

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践」（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依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

