc., US (Hydra Probe Soil Moisture and Salinity Sensor , Amplitude Domain Reflectrometry 方式による誘電率水分計) <http://www.stevenswater.com>
- Delta-T Devices Ltd, UK (ML2x) <http://www.delta-t.co.uk>
- Sentek Pty Ltd, Australia (EnviroSCAN) <http://www.sentek.com.au/>

テンシオメータ

- 大起理化工業(株) (DIK-3042) <http://www.daiki.co.jp>
- クリマテック(株) (UNSUC CSK-5500EL) <http://www.weather.co.jp>
- (株)ウイジン (UIZ-SMT) <http://www.uizin.co.jp>

3.7

転倒マス型雨量計

- 横河電子機器(株) (WB0011) <http://www.yokogawa.com/jp-ydk/>
- Onset Computer Corporation, US (HOBO Data Logging Rain Gauge RG-3n) <http://www.onsetcomp.com/>

積雪深計

- 新潟電気(株) (SDM-301s) <http://www.snowcon.com/>

- ・ (株)ソニック (SL-370) <http://www.u-sonic.co.jp/>
- ・ Campbell Scientific, (Canada) Corp., Canada (SR-50A) <http://www.campbellsci.ca/>

積雪重量計

- ・ 新潟電気(株) (MN-301s) <http://www.snowcon.com/>

3.8

超音波式水位計

- ・ (株)キーエンス (UD-300 シリーズ) <http://www.keyence.co.jp/>
- ・ General Electric Company, US (PDCR/PTX 1730/1740) <http://www.ge-mcs.com/en/>

静電容量式水位計

- ・ Unidata Pty Ltd, Australia (Model: 6521 series) <http://www.unidata.com.au/>
- ・ (株)セネコム (Trutrack シリーズの販売代理店) <http://www.senecom.co.jp/>

圧力式水位計

- ・ クリマテック(株) (CSTS シリーズの販売代理店) <http://www.weather.co.jp/>

量水堰：パーシャルフリューム (規格サイズでも受注生産の場合が多い)

- ・ 日本環境計測(株) (MIJ-09K) <http://www.environment.co.jp/>
- ・ (株)セネコム (流量観測用パーシャルフリューム) <http://www.senecom.co.jp/>
- ・ (株)池田計器製作所 (PF シリーズ) <http://www.ikeda-keiki.co.jp/>
- ・ 竹内鉄工所 (量水堰一般) TEL: 0562-82-7851

3.9

多チャンネルデータロガー

- ・ Campbell Scientific, Inc., US (CR1000 , CR800) <http://www.campbellsci.com/>
- ・ 江藤電気(株) (CADAC2 , CADAC21 , CADAC3) <http://www.etodenki.co.jp/>
- ・ 日置電機(株) (メモリハイロガー-8420 , メモリハイロガー-8430) <http://www.hioki.co.jp/>
- ・ オムロン(株) (ZR-RX40A) <http://www.omron.co.jp/>

単機能データロガー

- ・ 日置電機(株) (データミニシリーズ : 温度ロガー-3633 , 湿度ロガー-3632 , パルスロガー-3639 , 電圧ロガー-3645) <http://www.hioki.co.jp/>
- ・ (株)ティアンドデイ (おんどとり TR-7U , アメンボ RF-3 , 電圧ロガー-VR-71) <http://www.tandd.co.jp/>
- ・ Onset Computer Corporation, US (Temperature/Relative Humidity Data Logger HOB0 U23 Pro v2) <http://www.onsetcomp.com>

RS-232-to-RS-422/485 コンバータ

- ・ Moxa Inc., US (Transio A52/53) <http://japan.moxa.com/>

RS-232-to-USB 変換ケーブル

- ・ (株)アイ・オー・データ機器 (USB - RS-232C シリアル変換アダプター USB-RSAQ5 シリーズ) <http://www.iodata.jp/>

- ・ ラトックシステム㈱ (USB ポート用シリアルコンバータ REX-USB60F)
ティアンドデイ社推奨:「おんどとり」と Dual Core 以上の CPU をもつ PC との接続時に使用
<http://www.ratocsystems.com/>

部品・消耗品 (例)

1. 避雷器 (アレスタ) SG-GV シリーズなど : 音羽電機工業(株)
<http://www.otowadenki.co.jp/> [3.1]
2. 信号回路用アレスタ (避雷器) CN226 シリーズなど : 富士電機テクニカ(株)
<http://www.fe-technica.co.jp/> [3.1]
3. BNC コネクタ UG-89/U (40) : ヒロセ電機(株)
<http://www.hirose.com/> [3.1]
4. 同軸ケーブル RG58A/U : (株)フジクラ
<http://www.fujikura.co.jp/> [3.1]
5. 直流標準電圧電流発生器 3K02 : NECAvio 赤外線テクノロジー
<http://www.nec-avio.co.jp/> [3.1]
6. デジタルマルチメータ PC510 : 三和電気計器(株)
<http://www.sanwa-meter.co.jp/> [3.1]
7. エタノール (99.5, 500ml) : 和光純薬工業(株)
<http://www.wako-chem.co.jp/> [3.1]
8. ハンドオーガー : 大起理化工業(株)
<http://www.daiki.co.jp/> [3.5, 3.6]
9. キムワイプ ワイパー-S-200 , 12×21.5cm , 200 枚 / 箱 : 日本製紙クレシア(株)
<http://www.crecia.co.jp/> [3.1]
10. ビニール粘着テープ 0.2mm×19mm×10m : 日東電工(株)
<http://www.nitto.com/> [3.1, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6]
11. 精密抵抗 RNS1/8YCT52A1001B 金属皮膜抵抗 , 精度 0.1% , 抵抗 1kΩを推奨 : コーア(株)
<http://www.koaproducts.com/> [3.1]
12. スリット入り 2 重プラスチックチューブ : PMA AG, Switzerland
<http://www.pma.ch/> [3.5]
13. パナフレキエース : パナソニック(株)
<http://panasonic.net/> [3.5]
14. 直流安定化電源 PS シリーズ : (株)ニッケテクノシステム
<http://www.nikketechno.jp/> [3.3]
15. 試料円筒 : 大起理化工業(株)
<http://www.daiki.co.jp/> [3.6]
16. シーラント バスコーク , 50g , 透明 : セメダイン(株)
<http://www.cemedine.co.jp/> [3.1, 3.5]
17. 自己融着テープ ハイボンテープ NO.2, 0.5mm×19mm×10m : 日立化成工業(株)
<http://www.hitachi-chem.co.jp/> [3.1, 3.3, 3.4]
18. シリカゲル 青色 , 中粒 , 500g : キシダ化学(株)
<http://www.kishida.co.jp/> [3.5]
19. スパイラルチューブ RPST-20 : 平河ヒューテック(株)
<http://www.hewtech.co.jp/> [3.5, 3.6]
20. Spiral wrap tubing : Waytek, Inc, US
<http://www.waytekwire.com/> [3.5, 3.6]
21. 洗浄瓶 丸型洗浄瓶 : (株)サンプラテック
<http://www.sanplatec.co.jp/> [3.4]
22. リピータイ (耐候性) 7.4mm×250mm , φ2.5 ~ 72mm : ヘラマンタイトン(株)
<http://www.hellermannntyton.co.jp/> [3.3]

