

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

(2) 可搬型移動観測システムによるサイト間比較観測

独立行政法人森林総合研究所	
北海道支所寒地環境保全研究グループ	山野井克己・溝口康子
東北支所森林環境研究グループ	安田幸生
気象環境研究領域長	大谷義一
気象環境研究領域気象研究室	中井裕一郎・北村兼三・高梨聡
関西支所森林環境研究グループ	小南裕志・深山貴文
九州支所山地防災研究グループ	萩野裕章
独立行政法人農業環境技術研究所	
大気環境研究領域	宮田明・間野正美・小野圭介
独立行政法人産業技術総合研究所	
環境管理技術研究部門研究副部門長	近藤裕昭
環境管理技術研究部門大気環境評価研究グループ	村山昌平・前田高尚・石戸谷重之
独立行政法人国立環境研究所	
地球環境研究センター陸域モニタリング推進室	三枝信子・高橋善幸
平成19～23年度合計予算額	151,696千円（全課題分）
（うち、平成23年度当初予算額	30,118千円（全課題分）

[要旨] フラックス観測のネットワークを生かした研究の可能性を最大限に活用するためには、サイト間の観測データの互換性を確保していく必要がある。一方で、あらゆる観測サイトに最適な一つの観測方法やシステムは存在し得えず、サイト毎に最適化された様々な観測手法が実際には用いられている。このようなタワーフラックス観測フラックスデータの精度向上とアジア地域でのデータ流通の促進と共有を図るため、可搬型の渦相関法 CO<sub>2</sub> フラックス観測システム（ポータブルフラックスシステム）を様々な森林4カ所及び水田1ヶ所の観測サイト計5カ所に持ち込んで延べ6回のフラックス観測を行い、各サイトの経常観測によるCO<sub>2</sub>フラックス速報値と比較した。このポータブルフラックスシステムはクローズドパス式の赤外線ガス分析計、超音波風速計、データロガーなどの機器から構成されるものである。はじめてフラックス観測に携わる学生、研究者、技術者でも取り扱いができるように工夫したポータブルフラックス観測システム使用マニュアルも作成し、印刷物と共にホームページ上でも公開した。

比較観測の結果から、4サイトの経常観測システムで測定されたCO<sub>2</sub>フラックスを妥当と判断した。それらはポータブルフラックスシステムの30分平均フラックス観測値に対して、誤差の二乗平均平方根が2.6 μmolm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>以下、相対誤差が23.4%以下であった。この誤差範囲は既往のフラックス観測精度評価として報告されているランダム誤差の範囲に含まれるものであった。また、比較観測データの比較解析によって、経常観測における問題点を指摘するとともにその改善策を提起した。

[キーワード] 陸域生態系、CO<sub>2</sub>フラックス、ポータブルフラックスシステム、比較観測、精度向上、データ共有

## 1. はじめに

国や大陸から全世界に至る各地域スケールにある多くのフラックス観測サイトが連携してネットワーク（例えば、日本国内では JapanFlux、アジア地域では AsiaFlux、全世界では FluxNet）が形成されている。このようなフラックスネットワークでは、多数の観測サイトのデータを同時に扱って、サイト間のフラックス比較、国や大流域・大陸スケールでの気候変動に対する陸域生態系の炭素収支等の応答特性、あるいは、モデルによる広域推定の検証などの研究が盛んに行われている。このような研究を推進するためには、サイト間で観測システムやフラックス算定方法などに起因する誤差を小さくすることが必要である。そのため、多くのサイトにおいて観測システムや解析方法についてより安定で精度の高い合理的な手法に改良する等の標準化が進められている。それと同時に、標準的な観測システムを各地のサイトで運用して、CO<sub>2</sub>や熱・エネルギーフラックスなどについてサイト独自の通常観測との比較観測を行い、サイト間のデータ互換性検証を進めている。たとえば、AmeriFlux では、標準的観測システムとして、AmeriFlux Portable System を用いて各地で比較観測が行われている。

日本では、2001年8月にアジアフラックス観測サイトとして初めての国際比較観測が、AmeriFlux のスタッフが来日して苫小牧（アジアフラックスサイトコード：TMK）と札幌（同じく：SAP）で実施され、良好な互換性を確認した<sup>1)</sup>。その後、アジアにおいてもデータの蓄積が各地のサイトで進むと同時に多数の新たな観測サイトの構築・整備が進行し、2010年4月現在のAsiaFlux登録観測サイト数は70以上に達している。これらアジア域の観測サイト群におけるデータ互換性を比較検証するため、我が国においても比較観測用の標準観測システムを各地のサイトに持ち込んで通常観測と隣接して比較観測を行ない、サイト間の連携強化を図ることが必要である。このために、森林総研を主体としたグループでは、持ち運びやセットアップが容易な可搬型フラックス観測システム（ポータブルフラックスシステム）を開発した<sup>2)</sup>。本報では、このシステムを5カ所のフラックス観測サイトに延べ6回設置して、それぞれ約1~3週間の観測を経常観測に隣接して実施し、各サイト経常観測のCO<sub>2</sub>フラックス速報値等と比較した。

ここで用いられたポータブルフラックス観測システムは、文部科学省科学技術振興調整費「次世代のアジアフラックスへの先導」（H17 - H19）において開発された。また、比較観測の実施に際して、高山サイトでは岐阜大学流域圏科学研究センターの車戸憲二氏ほか、富士吉田サイトでは山梨県環境科学研究所の中野隆志博士、安田泰輔博士ほか、ランビル国立公園では九州大学（現琉球大学）の松本一穂博士やサラワク州森林局の皆様ほか、多くの方々にご協力を頂いた。

## 2. 研究目的

ポータブルフラックスシステムを様々なサイトに持ち込んで比較観測を行うことにより、フラックス観測データの信頼性向上・互換性確認を図るとともにサイト間でのデータ比較を容易にすることができる。その結果として観測データの信頼性を確保しつつ、品質管理された観測データの蓄積を効率的に行うことを目指す。また、比較観測活動を通じて、観測システムやデータを安

定化・標準化する観点から推奨される測器、周辺機器やシステムの機器構成、データ処理方法などの選択肢を例示することによって、既存サイトや新規サイトに対して安定的・効率的な観測推進に寄与する。

### 3. 研究方法

富士吉田 (AsiaFlux サイトコード:FJY)、真瀬 (同 MSE)、富士北麓 (同 FHK)、高山 (同 TKY)、ランビル (同 LHP)、以上計 5 カ所のフラックス観測サイトにおいて、2007 から 2011 年にかけてポータブルフラックス観測システム (以降、ポータブルシステムまたはポータブルと略す) を、経常フラックス観測システム (以下、経常システムと略す) と隣接して設置し、CO<sub>2</sub> 等の乱流フラックスの比較観測を行った。FJY では、2007 年と 2010 年の 2 回比較観測を実施したので、観測回数は延べ 6 回である。

#### (1) ポータブルフラックス観測システム

##### ①システムと運用の概要

ポータブルシステムは、クローズドパス型赤外線ガス分析計 (cIRGA) と超音波風速温度計 (SAT) を用い、渦相関法によって顕熱・水蒸気・CO<sub>2</sub> フラックスを測定する。システムの詳細は、システムの研究開発報告<sup>2)</sup>、英文の取扱い説明マニュアル<sup>3)</sup>、および森林総合研究所フラックスネットのウェブページ ([http://www2.ffpri.affrc.go.jp/labs/flux/portable\\_j.html](http://www2.ffpri.affrc.go.jp/labs/flux/portable_j.html)) を参照されたい。各サイトにおけるポータブルシステムによる観測の設定条件を表 1 に示す。ここで、各比較観測を区別するため、サイトコードと実施年を合わせた名称をつけた。ポータブルでは SAT の近傍にセットした取入口から cIRGA まで空気サンプルを導入するために、長さ 8m のテフロンチューブを FJY2007、MSE2008、FHK2009、及び LHP2011 の各比較観測で使用した。このチューブ長は短いほうが乱流変動をよりの確に捉えることができ、より正確なフラックス算定が可能になる。しかし、cIRGA 本体をタワー上などの空気取り入れ口の近くに設置できない、樹高の高い森林サイトなどではチューブを長くせざるを得ない。FJY2010 と TKY2010 はこのような場合に相当し、本体 (コンテナ)

表 1 各サイト比較観測におけるポータブルフラックスシステムの設定状況

観測名 (site+year)	観測期間 年/月/日 ~ 月/日	チューブ 外 x 内径(mm) x 長(m)	遅れ 時間 (秒)	使用した SAT 機種	標準ガス 自動校正
FJY2007	2007/10/31 -11/08	6x4x8	1.9	SAT550, Kaijo	無
MSE2008	2008/07/03 -07/10	6x4x8	1.9	WindMaster ProII, Gill	有
FHK2009	2009/06/12 -06/23	6x4x8	1.9	WindMaster ProII, Gill	有
FJY2010	2010/04/08 -04/15	8x6x40	7.8	CSAT3, Campbell	有
TKY2010	2010/07/02 -07/20	8x6x40	7.4	CSAT3, Campbell	無
LHP2011	2011/01/21 -01/27	6x4x8	2.1	CSAT3, Campbell	無

を空気取り入れ口から離れた地上に設置するために、長さ 40m のテフロンチューブを使用した。このように長いチューブを使用する場合には、変動成分の減衰を補正するため、FJY2010 の観測データを用いて CO<sub>2</sub> フラックスと顕熱フラックスとの相似性を根拠として図 1 に示す補正関数を算定した。FJY2010 と TKY2010 では、この関数を用いて CO<sub>2</sub> フラックスの高周波数領域におけるコスペクトルの補正を加えたフラックスを求めた。ガスが得られるサイトでは、cIRGA に標準ガスを用いた自動校正を毎日 1 回行った。

## ②設置作業

比較観測を実施する前に各サイト担当者と情報交換を行い、ポータブルシステムに関する情報（大きさなど）を連絡するとともに、タワーに用いられているパイプの直径、乱流フラックス測定位置、ポータブル本体を置くことのできる位置、タワー基部から小屋までの距離、小屋内部の空きスペース、電源状況、作業補助可能なスタッフ人員などについて情報提供を受けて設置作業計画を作成した。今回の結果によると、設置作業は約 3 から 5 名の従事者で概ね半日以内に完了した。作業効率に大きく影響する事項は、タワーの高さとポータブル観測機材をタワー上部へ荷揚げする方法である。荷揚げの空間が十分に確保できる場合にはロープや滑車・ウインチ等を使って機材を揚げることができ、作業に要する時間と労力を少なくすることができた。ポータブルの機材は比較的コンパクトであるが、全重量が約 80kg である。ポータブル本体のみでも約 37kg の重量があるので、タワーの狭い昇降部分を人が担いで揚げる時には本体内容物を分割する必要がある。ポータブルの SAT や空気取り入れ口は、支障のない範囲で各サイトの通常行われている経常システムの SAT にできるだけ近い位置に設置した。今回は、概ね相互に水平で 2m 以内の距離に設置することができた。経常システムとポータブルのセンサの相対的位置関係の詳細はサイト毎に後述する。

## ③ポータブル観測システムで得られたデータの処理

ポータブルで得られた観測データから、森林総研フラックスネットの標準プログラムを利用して 30 分毎のフラックスを算定した。10Hz で記録された各要素の変動データは、まずスパイクや適正な物理範囲を逸脱した数値を除去して補間するとともに、このような数値の個数が全データ個数の 5% を超える場合には比較解析対象から除外した。さらに変動データのグラフを目視して電源の不安定性や降水等の影響によって明らかに信号が乱れているものも解析対象から除外した。また、SAT 設置高度付近に設置した温湿度計と気圧計を用いて大気の水蒸気圧や比湿、密度、定

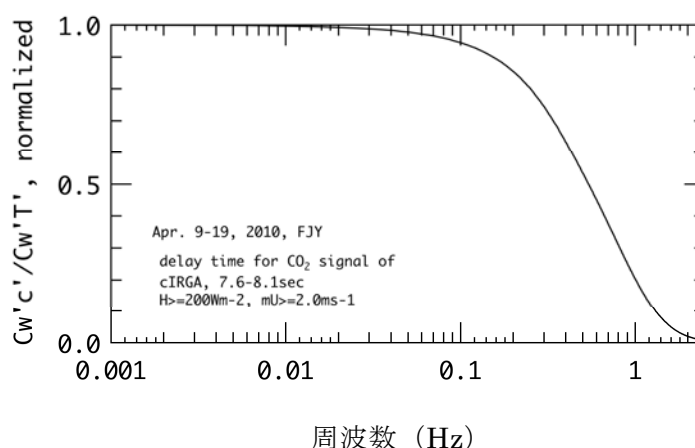


図 1 40m チューブを用いたポータブルシステムにおける、CO<sub>2</sub> フラックスと顕熱フラックスとのコスペクトル比によって示される、高周波数領域における CO<sub>2</sub> フラックスの減衰特性

圧比熱、蒸発潜熱などの30分平均値を算出し、それらをSAT仮温度瞬時値の湿度補正や各種フラックス計算に利用した。3次元風速は横風および鉛直風の平均値がゼロとなるように座標の回転による変換を実施してからスカラー要素（超音波仮温度、気温・水蒸気濃度・二酸化炭素濃度）の線形トレンド除去を行った後にフラックス共分散を計算し、密度変動補正（WPL補正）<sup>4)</sup>を行なった。FJY2010とTKY2010のみCO<sub>2</sub>フラックスの高域補正を行った。