引用文献

- ADC (2003) OP-2 Open-path CO₂/H₂O Analyser Instruction Manual, ADC BioScientific Ltd., 25pp.
- アドバネット (1996) 炭酸ガス・水蒸気変動計 E009B 取扱説明書, 第 1 版, 13pp.
- Albrecht B., Poellot M. and Cox S. K. (1974) Pyrgeometer measurements from aircraft, *Review of Scientific Instruments*, 45:33-38.
- Amiro, B. (2010) Estimating annual carbon dioxide eddy fluxes using open-path analysers for cold forest sites, *Agricultural and Forest Meteorology*, 150:1366-1372.
- AsiaFlux 運営委員会編 (2003) 陸域生態系における二酸化炭素等のフラックス観測の実際, CGER-M015-2003, 116pp, 国立環境研究所地球環境研究センター.
- Aubinet M., Berbigier, P., Bernhofer, Ch., Cescatti, A., Feigenwinter, C., Granier, A., Grünwald, Th., Havrankova, K., Heinesch, B., Longdoz, B., Marcolla, B., Montagnani, L. and Sedlak P., (2005) Comparing CO₂ storage and advection conditions at night at different CARBOEUROFLUX sites, *Boundary-Layer Meteorology*, 116:63-94.
- Aubinet M., Grelle A., Ibrom A., Rannik U., Moncrieff J., Foken T., Kowalski A. S., Martin P. H., Berbigier P., Bernhofer C., Clement R., Elbers J. A., Granier A., Grünwald T., Morgenstern K., Pilegaard K., Rebmann C., Snijders W., Valentini R. and Vesala T. (2000) Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology, *Advances in Ecological Research*, 30:113-175.
- Aubinet M., Heinesch B. and Yernaux M. (2003) Horizontal and vertical advection in a sloping forest, *Boundary-Layer Meteorology*, 108:397-417.
- Baldocchi D., Falge E., Gu L., Olson R., Hollinger D., Running S., Anthoni P., Bernhofer Ch., Davis K., Evans R., Fuentes J., Goldstein A., Katul G., Law B., Lee X., Malhi Y., Meyers T., Munger W., Oechel W., Paw K. T., Pilegaard K., Schmid H. P., Valentini R., Verma S., Vesala T., Wilson K. and Wofsy S. (2001) FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82:2415-2434.
- Baldocchi D., Finnigan J., Wilson K., Paw U K. T. and Falge E (2000) On measuring net ecosystem carbon exchange over tall vegetation on complex terrain, *Boundary-Layer Meteorology*, 96:257-291.
- Baldocchi D., Valentini R., Running S., Oechel W. and Dahlman R. (1996) Strategies for measuring and modelling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems, *Global Change Biology*, 2(3):15-168.
- Burba, G. G., Anderson, D. J., Xu, L. and McDermitt, D. K. (2005) Solving the off-season uptake problem: correcting fluxes measured with the LI-7500 for the effects of instrument surface heating. Progress report of an ongoing study. PART 1: THEORY, Poster presentation, AmeriFlux 2005 Annual Meeting, Boulder, Colorado.
- Burba G. G., McDermitt D. K., Grelle A., Anderson D. J. and Xu L. (2008) Addressing the influence of instrument surface heat exchange on the measurements of CO₂ flux from open-path gas analyzers, *Global Change Biology*, 14:1-23.
- Businger J. A. and Oncley S. P. (1990) Flux measurement with conditional sampling, *Journal of Atmospheric and*

- Oceanic Technology, 7:349-352.
- Campbell Scientific, Inc. (2006) Open Path Eddy Covariance System Operator's Manual CSAT3, LI-7500, and KH20, Campbell Scientific, Inc.
- Christen A., van Gorsel E., Vogt, R., Andretta M. and Rotach M. W. (2001) Ultrasonic anemometer instrumentation at steep slopes: Wind tunnel study - field Intercomparison - measurement, MAP Newsletter, 15:164-167. (http://pages.unibas.ch/geo/mcr/Crew/AC/pdfs/christen_map.pdf)
- Clement, R., Burba, G., Grelle, A., Anderson, D. and Moncrieff, J. (2009) Improved trace gas flux estimation through IRGA sampling optimization, *Agricultural and Forest Meteorology*, 149 (3-4):623-638.
- Finnigan J. (2006) The storage term in eddy flux calculations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 136:108-113.
- Fluxnet CANADA (ed.) (2003) Fluxnet-Canada Measurement Protocols Working Draft Version 1.3, 109pp, Fluxnet-Canada Network Management Office.
- Giasson, M.-A., Coursolle, C. and Margolis, H. A. (2006) Ecosystem-level CO₂ fluxes from a boreal cutover in eastern Canada before and after scarification, *Agricultural and Forest Meteorology*, 140:23-40.
- Grelle A. and Lindroth A. (1996) Eddy-correlation system for long-term monitoring of fluxes of heat, water and CO₂, *Global Change Biology*, 2:297-308.
- Grelle, A. and Burba, G.G. (2007) Fine-wire thermometer to correct CO₂ fluxes by open-path analyzers for artificial density fluctuations, *Agricultural and Forest Meteorology*, 147(1-2): 48-57.
- Griffith D. W. T. (1982) Calculation of carrier gas effects in non-dispersive infrared analyzer. I. Theory, *Tellus*, 34:376-384.
- Griffith D. W. T., Keeling C. D., Adams J. A., Guenther P. R. and Bacastow R. B. (1982) Calculation of carrier gas effects in non-dispersive infrared analyzer. II. Comparisons with experiments, *Tellus*, 34:385-397.
- 郡司孝, 松岡延浩, 木村玲二, 今久 (2008) 細線熱電対と超音波風速温度計を用いた潜熱フラックス推定の試み, 農業気象学会 2008 年度全国大会講演要旨, 56.
- 花房龍男, 青島武, 渡来靖 (2005) 超音波風速温度計と熱電対温度計による潜熱輸送量の簡単な評価方法, 筑波大学陸域環境センター報告, 6:11-15.
- Hanafusa T., Fujitani T., Kobori Y. and Mitsuta Y. (1982) A new type sonic anemometer-thermometer for field operation, *Papers in Meteorology and Geophysics*, 33:1-19.
- Harazono, Y., Miyata, A., Ota, N. and Oechel, W. C. (2000) Greenhouse gas flux at Arctic tundra ecosystem in winter and thawing period, *Proceedings of 24th Conference on Agricultural and Forest Meteorology*, 193-194.
- Haslwanter, A., Hammerle, A., Wohlfahrt, G. (2009) Open-path vs. closed-path eddy covariance measurements of the net ecosystem carbon dioxide and water vapour exchange: A long-term perspective, *Agricultural and Forest Meteorology*, 149:291-302.
- 林真紀夫 (1988) 湿度の測定 *In* 農業気象の測器と測定法. 日本農業気象学会関東支部 (ed.), 農業技術協会, 51-81.
- Heusinkveld B. G., Jacobs A. F. G., and Holtslag A. A. M. (2008) Effect of open-path gas analyzer wetness on eddy covariance flux measurements: A proposed solution, *Agricultural and Forest Meteorology*, 148:1563-1573.