## （2）観測サイト

各サイトの概要を表2に示す。

表2 各サイトの概況及びフラックス観測システムの概要

サイト地名		富士吉田	真瀬	富士北麓	高山	ランビル
サイトコード		FJY	MSE	FHK	TKY	LHP
観測開始年		1999	1999	2006	1993	2001
植生	種類	アカマツ天然林	水田	カラマツ人工林	落葉広葉樹天然林	熱帯フタバガキ・ヒース林
	標高(m)	1030	13	1100	1420	200
	群落高(m)	19	0.7-1.2	20-25	15-20	40-50
	LAI 最大値	5.0	5.0	2.83 <sup>*8</sup>	5.5	6.2
地形タイプと傾斜		斜面 3.5°	平地	斜面 3-4°	山地	丘陵地
年平均気温(C°)		9.5	13.9	9.6	6.5	27.0
年降水量(mm)		1955	1435	1566	2275 <sup>*1</sup>	2740
気候統計値のソース		2000-2008 サイト観測	2001-2009 サイト観測	2006-2007 サイト観測	1994-2005 サイト観測	1968-2001 ミリ空港 <sup>*7</sup>
乱流変動測定高(m)		26	3.0	35	25	60
タワーと測定部位		全高 32m タワー途中	ポール先端	タワー上ポール先端	三角断面タワー頂部	全高 100m タワー途中
超音波風速温度計 本体/プローブ		DA600/ TR61A <sup>*2</sup>	DA600/ TR62AX <sup>*2</sup>	DA600/ TR61C <sup>*2</sup>	DA600/ TR61A <sup>*2</sup>	cSAT3 <sup>*3</sup>
クローズド パス 濃度測定	測定ガス	除湿後のCO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> O
	ガス分析計	Li-6262 <sup>*4</sup>	Li-7000 <sup>*4</sup>	Li-7000 <sup>*4*9</sup>	Li-6262 <sup>*4</sup>	Li-7500 <sup>*4</sup>
	チューブ長(m) 遅れ時間(秒)	40 10.0-11.0	18.1 3.1	12.4 2.5	40 7.4	— (open-path)
オープンパスガス分析計		Li-7500 <sup>*4</sup>		Li-7500 <sup>*4</sup>		Li-7500 <sup>*4</sup>
温湿度計		HMP45A <sup>*5</sup>	HMP45A <sup>*5</sup>	HMP45A <sup>*5</sup>	HMP45A <sup>*5</sup>	—
サンプリング周波数(Hz)		5	10	10	5	10

<sup>\*1</sup> 岐阜大流域圏科学研究センター高山試験地の1980-2002観測データによる

<sup>\*2-5</sup> センサの機種名であり、メーカーはそれぞれ、<sup>\*2</sup>Kaijo Sonic、<sup>\*3</sup>Campbell Scientific、<sup>\*4</sup>LiCor、<sup>\*5</sup>Vaisala

<sup>\*6</sup>Mizoguchiら(2011)<sup>5)</sup>、<sup>\*7</sup>Kumagaiら(2009)<sup>6)</sup>、<sup>\*8</sup>下層植生をのぞく、<sup>\*9</sup>ディファレンシャルモードにて動作

### ①観測サイトの観測におけるフラックス計算方法

各観測サイトの経常システムによる観測結果に関して、本報で比較対象としたフラックスデータはLHPを除いて各サイト独自のプログラムによって算出された速報値であり、詳細な品質管理は行なわれていない。このうち、FJY2007とFJY2010における経常システムの観測結果は、ポー

ダブルシステムで用いられたプログラムと同じ森林総合研究所フラックスネットの標準プログラムによってフラックス計算が行われた。MSE の経常システムによる観測結果は、3次元座標の回転変換を行っていない風速を使用したフラックス計算による。LHP の経常システム観測結果は、森林総合研究所フラックスネットの標準プログラムを用いてフラックス計算が行われた。このとき、空気の密度、比湿、気化潜熱、定圧比熱、水蒸気、CO<sub>2</sub>密度の計算および超音波仮温度の湿度補正などを行うために、ポータブルシステムで測定された気温、湿度、気圧の30分平均値を使用した。また、SAT で測定された風速や温度の電圧信号に対して、オープンパス型赤外線ガス分析計 (oIRGA) で測定された水蒸気およびCO<sub>2</sub>密度の電圧信号の遅れ時間を一定値0.4秒とした。

## ②各サイトのポータブルシステム設置状況

ポータブルの SAT・サンプル空気取入口及び温湿度計通風筒は、支障のない範囲で各サイトの通常行われている経常システムの SAT にできるだけ近い位置に設置した。今回は概ね両 SAT 間の水平距離が2m以内に設置することができた。経常システムとポータブルのセンサ間の相対的位置関係などについて後述する。

### ア. FJY2007 (図 2a)

ポータブルと経常システムの両 SAT はタワーから平行して南向きに突出した2本のパイプそれぞれの先端部に取り付けられた。両者の相対的な位置関係は、ポータブルの SAT 中心が経常システムの SAT 中心から東側 (写真左側) へ約 1.0m、下方へ約 0.2m であった。ポータブルのサンプル空気取入口は SAT 中心から約 0.15m 下方の位置に取り付けられた。ポータブルの温湿度計通風筒は空気吸入口を南向きにし、センサ感部中心点がポータブル SAT 中心の下方 0.4m、北側 (よりタワーに近い側) へ 0.4m の位置となるように設置された。

### イ. MSE2008 (図 2b)

ポータブルの SAT は、経常システムの設置されたポール (写真左側) とは別の鉛直ポール (写真右側) の先端部に取り付けられた。ポータブルと経常システム両 SAT の中心は、互いに 1.85m 離れた位置で同じ高さであった。このため、両 SAT 間の距離は他のサイトに比べて最も大きくなったが、両者の間には気流の障害になる物体はまったくない状況である。ポータブルの温湿度計通風筒はセンサ感部中心がポータブル SAT の下方 0.9m の位置となるように設置された。

### ウ. FHK2009 (図 2c)

FHK 経常システムの SAT プロブは鉛直風測定軸と水平風測定軸が独立したタイプであり、その鉛直軸がプロブ基部から西向き (写真左側) になるように設置された。ポータブル SAT は経常システム SAT 基部の東側 (写真右側) に設置された。経常システム SAT の鉛直軸中心とポータブル SAT 中心の水平距離は約 1.3m で高さはポータブルのほうが約 0.15m 高くなった。ポータブルの空気取入口は SAT 中心から約 0.1m 下方であった。ポータブルの温湿度計通風筒は、そのセンサ感部中心点が SAT 中心の下方 0.8m、西側 (写真左側) 0.15m となるように設置された。

### エ. FJY2010 (図 2d)

ポータブル SAT はその中心点が経常システム SAT の中心から東側へ (写真で左側へ) 水平に約 0.6m 離れた位置に設置された。ポータブル空気取入口は SAT (CSAT3) 中心から約 0.1m タワー中心部に近い (写真で手前側) 位置に設置された。ポータブルの温湿度計通風筒は、内部のセンサ中心点が SAT 中心から北側 (写真で手前側) へ 0.9m、0.15m 高い位置となるように設置された。

オ. TKY2010 (図 2e)

経常システム SAT を起点として上空側から見て反時計回りに約 25 度回転した方向に突出したアームの先端にポータブル SAT が取り付けられた。ポータブル SAT はその中心がタワー基部からアームに沿って 0.8m 先端側で、経常システム SAT 中心から水平に 0.6m 離れた位置になるように設置された。空気取入口は SAT プローブから 0.1m タワー寄りで SAT フレームの上側の位置にセットされた。ポータブルの温湿度計通風筒はセンサ中心位置がポータブル SAT 中心から約 0.5m 低い位置となるように設置された。

カ. LHP2011 (図 2f)

経常システムの CSAT3 (写真で右側) から約 0.7m 水平に (写真で左側へ) 離れた位置にポータブル SAT (CSAT3) と空気取入口が設置された (写真で左側)。経常システムとポータブル両方の SAT がとりつけられたアーム先端からタワー基部側へ水平に約 2m 離れた位置にポータブル温湿度計通風筒が設置された。さらに通風筒よりもタワー中心部に向かって約 1.5m 離れたテラス床面上

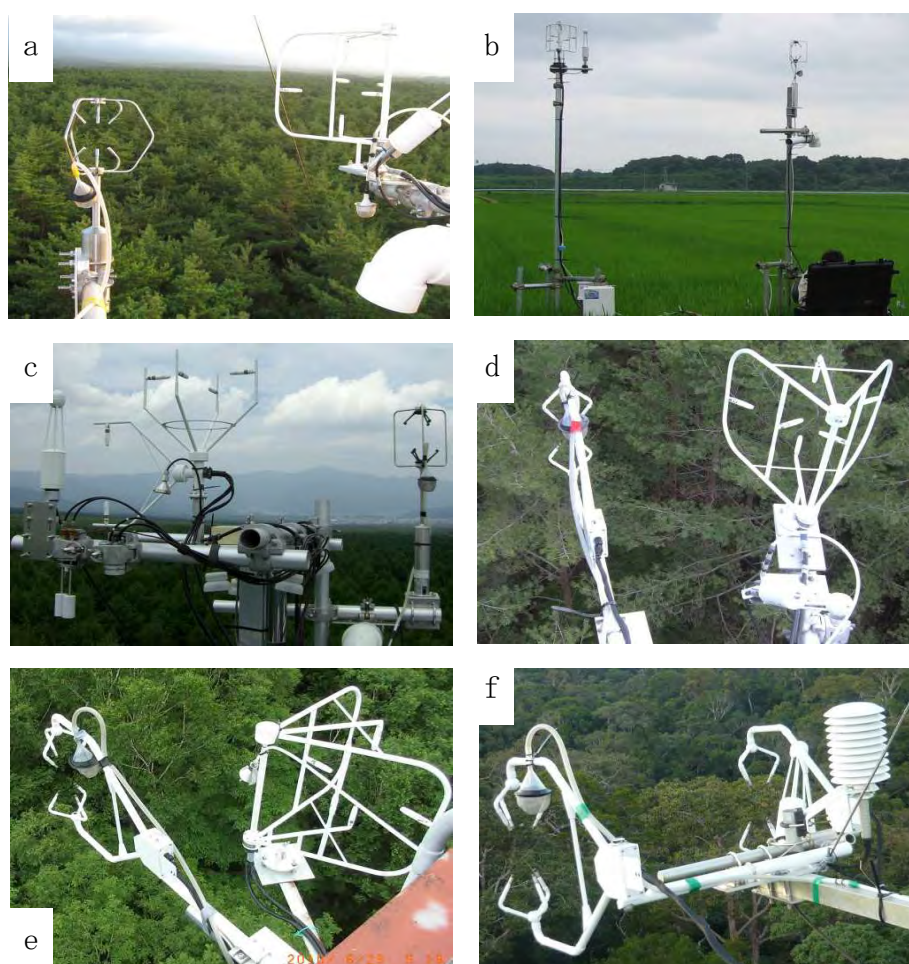


図 2 各サイト経常フラックス観測システムのセンサとポータブルシステムセンサの相対的位置関係：a) FJY2007 (ポータブルが左側にある)；b) MSE2008 (ポータブル右)；c) FHK2009 (ポータブル右)；d) FJY2010 (ポータブル左)；e) TKY2010 (ポータブル左)；f) LHP2011 (ポータブル左)

にポータブル本体（コンテナ）が設置された。経常システムの SAT の直近には oIRGA 感部と自然通風式シールドが設置された。

#### 4. 結果・考察

各サイトの経常観測システムとポータブル観測システムの間で  $\text{CO}_2$  フラックスを比較した結果について、経常システムで観測されたフラックスを縦軸に、ポータブルシステムによるフラックスを横軸にとった散布図を図 3 に示した。図には座標原点を通る回帰直線（赤色の短い線）も示した。この直線の回帰係数と決定係数、ならびに経常システムとポータブルシステム間の標準誤差（誤差の二乗平均平方根）および相対誤差（標準誤差/平均値）をまとめて表 3 に示した。

渦相関法のフラックス計算には SAT によって測定される 3 次元風速が必須である。摩擦速度や顕熱フラックスは概ね SAT 出力のみから計算される。したがって、 $\text{CO}_2$  フラックスの誤差原因が SAT にある場合は、 $\text{CO}_2$  フラックスよりも摩擦速度や顕熱フラックスに、より顕著に誤差が現れている可能性が大きい。この点を考察するため、摩擦速度と顕熱フラックスについても比較した。

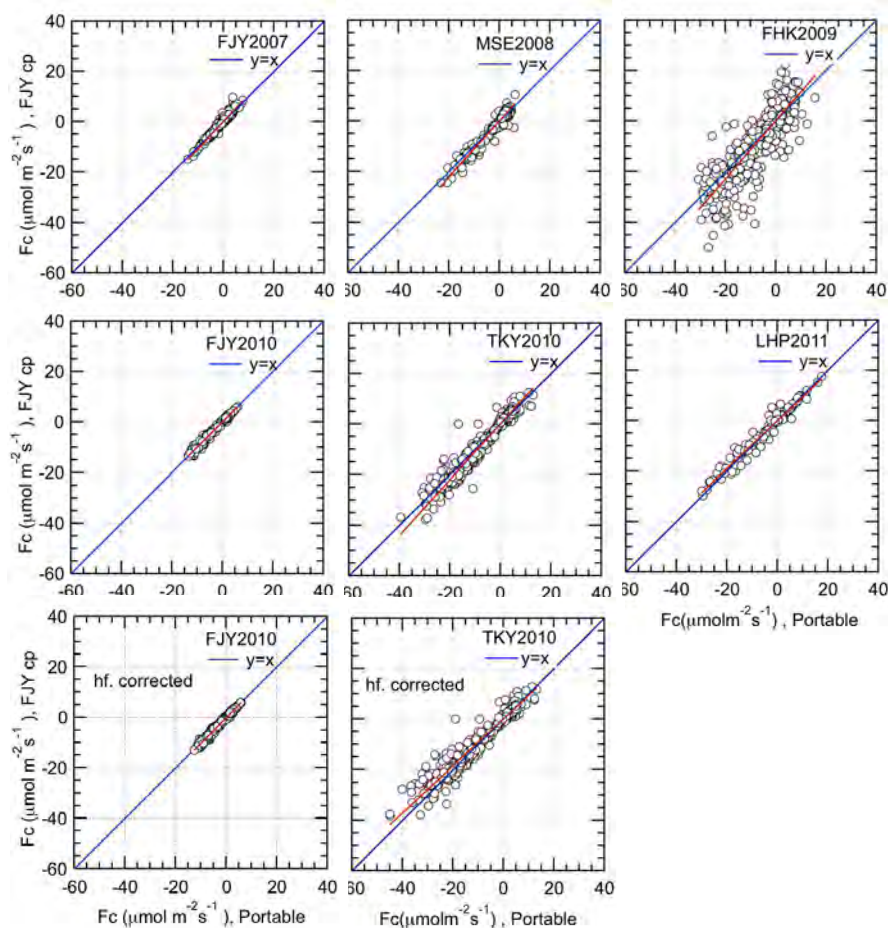


図 3 経常システムとポータブルシステムの間における  $\text{CO}_2$  フラックスの比較。縦軸：経常観測システムで測定されたフラックス、横軸：ポータブルシステムで測定されたフラックス。「hf. corrected」高域補正されたフラックス。



このため、図 3 と表 3 に CO<sub>2</sub> フラックスについて示したのと同様の図表を、顕熱フラックスに関しては図 4 と表 4 に、顕熱フラックスに関しては図 5 と表 5 にそれぞれ示した。以下に、各比較観測別の比較結果と考察を述べる。