- Hignett P. (1992) Corrections to temperature measurements with a sonic anemometer, *Boundary-Layer Meteorology*, 61:175-187.
- 平野高司, 三枝信子 (2003) 3. 渦相関法によるフラックス測定の実際, *In* 陸域生態系における二酸化炭素フラックス観測の実際, AsiaFlux 運営委員会編, 9-24.
- Hirata, R., Hirano, T., Mogami, J., Fujinuma, Y., Inukai, K., Saigusa, N. and Yamamoto, S. (2005) CO₂ flux measured by an open-path system over a larch forest during snow covered season, *Phyton*, 45: 347-351.
- 廣瀬保雄, 柴田誠司 (2000) 円錐空洞黒体を用いた PIR 長波長放射計の校正 第一報: 理論的考察, *高層気象台彙報*, 60, 25-34.
- Horst T. W. and Oncley S. P. (2006) Corrections to inertial-range power spectra measured by CSAT3 and Solent sonic anemometers, 1. Path-averaging errors, *Boundary-Layer Meteorology*, 119:375-395.
- 石田祐宣, 松島大, 樋口篤志, 檜山哲哉, 戸田求, 浅沼順, 玉川一郎, 宮崎真, 田中賢治, 杉田倫明, 永井秀幸, 田中久則, 飯田真一, 小林菜花子 (2004) 2001 年筑波大学陸域環境研究センター(TERC)における乱流計測機集中観測: 機器比較と校正による誤差の解析, *水文・水資源学会誌*, 17:43-60.
- 伊藤芳樹, 林泰一, 玉川一郎 (2001) 超音波風速温度計 TR-61A(120°交差)型プローブ特性試験, 「熱・水収支の高精度評価に関する研究」平成 12 年度報告書, 1-9.
- Kaimal J.C. and Finnigan J.J. (1994) *Atmospheric boundary layer flows*, Oxford Univ. Press, 289pp.
- Kaimal J.C., Gaynor J. E., Zimmerman H. A. and Zimmermann G. A. (1990) Minimizing flow distortion errors in a sonic anemometer, *Boundary-Layer Meteorology*, 53:103-115.
- Kainal J.C. and Gaynor J. E. (1991) Another look at sonic thermometry, *Boundary-Layer Meteorology*, 56:401-410.
- Karl, T. G., C. Spirig, J. Rinne, C. Stroud, P. Prevost, J. Greenberg, R. Fall, and A. Guenther (2002) Virtual disjunct eddy covariance measurements of organic compound fluxes from a subalpine forest using proton transfer reaction mass spectrometry, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2:279-291.
- Kelliher, F. M., Leuning, R., Raupach, M. R., and Schulze, E. D. (1995) Maximum conductances for evaporation from global vegetation types, *Agricultural and Forest Meteorology* 73, 1-16.
- Kohsiek W. (2000) Water vapor cross-sensitivity of open path H₂O/CO₂ sensors, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17:299-311.
- 国立天文台編 (2005) 理科年表 2006, 1015pp, 丸善, 東京
- Komori D., Aoki M., Ishida T., Suzuki S., Satou T. and Kim W. (2004) Development of an air Sampling system for true eddy accumulation technique, *Journal of Agricultural Meteorology*, 60(4):263-272.
- Kondo J. and Sato T. (1982) The determination of the von Karman constant, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 60:461-471.
- Kormann R. and Meixener F. X. (2001) An analytical footprint model for non-neutral stratification, *Boundary-Layer Meteorology*, 99:207-224.
- Kristensen L. and Fitzjarrald D. R. (1984) The effect of line averaging on scalar flux measurements with a sonic anemometer near the surface, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1:138-146.
- Laubach J., Raschedorfer M., Kreilein H. and Gravenhorst G. (1994) Determination of heat and water vapour fluxes above a spruce forest by eddy correlation, *Agricultural and Forest Meteorology*, 71:373-401.

- Lee X. (1998) On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation, *Agricultural and Forest Meteorology* 91:39-49.
- Lee X. and Massman, W. J. (2011) A perspective on thirty years of the Webb, Pearman and Leuning density corrections, *Boundary-Layer Meteorology*, 139:37-59.
- Lee X., Massman W. J. and Law B. E. (ed.) (2004) *Handbook of Micrometeorology. A Guide for Surface Flux Measurements and Analysis*, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Leuning R., and Judd M. J. (1996) The relative merits of open- and closed-path analyzers for measurement of eddy fluxes, *Global Change Biology*, 2:241-253.
- Leuning R. and King K. M. (1992) Comparison of eddy-covariance measurements of CO₂ fluxes by open- and closed-path CO₂ analysers, *Boundary-Layer Meteorology*, 59:297-311.
- 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.
- Leuning R., Zegelin S. J., Jones K., Keith H. and Hughes D. (2008) Measurement of horizontal and vertical advection of CO₂ within a forest canopy, *Agricultural Forest Meteorology*, 148(11):1777-1797.
- LI-COR (2002) LI-7500 and direct solar radiation. LI-7500 Field Note #1, Publication Number: 75H102, LI-COR Inc.
- LI-COR (2003) Using CO₂ and H₂O Scrubbers with LI-COR Gas Analyzers. Publication Number: IRG4-101. LI-COR Inc.
- LI-COR (2004) LI-7500 CO₂/H₂O Analyzer Instruction Manual. LI-COR Inc.
- LI-COR (2011a) LI-7500A Open Path CO₂/H₂O Analyzer Instruction Manual. LI-COR Inc.
- LI-COR (2011b) Transitioning from an LI-7500 to an LI-7500A or LI-7200: A comparison, Technical Note # 130, 1-7.
- Liu H., Peters G. and Foken T. (2001) New equations for sonic temperature variance and buoyancy heat flux with an omnidirectional sonic anemometer, *Boundary-Layer Meteorology*, 100:459-468.
- Massman W. J. (2000) A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems, *Agricultural Forest Meteorology*, 104:185-198.
- 松本真一 (2005) 太陽視赤緯と均時差計算に関する一考察, *日本建築学会東北支部研究報告集*, 68:85-96.
- 松岡諒, 林陽生 (2008) 超音波風速温度計と熱電対温度計により求めた潜熱フラックスの特徴, *関東の農業気象 E-Journal*, 5:11.
- Mauder M., Oncley S. P., Vogt R., Weidinger T., Ribeiro L., Bernhofer Ch., Foken T., Kohsiek W., De Bruin H. A. R. and Liu H. (2007) The energy balance experiment EBEX-2000. Part II: Intercomparison of eddy-covariance sensors and post-field data processing methods, *Boundary-Layer Meteorology*, 123:29-54.
- McCree K. J. (1972) Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data, *Agricultural Meteorology*, 10:443-453.
- Miyata A. and Mano M. (2002) Influence of subzero temperature on sensitivities of three open-path infrared gas analyzers, *Proceedings of the 2nd International Workshop on Advanced Flux Network and Flux Evaluation*, 3-4.

- Mkhabela, M.S., Amiro, B.D., Barr, A.G. Black, T.A., Hawthorne, I., Kidston, J., McCaughey, J.H., Orchansky, A.L., Nesic, Z., Sass, A., Shashkov, A. and Zha, T. (2009) Comparison of carbon dynamics and water use efficiency following fire and harvesting in Canadian boreal forests, *Agricultural and Forest Meteorology*, 149:783-794.
- 文字信貴 (2003) 乱れとフラックスの測定, 植物と微気象-群落大気の乱れとフラックス-, 大阪公立大学共同出版会 (OMUP) 85-124.
- Moore C. J. (1986) Frequency response corrections for eddy correlation systems, *Boundary-Layer Meteorology*, 37:17-35.
- 村山昌平 (2001) 第 II 編第 1 章第 2 節 2.二酸化炭素, 環境化学物質の最新計測技術, リアライズ社, 宮崎章監修, 130-151.
- Nakai, T., Iwata, H. and Harazono, Y. (2011) Importance of mixing ratio for a long-term CO₂ flux measurement with a closed-path system, *Tellus*, 63B:302-308.
- Nakai T., van der Molen M. K., Gash J. H. C. and Kodama Y. (2006) Correction of sonic anemometer angle of attack errors, *Agricultural and Forest Meteorology*, 136:19-30.
- 中澤高清 (1982) 大気中の二酸化炭素濃度の変動, 地球化学, 16, 63-77.
- 日本工業規格 規格番号 JIS Z 8806:2001 (2001) 湿度測定方法, 財団法人日本規格協会.
- 大河原望, 高野松美 (2008)長波放射観測の世界基準への移行, 高層気象台彙報, 68:37-41.
- 大久保晋治郎, 安立美奈子, 小野圭介, 本岡毅, 西村渉 (2009) AsiaFlux Workshop 2009 -Integrating Cross-scale Ecosystem Knowledge: Bridge and Barriers- の報告, 生物と気象, 9:D-2 .
- 大谷義一 (1999a) 気温, *In* 森林立地調査法 - 森の環境を測る -. 森林立地調査法編集委員会 (ed.), 284pp, 博友社, 132-136.
- 大谷義一 (1999b) 日射 (短波放射), *In* 森林立地調査法 - 森の環境を測る -. 森林立地調査法編集委員会 (ed.), 284pp, 博友社, 124-127.
- Ohtani Y., Mizoguchi Y., Watanabe T., Yasuda, Y., Okano M. (2001) Seasonal change of CO₂ flux above an evergreen needle leaf forest in temperate region, Fujiyoshida, Japan, *CGER Report*, CGER-M-011-2001:129-132.
- 大谷義一, 溝口康子, 安田幸生, 渡辺力 (2005) 微気象学的方法による夜間の森林生態系純生産量 - 群落内 CO₂ 濃度変動の連続測定結果を用いた評価の試み -, 農業環境工学関連 7 学会 2005 年合同大会講演要旨集, 88.
- 岡田啓嗣 (2002) フットプリント解析 *In* フラックス観測の最近の進歩, 日本農業気象学会フラックス観測・評価研究部会編, 22-26.
- 小野圭介, 平田竜一, 間野正美, 宮田明, 三枝信子, 井上吉雄 (2007) オープンパス型とクローズドパス型の渦相関法による CO₂ フラックスの系統的差異と密度変動補正の影響. *農業気象*, 63:139-155.
- Ono, K., Mano, M., Hirata, R. and Miyata, A. (2009) A validation study of the practical corrections for sensor heating at Open-path IRGA surfaces using computational fluid dynamics, *Proceedings of AsiaFlux Workshop 2009 -Integrating Cross-scale Ecosystem Knowledge: Bridge and Barriers-*, 92.
- 小野圭介, 宮田明, 齊藤誠, 原園芳信 (2003) Open-path IRGA の校正と機種間比較. 日本気象学会春季大会予稿集, 83:339.

- Ono K., Miyata A. and Yamada T. (2008) Apparent downward CO₂ flux observed with open-path eddy covariance over a non-vegetated surface, *Theoretical and Applied Climatology*, 92:195-208.
- Pearman G. I. (1977) Further studies of the comparability of baseline atmospheric carbon dioxide measurements, *Tellus* 29:171-181.
- Pearman G. I., Garratt J. R. (1975) Errors in atmospheric CO₂ concentration measurements arising from the use of reference gas mixtures different in composition to the sample air, *Tellus* 27:62-65.
- Rannik U., Aubinet M., Kurbanmuradov O., Sabelfeld K. K., Markkanen T. and Vesela T. (2000) Footprint analysis for the measurements over heterogeneous forest, *Boundary-Layer Meteorology*, 97:137-166.
- Rinne H. J. I., Delany A. C., Greenberg J. P. and Guenther A. B. (2000) A true eddy accumulation system for trace gas fluxes using disjunct eddy sampling method, *Journal of Geophysical Research*, 105:24791-24798.
- 斎藤琢, 玉川一郎, 小泉博 (2007) 急斜面におけるフラックス計測と熱収支 - 純放射量と吹き上げ角の補正の検討 -, *水文・水資源学会 2007 年度研究発表要旨集*, 118-119.
- Schmid H. P. (1997) Experimental design for flux measurements: matching scales of observations and fluxes, *Agricultural and Forest Meteorology*, 87(2-3):179-200.
- Schuepp P. H., Leclerc M. Y., MacPherson J. L. and Desjardins R. L. (1990) Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation, *Boundary-Layer Meteorology*, 50:355-373.
- Serrano-Ortiz P., Kowalski A. S., Domingo F., Ruiz B. and Alados-Arboleda L. (2008) Consequences of uncertainties in CO₂ density for estimating Net Ecosystem CO₂ Exchange by open-path eddy covariance, *Boundary-Layer Meteorology*, 126:209-218.
- Shimizu T., Suzuki M. and Shimizu A. (1999) Examination of a correction procedure for the flow attenuation in orthogonal sonic anemometers, *Boundary-Layer Meteorology*, 93:227-236.
- 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.
- Tsukamoto O. (1986) Dynamic response of the fine wire psychrometer for direct measurement of water vapor flux, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 3:453-461.
- van der Molen M. K., Gash J. H. C. and Elbers J. A. (2004) Sonic anemometer (co)sine response and flux measurement. II. The effect of introducing an angle of attack dependent calibration, *Agricultural and Forest Meteorology*, 122:95-109.
- van Dijk A., Kohsiek W. and de Bruin H. A. R. (2003) Oxygen sensitivity of Krypton and Lyman-alpha hygrometers, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20:143-151.
- Watanabe T., Yamanoi K. and Yasuda Y. (2000) Testing of the bandpass eddy covariance method for a long-term measurement of water vapour flux over a forest, *Boundary-Layer Meteorology*, 96:473-491.
- Webb E. K., Pearman G. I. and Leuning R. (1980) Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106:85-100.
- Wieser A., Fiedler F. and Corsmeier U. (2001) The influence of the sensor design on wind measurements with sonic anemometer systems, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18:1585-1608.
- Wyngaard J. C. and Zhang S-F. (1985) Transducer-shadow effects on turbulence spectra measured by sonic anemometers, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2:548-558.