表 3. 各比較観測のサイト経常観測による CO<sub>2</sub> フラックスの、ポータブル CO<sub>2</sub> フラックスに対する直線回帰係数、決定係数、標準誤差および相対誤差

比較観測名	直線回帰係数 slope <sup>*1</sup>	決定係数 $r^2$	標準誤差 RMSE ( $\mu \text{ molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	相対誤差 RE(%)
FJY2007	1.09	0.96	0.83	20.6
MSE2008	1.11	0.94	2.30	21.7
FHK2009	1.14	0.73	7.90	50.0
FJY2010	1.00	0.98	0.62	11.9
FJY2010 (cor) <sup>*3</sup>	1.02	0.99	0.53	11.2
TKY2010	1.10	0.98	2.60	23.4
TKY2010 (cor) <sup>*3</sup>	0.93	0.96	2.80	24.8
LHP2011 op <sup>*2</sup>	0.95	0.99	1.80	18.8

\*1 縦軸に経常システム、横軸にポータブルのフラックスをプロットしたとき、原点を通る直線の傾き

\*2 オープンパス式赤外線ガス分析計(oIRGA)を用いた観測を示す。

\*3 高域補正を行った CO<sub>2</sub> フラックス。

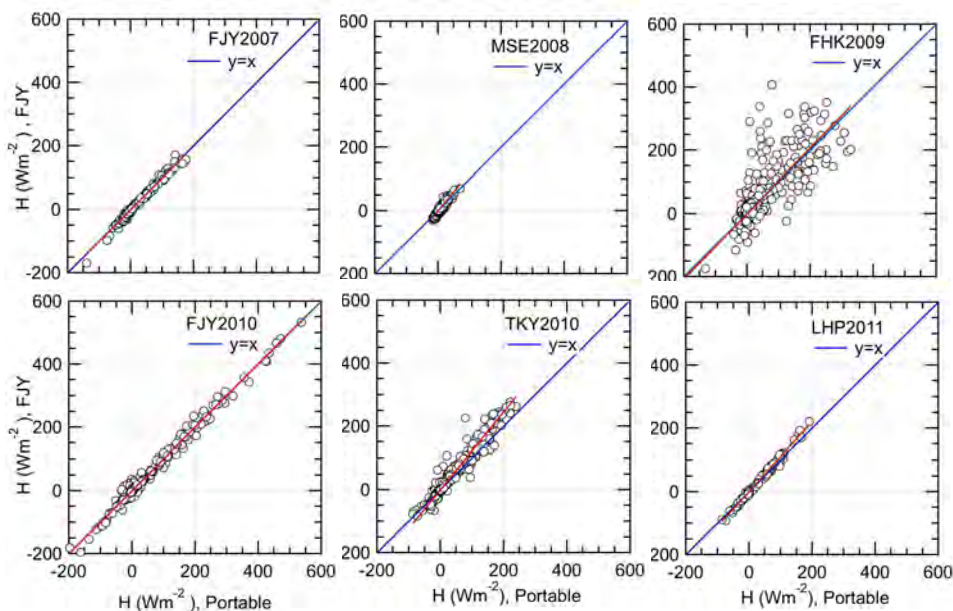


図 4 経常システムとポータブルシステムの間における顕熱フラックスの比較。  
縦軸：経常観測システムで測定されたフラックス、横軸：ポータブルシステムで測定されたフラックス。

表4 顕熱フラックスにおける、ポータブルシステムに対する経常システムの直線回帰係数と決定係数、および両システム間の誤差

比較観測名	直線回帰 係数 slope*	決定係数 $r^2$	標準誤差 RMSE ( $\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	相対誤差 RE(%)
FJY2007	0.99	0.96	5.3	13.1
MSE2008	1.20	0.87	6.7	35.4
FHK2009	1.04	0.73	60.0	56.3
FJY2010	1.00	0.99	11.9	9.8
TKY2010	1.22	0.89	33.7	35.5
LHP2011	1.11	0.99	6.8	13.6

\* 縦軸に経常システム、横軸にポータブルのフラックスをプロットしたとき、原点を通る直線の傾き

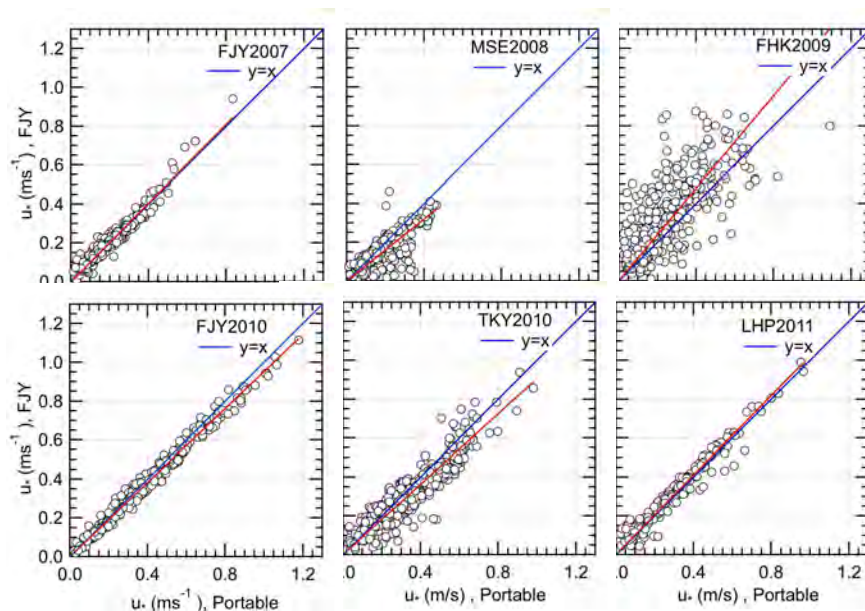


図5 経常システムとポータブルシステムの間における摩擦速度フラックスの比較

縦軸：経常観測システムで測定されたフラックス、

横軸：ポータブルシステムで測定されたフラックス

## (1) 個別の比較観測結果

### ①比較観測 FJY2007

経常システムによる  $\text{CO}_2$  フラックスは、ポータブルに対する標準誤差が  $0.83 \mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  と小さかった。また、回帰係数は 1.09 となり、ポータブルよりも経常システムによるフラックス絶対値がやや過大な傾向を示したが、決定係数は 0.96 で直線関係からのばらつきは小さかった (図 3、表 3)。顕熱フラックスと摩擦速度について、ポータブルに対する回帰係数はそれぞれ 0.99、1.01、

表 5 摩擦速度に関する、ポータブルシステムに対する経常システムの直線  
回帰係数と決定係数、および両システム間の誤差

比較 観測名	直線回帰 係数 slope**1	決定係数 r <sup>2</sup>	標準誤差 RMSE ( $\mu \text{ molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	相対誤差 (%)
FJY2007	1.01	0.93	0.030	13.6
MSE2008	0.80	0.91	0.070	43.8
FHK2009	1.19	0.52	0.160	42.1
FJY2010	0.95	0.99	0.037	8.4
TKY2010	0.91	0.92	0.070	16.9
LHP2011	1.02	0.98	0.044	11.9

\*1 縦軸に経常システム、横軸にポータブルの摩擦速度をプロットしたとき、原点を通る直線の傾き

標準誤差は  $5.3\text{Wm}^{-2}$ 、 $0.03\text{ms}^{-1}$ 、相対誤差は 13.1、13.6%であり、良好な一致を示した（図 4、表 4、図 5、表 5）。FJY2007 において  $\text{CO}_2$ 、顕熱、摩擦速度のすべてのフラックスに関して経常システムとポータブルは良い一致を示した。