- Xu L-K., Matista A. A. and Hsiao T. C. (1999) A technique for measuring CO₂ and water vapor profiles within and above plant canopies over short periods, *Agricultural and Forest Meteorology*, 94:1-12.
- Yang B., Hanson P. J., Riggs J. S., Pallardy S. G., Heuer M., Hosman K. P., Meyers T. P., Wullschlegel S. D. and Gu L. H. (2007) Biases of CO₂ storage in eddy flux measurements in a forest pertinent to vertical configurations of a profile system and CO₂ density averaging, *Journal of Geophysical Research*, 112(D20123).
- Yang P. C., Black T. A., Neumann H. H., Novak M. D. and Blanken P. D. (1999) Spatial and temporal variability of CO₂ concentration and flux in a boreal aspen forest, *Journal of Geophysical Research*, 104(D22):27653-27661.

シンボル一覧

A	アボガドロ数 ($6.023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)
$APAR$	植物キャノピーが吸収する放射量 [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$]
b	empirical coefficient in REA method
c_1	光速 ($2.9979 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$)
c_s	音速 [ms^{-1}]
c_t	本来の信号速度 [ms^{-1}]
C	セルシウス度, 摂氏 [$^{\circ}\text{C}$]
C_d	乾球温度 [$^{\circ}\text{C}$]
C_{dp}	露点温度 [$^{\circ}\text{C}$]
C_v	土壌の体積熱容量 [$\text{Jm}^{-3}\text{C}^{-1}$]
C_w	湿球温度 [$^{\circ}\text{C}$]
d	スパン長 [m]
dP	全圧と静圧との差(ベルヌーイの定理) [Pa]
$D_{2000.0}$	2000 年 1 月 1 日 0 時の磁気偏角(2000. 0 年値) [$^{\circ}$]
e	水蒸気圧 [Pa]
e_d	飽差 [Pa]
e_s	飽和水蒸気圧 [Pa]
ΔE	サーモパイルの出力電圧 [mV]
F_c	CO_2 フラックス [$\text{mgm}^{-2}\text{s}^{-1}$]
F_g	vertical flux of a trace gas [$\text{mgm}^{-2}\text{s}^{-1}$]
F_s	CO_2 storage change [$\text{mgm}^{-2}\text{s}^{-1}$]
F_E	PAR 波長域で積分した放射束密度 [Wm^{-2}]
F_{E_λ}	単波長 λ の放射束密度 [Wm^{-2}]
F_Q	PAR 波長域で積分した光量子束密度 [$\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$]
F_{Q_λ}	単波長 λ のモル光量子束密度 [$\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$]
h	プランク定数 ($6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$)
H	SAT で測定した顕熱フラックス [Wm^{-2}]
H_{body}	機器表面で生成された顕熱フラックス [Wm^{-2}]
H_{op}	オープンパスの測定パス内における顕熱フラックス [Wm^{-2}]
ΔH	SAT で測定した顕熱フラックスとオープンパスの測定パス内の顕熱フラックスの差: $H - H_{\text{op}}$ [Wm^{-2}]
J	1月1日からの積算日数(実数)たとえば 1 月 1 日 12:00 は $J = 0.5$
k	サーモパイルの感度 [$\text{mV}(\text{Wm}^{-2})^{-1}$]
k_d	ドーム係数
$L \uparrow$	上向き長波放射量 [Wm^{-2}]

$L \downarrow$	下向き長波放射量 [Wm^{-2}]
m_c	CO_2 分子量 [kgmol^{-1}]
m_d	乾燥空気の分子量 [kgmol^{-1}]
m_w	水蒸気の分子量 [kgmol^{-1}]
n	測定高度数
p	大気圧 [Pa]
p_c	CO_2 の分圧 [Pa]
$PAR \uparrow_{\text{above}}$	植物キャノピーより上で測定された反射 PAR [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$]
$PAR \uparrow_{\text{below}}$	キャノピー下端での反射 PAR [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$]
$PAR \downarrow_{\text{above}}$	植物キャノピーより上で測定された下向き PAR [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$]
$PAR \downarrow_{\text{below}}$	キャノピー下端での下向きの PAR [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$]
q	比湿 [kgkg^{-1}]
Q	地中熱流量 [Wm^{-2}]
Q_b	最下層土層の下面における地中熱流量 [Wm^{-2}]
R_0	0°C における抵抗値 [Ω]
R_{100}	100°C における抵抗値 [Ω]
R_d	ドームを通過する長波放射 [Wm^{-2}]
R_{net}	正味放射量 [Wm^{-2}]
$S \uparrow$	上向き短波放射量(反射日射量) [Wm^{-2}]
$S \downarrow$	下向き短波放射量(全天日射量) [Wm^{-2}]
t	時間 [s]
t_1, t_2	各々のセンサ間の信号伝播時間 [s]
t_a	南中時刻 [h]
Δt_f	フラックス平均化時間 [s]
t_s	標準時における時刻 [h]
T	絶対温度 [K]
T_1	水の三重点温度 (273.16 K)
T_a	気温 [K]
T_b	センサボディの温度 [K]
T_d	ドームの温度 [K]
T_s	地温 [K]
T_v	音仮温度 [K]
T_{vt}	本来の音仮温度 [K]
u	風速(ベルヌーイの定理) [ms^{-1}]
v_d	パスに平行な風速成分の速度 [ms^{-1}]
v_n	パス間を垂直に横切る風(横風)の速度 [ms^{-1}]
V_a	気相の体積 [m^3]
V_r	液相の体積 [m^3]

V_s	固相の体積 [m ³]
w	鉛直風速 [ms ⁻¹]
W_r	液相の質量 [g]
W_s	固相の質量 [g]
x	混合比 [kgkg ⁻¹]
x_s	飽和空気の混合比 [kgkg ⁻¹]
z	高度 [m]
z_d	各土層の厚さ [m]
z_f	フラックス測定高度 [m]
β	天頂角 [°]
γ	経度 [°]
γ_0	子午線 [°]
δ	太陽赤緯(日赤緯) [°]
ε	乾燥空気の分子量に対する水蒸気分子量の比
ζ_a	時角 [°]
ζ_s	太陽高度 [°]
η	飽和度 [m ³ m ⁻³]
θ	体積含水率 [m ³ m ⁻³]
θ_{sat}	飽和体積含水率 [m ³ m ⁻³]
Θ	含水比 [kgkg ⁻¹]
λ	波長 [m]
ρ	空気の密度(ベルヌーイの定理) [kgm ⁻³]
ρ_c	CO ₂ 密度[kgm ⁻³] [mgm ⁻³]
ρ_{cc}	CO ₂ 濃度 [μmolmol ⁻¹]
ρ_d	乾燥空気密度 [kgm ⁻³]
ρ_g	大気微量気体密度 [mgm ⁻³]
σ	Stefan-Boltzmann 定数 (5.67051×10 ⁻⁸ Wm ⁻² K ⁻⁴)
σ_w	w の標準偏差 [ms ⁻¹]
φ	緯度 [°]
Φ_a	絶対湿度[kgm ⁻³]
Φ_c	比較湿度(飽和度) [%]
Φ_p	相対湿度 [%]
X	ファーレンハイト度(華氏) [F]
Ψ	マトリックポテンシャル [Pa]
ω	2π/365 または 2π/366
Ω	均時差 [h]
$a, c_1, c_2, j,$ k_1, k_2, k_3, α	定数

索引

1~9

3D-SAT、3次元SAT	27, 29
4成分放射計	101, 102

あ

アース	12, 13, 14, 15, 88
一棒	14, 15
足場タワー	6, 7
圧力式水位計	139
圧力調整器	44, 73
アナログ	28, 32, 41, 63, 67, 84, 85, 88, 111
アボガドロ数	108
アルベド	98
アルベドメータ	98
アレスタ	14, 15
アンカー	6, 7
暗渠	138
安全確保器	7

イオン分子反応質量分析計、IMR-MS	82
溢水式転倒マス	135
印加電圧	85, 143, 144

ウインチ	7
浮子	63, 138, 139, 140
渦集積法	78
渦相関法	2, 18, 19, 26, 56, 61, 64, 68, 78, 79, 82
運搬用コンテナ	16
運搬用モノレール	3, 8

エアドライヤ → 除湿装置	
衛星画像データ	2
鉛直バス型 → 超音波風速温度計	27, 28, 34, 35

オープンバス、オープンバス型分析計、オープンバス型 CO ₂ 分析計	37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 54, 55, 56
紫外線吸収型—H ₂ O / CO ₂ 分析計	49
赤外線吸収型—H ₂ O / CO ₂ 分析計、—IRGA	48, 49

遅れ時間 (信号の)	38, 41, 42, 53
オシロスコープ	86
音板温度	26, 27, 28, 33, 34, 35, 50
オフセット	33, 42, 43, 45, 46, 47, 48, 54, 66, 96, 100, 111
音速	26, 34, 139
温度依存性	47, 100, 139

か

過塩素酸マグネシウム	44, 45, 59
化学発光法	82, 83
ガスクロマトグラフ質量分析器、GC-MS	81, 82
ガスクロマトグラフ水素炎イオン検出器、GC-FID	81, 82
ガスクロマトグラフ電子捕獲検出器、GC-ECD	81
加熱脱着装置	81
雷	12, 13, 15, 32
簡易渦集積法、REA 法	78, 79, 80, 81, 82, 83
灌漑水量	20, 138
乾球湿球温度計	120, 121
監視員	17
監視カメラ	17
監視制御 (電源の)	11
感電	11

感度	42, 43, 45, 46, 47, 48, 81, 82, 97, 99, 100, 110
相互—、cross-sensitivity	37, 49
—定数	102, 127
乾物重	20

基準温度接点	116
基礎打ち	7, 8
揮発性有機化合物、VOC	78, 79, 80, 81, 82
キャニスタ	80, 81
キャノピー	18, 19, 20, 21, 104, 110
キャリアガス → バランスガス	
吸引流量	57
記録間隔	41, 84, 85
記録メディア	84
記録レンジ	84
均時差	107
金属ステー	6
銀ろう溶接	117, 125

クライオフォーカス	81
クランプ	7, 17, 30
クローズドバス、クローズドバス型分析計、クローズドバス型 CO ₂ 分析計	37, 41, 42, 47, 48, 50, 51, 52, 53, 54, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 66, 68, 70, 71, 121

傾斜バス型 → 超音波風速温度計	
ケーブル保護管	10
減圧器 → レギュレータバルブ	
検出領域	139

高圧電線	10, 11
降雨量	134
恒温槽	141
航空写真	2
光合成有効光量子束密度、PPFD	103
光合成有効放射、—量、PAR	18, 19, 103, 104, 108, 144
高周波変動補正	68
降水量	19, 20, 134, 135
校正	40, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 53, 59, 66, 71, 81, 96, 98, 99, 100, 106, 110, 111, 118, 120, 121, 122, 133, 136, 137, 138, 140, 141, 142
—ガス、—用標準ガス	15, 37, 42, 43, 45, 46, 47, 59, 64, 66, 71, 72, 73, 75, 81
—係数	37, 42, 46, 49, 53, 67
自動—、—の自動化	37, 56, 59, 66
スパン—	46, 76
ゼロ—	46, 76
—頻度	43, 114
—用センサフード、—用フード	38, 42, 43, 44, 45, 47
降雪量	134, 135, 136
光速	108
高調波電流	86
高分子センサ湿度計	120, 121
コールドトラップ	81
国有林野新規使用許可	4
光量子計	103, 104
転がし配線	10
混合比	18, 37, 42, 43, 47, 54, 55, 68, 123

さ

サージ	12, 13, 14, 15, 87
サージ防護デバイス、SPD	13, 14
サーミスタ	42, 47, 50, 114, 115, 116, 125, 140

ー温度計.....114, 115, 125
 サーマバイル.....96, 99, 100, 101
 細線熱電対.....50
 最多風向.....113
 サイレンサ.....72, 74, 75
 作物残渣.....20
 サブサンプリング → サンプリング
 砂防指定地.....4, 5
 ー内行為許可.....5
 ーの解除.....5
 砂防法.....5
 三角堰.....141, 142
 三杯風速計.....111
 サンプリング.....48, 56,
 57, 58, 59, 61, 77, 78, 79, 80, 82, 83, 86, 121, 143
 ー間隔.....84
 サブ.....57, 64, 65
 サンプル空気.....56, 57,
 59, 60, 63, 62, 63, 64, 65, 67, 68, 71, 72, 73, 75, 76, 78, 79, 80, 121
 サンプルセル → 測定セル
 散乱日射 → 日射
 ー計.....98

 シース.....114, 115, 116, 117, 120
 シールド.....85, 86, 87, 98
 紫外線吸収型 → オープンパス
 時角.....107
 四角堰.....141
 自然攪乱.....2
 自然公園法.....4
 時定数.....114, 125
 自動校正 → 校正
 自動セーブ（データの）.....9, 11
 自動停止（システムの）.....11
 自動復帰（システムの）.....9, 11
 遮蔽板、遮蔽球.....98
 遮蔽バンド.....98
 充電用のバッテリー.....11, 12
 瞬停.....86, 87
 正味放射、ー量.....18, 19, 101, 102, 103
 商用電源.....3, 9, 10
 植生高.....2, 3, 6, 16, 40
 植生分布図.....2
 除湿装置、エアドライヤ.....56, 57, 63, 73
 除湿用乾燥空気.....72
 シリコンドーム、シリコンウィンドウ.....99
 人為攪乱.....2
 信号線.....12, 13, 14, 42, 86, 87, 88, 98
 森林施業管理図.....2

 水位.....20, 138, 139, 140, 141, 142
 ー計.....138, 139, 140, 141, 142
 ー流量曲線.....142
 水温.....20, 138, 140
 水蒸気補正.....26, 35
 スwitching電源.....85, 87
 水田.....16, 138, 139, 140
 水道メータ.....141, 142
 水文条件.....2
 ステータ.....6, 7, 8
 スノーサンプラー.....137
 スパングス.....45, 46, 59, 66, 72
 スパン校正 → 校正
 スパン長.....26, 28, 33
 スペクトルアナライザ.....86