#### ②比較観測 MSE2008

経常システムによる  $\text{CO}_2$  フラックスのポータブルに対する回帰係数は 1.11 であり、FJY2007 と同様に経常システムのほうがポータブルよりもフラックス絶対値がやや過大な傾向を示した。このとき、決定係数は 0.94 であり FJY より値が小さいものの直線関係からのばらつきは比較的小さかった。また、標準誤差は  $2.30 \mu \text{ molm}^{-2}\text{s}^{-1}$  であり、FJY2007 の場合よりもやや大きかったが、相対誤差は FJY2007 と同程度の約 20%であり、MSE の経常システムはポータブルと概ね良好な一致を示した（図 3、表 3）。

顕熱フラックスについては、標準誤差は  $6.3\text{Wm}^{-2}$  と小さいのに対して相対誤差が 35.4%と比較的大きい値となった。灌水した水田における観測であるため顕熱フラックスの値が  $100\text{Wm}^{-2}$  以下の小さい範囲に限定されていた（図 4、表 4）。顕熱フラックスは、誤差絶対値が小さいにもかかわらず、測定値がこのように小さい範囲にあったために相対誤差が大きくなったと考えられる。このことから、比較観測の結果を明確に示すためには、フラックス値の変動範囲が広い時期を選ぶことが推奨される。摩擦速度は明らかに直線関係からのばらつきが大きく、かつポータブルに対して過小傾向（図 5、表 5）を示した。この原因として MSE の経常観測システムの速報値では風速の座標回転による変換が行われていないことが挙げられ、風速のみから計算される摩擦速度において、ポータブルとの差異が顕著に示されたことが考えられる。

#### ③比較観測 FHK2009

$\text{CO}_2$  フラックスについて、ポータブル観測に対する標準誤差と相対誤差がそれぞれ  $7.90 \mu \text{ molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、50%と大きく、また直線回帰の決定係数が 0.73 で直線相関性からのばらつきも大きかった（図 3、表 3）。顕熱フラックスと摩擦速度に関しても、ポータブルとの相対誤差がそれぞれ 56.3、42.4%と大きな値を示し、かつ直線回帰の決定係数がそれぞれ 0.73、0.52 と小さい値を示しており、直線関係のばらつきも大きかった（図 4、表 4、図 5、表 5）。FHK の経常観測システムによるフラックスは  $\text{CO}_2$ 、顕熱フラックス、摩擦速度のいずれにおいても誤差が大きか

った。

このように経常観測システムとポータブルシステムとの間の誤差が大きい原因として、両システムセンサ間の距離や障害物の影響を検討した。FHK2009 では、両センサの距離が約 1.3m 離れ、その間には風の流れを妨げる障害物として、経常観測システムの SAT 基部があった。このため、風向が両センサを結ぶ方向になった場合、風下側は障害物の影響を受けて乱れた風速場になる可能性がある。そこで、両センサを結ぶ直線に直角な方向のみに風向を限定して CO<sub>2</sub> フラックスの比較を行った。この結果は標準誤差が  $8.5 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、相対誤差が 54% となり、風向を限定しても誤差は改善されなかった。したがって、他の比較観測に比べて大きな誤差はセンサ間の距離や障害物に起因するものでなく、SAT を含む観測システムに生じた何らかの異常であることが推察される。

#### ④比較観測 FJY2010

CO<sub>2</sub> フラックスは、経常システムとポータブルの両方とも高域未補正の場合、直線回帰係数が 1.00、標準誤差が  $0.62 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、相対誤差は 11.9% を示した。一方、高域補正を行った場合、ポータブルに対する直線回帰係数が 1.02、標準誤差が  $0.53 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、相対誤差は 11.2% であった (図 3、表 3)。以上の結果から、CO<sub>2</sub> フラックスは高域補正の前後において経常システムとポータブルの間で標準誤差、相対誤差ともに小さく良好に一致したと言える。MSE2008 の顕熱フラックスとは異なり、測定値の変動範囲が小さいことによって相対誤差が大きくなることはなかった。CO<sub>2</sub> フラックスに関する相対誤差は 6 回の比較観測の中で最も小さい値であった。顕熱フラックスと摩擦速度については、他の比較観測と比べても十分に大きい範囲の値が観測され、ポータブルフラックスとの相対誤差はいずれも 10% 以下で小さかった (図 4、表 4、図 5、表 5)。FJY2010 においては、CO<sub>2</sub>、顕熱、摩擦速度のすべてのフラックスに関して経常システムとポータブルは良い一致を示した。

#### ⑤比較観測 TKY2010

CO<sub>2</sub> フラックスは、経常システムとポータブルの両方とも高域未補正の場合、ポータブルに対する直線回帰係数が 1.10 となり、経常システムのほうがポータブルに比べて過大な傾向を示した。一方、両者の高域補正を行った場合には、直線回帰係数が 0.93 で、逆に経常システムのほうがポータブルに比較してやや過小傾向となった (図 3、表 3)。CO<sub>2</sub> フラックスの経常システムとポータブルの間の誤差は、補正前には標準誤差  $2.6 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、相対誤差 23.4% であったが、補正後には、それぞれ 2.8、24.8% となり、補正によりわずかながら誤差が拡大した (表-3)。経常システムの cIRGA に接続されたチューブは、ポータブルと同じ長さ 40m であり、CO<sub>2</sub> 濃度信号の遅れ時間もポータブルと同じ 7.4 秒であった。このようなクローズドパスシステムの類似性から、高周波数域変動成分の減衰度合いは、ポータブルと経常システムの間で大きく異なっていないと考えられるが、高域補正前後での比較結果からは、ポータブルの方が経常システムよりも高域補正量がわずかに大きいことが推察される。さらに詳細な議論には高域補正の不要な oIRGA との比較等を行う必要がある。

顕熱フラックスは、標準誤差が  $33.7\text{Wm}^{-2}$ 、相対誤差が 35.5% であり他の比較観測と比べてやや誤差が大きかったことに加えて、ポータブルに対する直線回帰係数は 1.22 と過大な傾向が示された (図 4、表 4)。摩擦速度に関する直線関係からのばらつきが認められ、相対誤差は 16.9% でやや大きかった (図 5、表 5)。顕熱フラックスや摩擦速度の誤差が CO<sub>2</sub> フラックスに比べて大きか

ったことから、SATの出力について、さらに検討した。

一般に、降水時にSAT センサ部（プローブヘッド）が濡れると異常値を示す場合がある。ポータブルシステムでは、降水の影響を受けて異常となっている生データはスパイク数やレンジアウト数を用いた品質評価によって、概ね比較対象から除外されている。

ここで、経常システムとポータブル両方の降雨時のSAT出力の挙動を見るため、品質評価によるデータ選別を施さない両者の30分平均のSAT温度を降水量とともに示した(図6)。ポータブルと経常システムのSAT温度は無降水時には概ね一致していたが降雨時には異常値が示された。異常値はポータブルに比べて経常システムにおいて出現頻度が高くかつ異常の程度も大きい傾向が認められた。さらにSAT出力の妥当性ないし問題点を確認するためには、さらにスペクトルや原データ時系列の目視チェックなどを行なう必要がある。

#### ⑥比較観測 LHP2011

サイト経常システムのCO<sub>2</sub>フラックスはポータブルに対して相対誤差20%未満であり概ね他の比較観測と同程度の一致を示した(図3、表3)。顕熱フラックスと摩擦速度について、ポータブルに対する回帰係数はそれぞれ0.99、0.98、標準誤差は6.8Wm<sup>-2</sup>、0.044ms<sup>-1</sup>、相対誤差は13.6、11.9%であり、良好な直線関係と比較的小さい誤差を示した(図4、表4、図5、表5)。CO<sub>2</sub>、顕熱、摩擦速度すべてのフラックスに関して経常システムとポータブルは良い一致を示した。

一般に、cIRGAを用いているポータブルのCO<sub>2</sub>フラックスは高周波数領域の変動減衰がある。一方、oIRGAを用いたLHP2011のCO<sub>2</sub>フラックスではこのような減衰は小さくほぼ無視できる。このため、高域補正を行わない値の比較では、oIRGAを用いた経常システムのほうがcIRGAを用いたポータブルよりもフラックス絶対値が過大になることが予想されるが、観測結果によると、直線の回帰係数は0.95であり、逆にわずかながら過小傾向を示した。これは、8mチューブを用いたポータブルシステムによるCO<sub>2</sub>フラックス測定において必要な高域補正量が比較的小さいことを示す。

#### (2) 全サイトを通じた考察

##### ①誤差の目安

CO<sub>2</sub>フラックスについて全ての比較観測を概観する。FJ2007とFJY2010年の2回の比較観測は誤差1.0μmolm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>未満で、他のサイトの観測に比べて最も小さく、良好な一致を示した。その次にはLHP2011とMSE2008が標準誤差2.0μmolm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>前後であり概ね良好な一致を示した。TKY2010

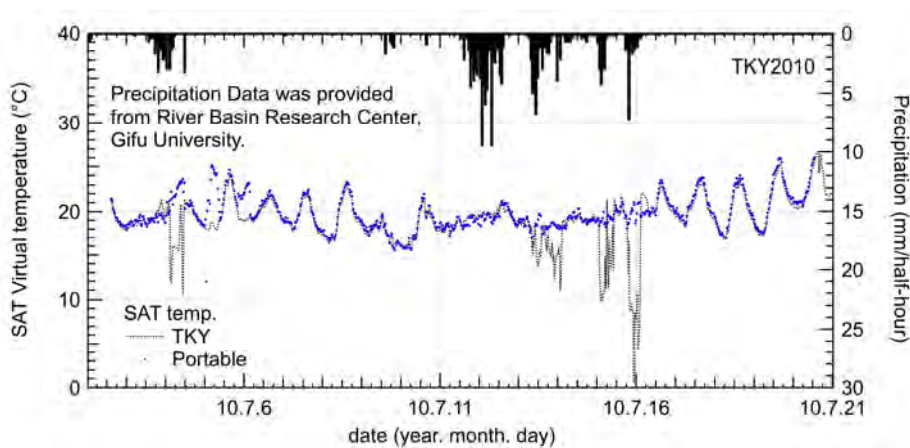


図6 TKY2010におけるフラックス経常観測システムおよびポータブル観測システムの超音波風速計温度(SAT temp.)と降水量(Precipitation)の30分値時系列

降水量は岐阜大学流域圏科学研究センター高山試験地による。

は誤差が MSE2008 よりもやや大きかった。FHK2009 はポータブルに対して標準誤差および直線関係からのばらつき共に大きかった。相対誤差について見ると、FJY21010 が 12%でもっとも小さかったのに続いて、FJY2007、MSE2008、TKY2010、LHP2011 はいずれも 20%前後であった。CO<sub>2</sub>フラックスは FHK2009 を除いた 5 回の比較観測において、ポータブルと経常システムの間で概ね良好な一致が示され、そのときの標準誤差が 0.6~2.6 μmolm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>、相対誤差が 18.8-23.4%であった。この標準誤差は日米フラックス比較観測<sup>1)</sup> で得られた誤差 1.3~1.9 μmolm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> よりもやや大きな値を含む。既往の誤差評価に関する研究によると、CO<sub>2</sub>フラックスの相対的なランダム誤差として、15~31%<sup>5)</sup>、タイの雨期水田における 14±5%<sup>6)</sup>、日本の水田における約 10%<sup>7)</sup>、大気不安定時の森林における 17~37%<sup>8)</sup>などの報告がある。今回妥当と判断された比較観測結果における相対誤差の最大値約 23%は、既往研究におけるフラックスのランダム誤差の既往の範囲にあることを併せて考慮し、厳密な計算方法の統一などを行わない場合においても一定のデータ互換性が示す目安になることが示唆される。

## ②経常観測に関する指摘

FHK2009 では誤差の状況から観測システムの問題を指摘した。このことに関して、FHK サイトでは比較観測の後、経常観測システムの点検と主要機器センサ部の交換等が行われ、信号ノイズ減少等の改善が図られた。今回の比較観測が経常観測システムの問題抽出に寄与した事例であると考えられる。

SAT センサの問題点をいくつかの比較観測で指摘した。SAT は渦相関法によるフラックスすべてに必須の測器であるため、TKY2010 で指摘した降水時の挙動を含めて、フラックスのスペクトルや原データ時系列の目視チェックなどを実施して異常の早期発見に努めることが非常に地道ではあるがフラックス観測の安定化に欠かせない重要な作業であると再認識した。

## ③比較観測の時期と日数

各比較観測の日数と得られた CO<sub>2</sub>フラックスデータ数を表 6 に示す。このうち、LHP2011 は、もっと短い比較観測日数であるとともに、スクールや電源不安定の影響により、有効なデータ数は観測継続時間の 40%以下となり、得られたデータ数が最も少なくなった。TKY2010 は有効な観測データ数が約 500 と他の比較観測と比べて多く、フラックスの測定値も十分に広い範囲に分布した。FJY2007 と FJY2010 はそれぞれ晩秋と早春の、植物の光合成活動が不活発な季節を観測時期にしたため、CO<sub>2</sub>フラックスは他の比較観測と比べて小さい変動範囲に限定された。

表 6 各比較観測の日数と比較に用いたフラックスデータ数

	FJY2007	MSE2008	FHK2009	FJY2010	TKY2010	LHP2011
観測日数	8	7	11	7	18	6
比較に有効な フラックスデータ数	361	215	364	272	508	108

観測期間は天候条件やサイトの観測条件によって状況は変わりうるが、表 6 の結果を顧みると、条件が良くて最低 4~5 日間の日数がほしいところである。さらに、フラックス値の変動範囲が広いほど、比較解析を明確に行うことができる。そのような季節や時期、期間の長さなどを比較観測の前に検討することが必要である。一般的には、気温等がピークに達する前の太陽高度の高い

時期などで植物の活発な生長期間を選ぶのが良い。比較観測に適した時間が十分にとれない場合（悪天率が高い期間）やフラックス値の変動範囲が狭くなってしまうことが予測されるときには、次善の策として観測期間を長めにすることも必要である。

### （3）今後の課題など

ポータブルシステムの観測では8mチューブを用いた場合の高域補正を行っていない。比較観測結果からは必要な補正量は小さいことが推察されたがやはり、クローズドパス型ガス分析計（cIRGA）によるフラックス観測には高域補正が必要である。40mチューブを用いた場合についても厳密には、顕熱フラックスとCO<sub>2</sub>フラックスのコスペクトル相似性を仮定せずにオープンパス型ガス分析計（oIRGA）を用いた高域補正係数等の同定と検証を行うことがより望ましい。これらは、今後のより客観性の高いポータブルフラックスシステム運用の課題である。