静電容量.....130, 139, 140
 ー式水位計.....139, 142
 ー法.....130
 精密抵抗.....105
 セーフティボックス / ステージ.....7
 ゼーベック効果.....116
 世界気象機関、WMO.....98, 110, 117
 世界準器.....98, 103
 世界放射基準、WRR.....103
 ーセンター、世界放射センター.....96, 98
 赤外線吸収型 → オープンパス
 赤外線.....37, 43, 48, 49, 58, 121
 ー式湿度計.....120, 121
 赤外放射.....99
 ー計.....99, 100
 積雪.....7, 20, 106, 110, 120, 134, 135, 136, 137
 ー重量.....134, 137
 ー水量.....137
 ー調査.....137
 絶縁抵抗.....86, 87
 絶対日射計.....96
 接地.....85
 ー境界層.....110, 117
 ー抵抗.....12, 13, 14
 ゼロガス.....43, 44, 46, 59, 66
 ゼロ校正 → 校正
 センサ間距離.....39, 40, 41, 52
 全天日射、全天日射量.....96, 98, 103
 ー計.....96, 98
 全方位型（傾斜パス型 3D-SAT の）.....27, 28, 29, 30

 相互感度 → 感度
 ソーダライム.....44, 45, 59
 ソーラーパネル.....10, 11, 12
 測定セル、サンプルセル.....42, 56, 58, 66, 67, 71, 72, 73, 74
 測定レンジ.....84, 85, 139, 144
 ソフトイオン化法質量分析計.....82
 損料.....4, 17

た

ダイアフラム.....60, 61, 139
 ーポンプ.....60, 61
 大気圧補正.....139
 大気捕集管.....80, 81
 太陽高度.....12, 107
 太陽赤緯.....107
 太陽追尾装置.....97,
 太陽放射.....96
 耐雷トランス.....13, 87
 卓越風.....2, 30
 単管パイプ.....7
 炭素含有率.....20
 短波.....18, 103
 ー放射、ー放射量.....18, 19, 96, 103
 ー放射量計.....101

 地形図.....2
 地権者.....4, 17
 地上検証作業.....18
 チャージコントローラ.....11
 チャンネル.....67, 143
 中性子透過率.....133
 チューブ.....15, 44,
 45, 52, 56, 57, 58, 61, 62, 63, 64, 65, 67, 68, 72, 73, 121, 127
 チューブコネクタ、チューブ継ぎ手.....62, 63, 67
 超音波風速温度計、SAT、超音波式風速計、超音波風速計.....26,

27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 38, 39, 40, 41, 49, 50, 51, 52, 54, 56, 78, 79, 80, 83, 109, 111, 112, 114	
鉛直バス型—	27, 28, 29, 34, 35
傾斜バス型—	27, 28, 29, 33, 34, 35
長波	18, 103, 126
—放射、—放射量	18, 19, 99, 100, 101, 103
張力測定	8
直達日射 → 日射	
—計	97
直流標準電圧発生器	100
貯留型雨量計	134, 135
墜落防止装置	7
通風筒	114, 116, 117, 118, 121
ディープサイクルタイプ	11, 12
データロガー、ロガー	15, 16, 32, 59, 64, 65, 76, 79, 84, 85, 88, 103, 105, 114, 115, 116, 125, 127, 135, 143, 144
デジタル	28, 32, 41, 63, 64, 67, 84, 85, 88, 111, 143
デジタル I/O ポート	83, 103
デジタルマルチメータ、テスタ	86, 98
デットバンド	79
テドラーバッグ	79, 80
電圧低下	86
電圧変動	87
電気容量	9
電源容量	3, 10
電源ライン	86
電磁波	86, 87, 96, 130
電磁弁	59, 60, 64, 65, 67, 70, 72, 73, 75, 76, 79, 80, 83
テンションメータ	8
天頂角	107
転倒マス型雨量計	134, 135
同軸ケーブル	105
特別地域・特別保護地域（国立公園および国定公園内の）	4
土地改良区	4
土地利用図	2
トランスデューサ、transducer	26
—シャドウ、transducer shadow	28, 34
な	
南中時刻	107
日赤緯	107
日射、—量	11, 19, 51, 54, 96, 98, 99, 100, 101, 103, 117, 125, 126, 128, 139
散乱—	96, 98
直達—	41, 53, 96, 97
—計	96, 97, 98, 99, 102, 103, 144
熱源問題	41, 50, 51, 52, 54, 55
熱線式風速計	110
熱電堆 → サーマパイル	
熱電対	47, 48, 49, 50, 51, 114, 115, 116, 117, 125, 140
熱電対温度計	114, 116, 126
ノイズ	3, 10, 14, 32, 41, 60, 85, 86, 87, 88, 98, 100, 114, 116, 135
—カットトランス	87, 88
は	
パーシャルフリューム	141, 142
パーソナルコンピュータ、パソコン、PC	15, 42, 44, 45, 46, 53, 59, 64, 79, 84, 85, 103, 143, 144
排水量	138, 141, 142
バイナリ形式	85
破壊的攪乱（土壌や植生の）	3

梯子タワー	6, 7
バス	26, 27, 28, 32, 33, 34, 35, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 46, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 139, 144
波長可変ダイオードレーザ分光計、TDLS	82
白金測温抵抗体温度計	114, 115
白金抵抗体	125, 126
バックアップ電源	9
発電機	10
バランスガス、キャリアガス、ベースガス	43, 66
バリスタ	14
微気象学的手法	2
ビトー管	111, 112
標準ガス → 校正	
表面温度計	126
避雷器	12, 13, 98
避雷針	12, 13, 14
避雷対策	12, 14
風向	19, 30, 31, 38, 39, 41, 109, 111, 112, 113, 117
—計	109, 110
風車型風速計	109, 110
風速	8, 18, 19, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 39, 40, 50, 51, 52, 53, 55, 56, 70, 78, 79, 83, 84, 109, 110, 111, 112, 113, 136
—計	79, 85, 109, 110, 111, 112, 113
風洞	34, 110, 111, 112
風杯	109
—式風速計	109, 110
ブーム型（傾斜バス型 3D-SAT の）	27, 28, 29
フェンス	17
フットプリント	3
—解析	6
不飽和拡散係数	130
フラグメンテーション	82
フラックス損失補正	41
フラックスの損失量（高周波域の）	40, 53
ブランク定数	108
プレヒート	144
プローブ	27, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 130
プログラマブルリレー、プログラムリレー	64, 80
分解能	79, 84, 85, 86, 98, 110, 139, 144
分画乱流変動法、DEC 法	82
瞬間風速	113
分光放射計	18, 103
平均値観測	18
平均風向	113
平均風速	109, 113
ベースガス → バランスガス	
ベルヌーイの定理	111, 112
保安林	4, 5
—解除	5
—内作業許可	5
放射、放射量	9, 18, 19, 48, 49, 51, 52, 81, 96, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 106, 108, 114, 116, 117, 120, 126, 144
—温度計	114, 117, 126,
—収支計	101, 102, 103
—束密度	108
圃場	4, 8, 9, 17, 138, 139, 142
—整備	138
補償導線	116, 125
補足率	
ポンプ	52, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 67, 68, 70, 71, 72, 73, 75, 76, 77, 79, 80, 82, 86

- ま**
- マスフローコントローラ 56, 57, 60, 63, 72, 74, 79, 83
- 無停電電源装置、UPS 13, 87, 88
- 木道 16, 17
- 物置小屋 16
- モル光量子束密度 108
- や**
- 有機質資材 20
- 誘電率 130, 131, 133
- 誘導雷 12, 98
- 陽子移動反応質量分析計、PTR-MS 82
- 用水計画 138
- 横風補正 26, 27, 34, 35
- ら**
- 乱流変動法 2, 26, 32, 82, 84, 143
- リファレンスセル 58, 59, 72
- リモートセンシング 18, 103, 104
- 流量計 44, 57, 63, 141
- 流量制御 52, 56, 57, 61, 63, 72, 141
- 量水堰 138, 141, 142
- リレー 64, 65, 83, 143
- 冷却濃縮 81
- 冷接点 116, 125
- 冷接点回路 125
- レギュレータバルブ、減圧器 73,
- ローパスフィルタ 41, 87
- ロガー → データロガー
- 露点湿度計 120
- 露点発生器 44, 46, 66
- A ~ W**
- A/D 分解能 84
- AC 電源 11, 86
- Automatic gain control、AGC 41, 45
- BNC コネクタ 105
- CO₂ 貯留変化量 19, 70, 71, 77
- CO₂ 濃度測定 43, 56, 66, 67, 68, 70, 71
- CO₂ 濃度変動の減衰 65, 68
- CO₂ 濃度プロファイル測定システム 76
- CO₂ 濃度分布 70, 71
- CO₂ 分子 37, 48, 55
- CO₂ 密度 18, 37, 42, 47, 54, 64, 70
- cross-sensitivity → 感度
- CSV 形式 84, 85
- DEC 法 → 分画乱流変動法
- Flow distortion 28, 30, 34
- GC-ECD → ガスクロマトグラフ電子捕獲検出器
- GC-FID → ガスクロマトグラフ水素炎イオン検出器
- GC-MS → ガスクロマトグラフ質量分析器
- IMR-MS → イオン分子反応質量分析計
- ISO1 級 96
- ISO2 級 96
- ISO 二次準器 96
- Krypton 湿度計 49
- LI-6262 51, 56, 57, 58, 59, 67
- LI-7000 57, 58, 59, 67
- Line averaging effect → Path averaging effect
- Lyman-alpha 湿度計 49
- PAR → 光合成有効放射
- Path averaging effect、Line averaging effect 33
- PPFD → 光合成有効光量子束密度
- PTFE 製チューブ 62
- PTFE メンブレンフィルタ 58
- PTR-MS → 陽子移動反応質量分析計
- REA 法 → 簡易渦集積法
- RS-232C 32, 38, 41, 67, 85, 143
- RS-422 85
- SAT → 超音波風速温度計
- SDI 85
- SDM 32, 38, 41, 42
- SPD → サージ保護デバイス
- Stefan-Boltzmann の法則 96
- TDLS → 波長可変ダイオードレーザ分光計
- Transducer → トランスデューサ
- Transducer shadow → トランスデューサ
- UPS → 無停電電源装置
- VOC → 揮発性有機化合物
- Wick 33
- WMO → 世界気象機関
- WRR → 世界放射基準

執筆者

1.1 観測サイトの選定	中井裕一郎 (森林総合研究所)
	宮田明 (農業環境技術研究所)
1.2 インフラの整備	
1.2.1 土地利用の許可取得等	小南裕志 (森林総合研究所)
	宮田明 (農業環境技術研究所)
1.2.2 タワー建設とメンテナンス	清水貴範 (森林総合研究所)
	宮田明 (農業環境技術研究所)
1.2.3 電源	小南裕志・中井裕一郎 (森林総合研究所)
1.2.4 避雷対策	山野井克己 (森林総合研究所)
1.2.5 観測小屋	中井裕一郎 (森林総合研究所)
1.2.6 その他	中井裕一郎 (森林総合研究所)
	宮田明 (農業環境技術研究所)
1.3 観測項目の選定	中井裕一郎 (森林総合研究所)
	宮田明 (農業環境技術研究所)
2.1 超音波風速温度計	清水貴範 (森林総合研究所)
2.2 オープンパス型 CO ₂ / H ₂ O 分析計	間野正美 (農業環境技術研究所)
2.3 クローズドパス型 CO ₂ 分析計	安田幸生 (森林総合研究所)
2.4 貯留変化量	北村兼三 (森林総合研究所)
2.5 簡易渦集積法	深山貴文 (森林総合研究所)
2.6 データロガー	高梨聡 (森林総合研究所)
2.7 ノイズのチェックと対策	山野井克己 (森林総合研究所)
3.1 放射	溝口康子 (森林総合研究所)
Appendix 3.1-1	溝口康子・大谷義一 (森林総合研究所)
Appendix 3.1-2	溝口康子 (森林総合研究所)
3.2 風向・風速	高梨 聡 (森林総合研究所)
3.3 気温	深山貴文 (森林総合研究所)
3.4 湿度	深山貴文 (森林総合研究所)
3.5 地温・地中熱流量	玉井幸治 (森林総合研究所)
3.6 土壌水分	玉井幸治 (森林総合研究所)
3.7 降水量 (降雨・降雪), 積雪調査 (積雪深・積雪重量)	小南裕志 (森林総合研究所)
3.8 水位, 水温, 灌漑, 排水量	小野圭介 (農業環境技術研究所)
3.9 データロガー	溝口康子・高梨聡 (森林総合研究所)

本文および表紙に使用した写真と画像は、以下の研究者およびセンサ機器の製造・販売各社より提供を受けました。

Photo 1.2-3	清水晃（森林総合研究所）
Fig. 2.3-1	大谷義一（森林総合研究所）
Photo 2.4-1, 2.4-2 right, 3.5-7	溝口康子（森林総合研究所）
Photo 2.4-2 left, 3.1-4.....	油田さと子（森林総合研究所）
Photo 2.4-3	高橋善幸（国立環境研究所）
Photo 3.1-1 left, 3.1-2, 3.1-3 right, 3.1-5 right, 3.1-6 right, 3.5-6.....	英弘精機株式会社
Photo 3.1-1 right, 3.1-3 left, 3.1-5 left, 3.1-6 left	オランダ Kipp & Zonen B.V.
Photo 3.5-1, 3.5-2	クリマテック株式会社
Photo 3.5-3	株式会社チノー
Photo 3.5-5	株式会社プリード
Fig. 3.6-1	米国 CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.
Photo 3.6-1	米国 Decagon Devices, Inc.
Photo 3.6-2	大起理化工業株式会社
Photo 3.6-3	飯田真一（森林総合研究所）
Photo 3.8-3	株式会社セネコム
表紙.....	大谷義一（森林総合研究所）
裏表紙.....	溝口康子（森林総合研究所）

本文中の製品名は各社の登録商標または商標です。