計算手法の違いがフラックス算定結果に与える影響については、本報告では詳細に取り上げなかった。特に、遅れ時間の与え方、超音波風速計プローブのアングルアタック角度による誤差の補正、トレンド除去についてはまったく触れていない。計算手法の違いによる誤差を評価するためには、同じ乱流変動生データについて様々な計算手法によるフラックスの結果を相互に比較することが必要である。観測サイトの現場ではフラックスの計算手法やセンサの設置方法はサイト毎に最適な方法が探られており今後も多様な方法が開発されるであろう。ハードウェア機種、ハードウェアのインストレーション法などについても同様である。目的に応じて比較の方法を考えて行くことが必要である。

今後、比較観測の事例を着実に増やして行く事が重要である。このため、ポータブルフラックス観測システム使用マニュアル（図7）を作成した。英語版の印刷物の作成、配布とともに日本語版、英語版をホームページ上でも公開した。作成にあたっては、平易な表現と多くの図を用い、はじめてフラックス観測に携わる学生、研究者、技術者でも取り扱いができるように工夫した。これにより、これまで開発・作成者を中心に使用されてきたポータブルフラックス観測システムが開発・作成者でなくても使用可能となり、より多くのサイトでの比較観測実施が可能となると期待される。副次的に、本マニュアルは対象とするシステムの使用以外にもフラックス観測方法の具体例として利用されることが期待される。

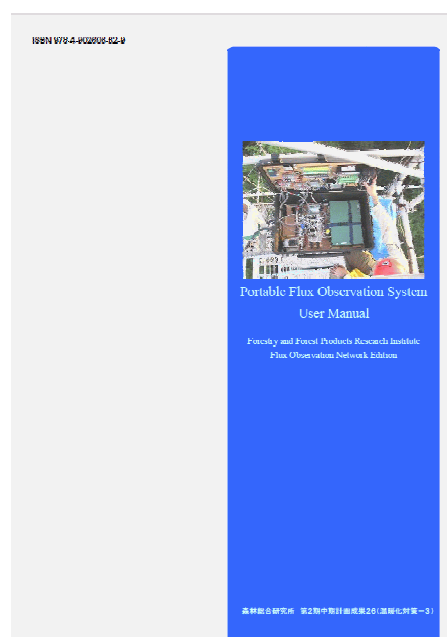


図7 ポータブルフラックス観測システム使用マニュアルの表紙

## 5. 本研究により得られた成果

本課題に参画している機関の運営する国内の様々な森林や水田サイト、および大学機関の運営する熱帯雨林サイトにおいて、ポータブルフラックスシステムを用いた比較観測を実施した。また、ポータブルフラックス観測システム使用マニュアルを作成した。比較観測の結果により、各サイトの観測データ妥当性を確認するとともに一部データについては精度に関する指摘を行ない、

観測システムの再点検・ノイズ対策等の改善につなげることができた。これらのことは、ネットワーク上のデータ共有促進に向けて、各観測サイトにおけるより一層の効率的な観測とデータ蓄積の推進につながった。

フラックス算出手法の厳密な統一を行わない場合において概ね妥当と判断されるフラックスの相対誤差は25%以内であることを指摘するとともに、比較観測を実施する場合の留意事項として、比較観測に必要な日数や実施時期として、最低5日、天候条件が不安定な場合は10日程度の予定が必要であること、フラックス値の変動範囲が大きいかほど確実な比較解析が可能であることなどを提起した。さらに、フラックス観測を安定的に継続するために重要かつ基本的な作業として、観測システムの核となる超音波風速計を常時監視し不安定な兆候を示す異常値を早期に検出するようサイトとして体制整備することの重要性を再確認した。

## 6. 引用文献

- 1) 中井裕一郎・三枝信子・平野高司・Robert EVANS・大谷義一・平田竜一・鳥山敦・北村兼三・鈴木寛・山本晋 (2002) 2001年8月、苫小牧と札幌で行われた日米フラックス比較観測, 水文・水資源学会誌, 15, 665-672.
- 2) Ohtani, Y., Mizoguchi, Y., Takanashi, S., Yasuda, Y., Iwata, H., Nakai, Y., Yuta, S., Yamanoi, K. (2010) Development of a portable CO<sub>2</sub> flux observation system using a closed-path gas analyzer for intercomparison, Bulletin of FFPRI, 9, 31-36.
- 3) Takanashi, S., Ohtani, Y., Yuta, S., Mizoguchi, Y., Yamanoi, K., and Forestry and Forest Products Research Institute Flux Observation Network (2011) Portable Flux Observation System -User Manual-, Forestry and Forest Products Research Institute, ISBN 978-4-902606-82-9.
- 4) Webb, E.K., Pearman, G.I. and Leuning, R. (1980) : Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. Q. J. R. Meteorol. Soc., 106, 85-100.
- 5) Finkelstein, P. L. and Sims, P. F. (2001) Sampling error in eddy correlation flux measurements. J. Geophys. Res., 106, 3503-3509.
- 6) KIM, W., KOMORI, D., CHO, J. (2009) The characteristic of relative error in eddy covariance measurements and its application to data quality control in rainfed paddy field, J. Agric. Meteorol., 65, 201-207.
- 7) 間野正美・宮田明・永井秀幸・山田智康・小野圭介・齊藤誠・小林義和 (2007) Open-path 型渦相関法によるCO<sub>2</sub>フラックスの偶然誤差とその誤差が年間炭素収支評価に及ぼす影響, 農業気象63, 67-79.
- 8) Ocheltree T.W. and Loescher, H.W. (2007) Design of the AmeriFlux Portable Eddy Covariance System and Uncertainty Analysis of Carbon Measurements. J. Atmos. Oceanic Technol., 24, 1389-1406.

### [研究成果の発表状況]

#### (1) 誌上発表 (学術誌)

- ① Y. Ohtani, Y. Mizoguchi, S. Takanashi, Y. Yasuda, H. Iwata, Y. Nakai, S. Yuta, and K. Yamanoi : Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute, 9, 31-36 (2010)



“Development of a portable CO<sub>2</sub> flux observation system using a closed-path gas analyzer for intercomparison”

(2) 口頭発表

① 溝口康子、中井裕一郎、高梨聡、大谷義一、山野井克己、北村兼三、宮田明、間野正美、小野圭介、村山昌平、高橋善幸、三枝信子、平田竜一、安田幸生、岩田拓記、近藤裕昭：農業気象学会 2011 年大会（2011）

「移動観測システムを用いた森林・水田におけるフラックス比較観測」

② 中井裕一郎、高梨聡、大谷義一、溝口康子、山野井克己、北村兼三、宮田明、間野正美、小野圭介、村山昌平、高橋善幸、三枝信子、平田竜一、近藤裕昭：第 122 回日本森林学会（2011）

「ポータブルフラックス観測システムを用いた様々なサイトでの比較観測」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

“ Portable Flux Observation System User Manual”（引用文献<sup>3)</sup>、ISBN 978-4-902606-82-9)を出版してフラックス関係者に配布するとともに、HP上で日本語版と英語版の公開を行い、ポータブルシステムの普及を行った。