

可搬式地表面フラックス計測装置について

The portable surface fluxes measurement system

樋口 篤志*・杉田 倫明**・寄崎 哲弘***

Atsushi HIGUCHI*, Michiaki SUGITA**, and Akihiro YORISAKI***

I はじめに

地表面フラックスの計測及び算出は、様々な手法・観測測器を用いてこれまで行われてきている。直接的な観測方法としては、超音波風速計を用いて計測する方法であり、渦相関法と呼ばれる。顕熱・潜熱フラックスはそれぞれ次式で計算される：

$$H = \rho C_p \overline{w'T'} \quad (1)$$

$$LE = \rho \lambda \overline{w'q'} \quad (2)$$

ここで、 H および LE はそれぞれ顕熱・潜熱フラックス (Wm^{-2})、 ρ は空気密度 (kgm^{-3})、 C_p は空気の定圧比熱 ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)、 w は風速の鉛直成分 (ms^{-1})、 T は気温 (K or Degree)、 q は比湿 (kgkg^{-1} or gkg^{-1})、 λ は水の気化熱 (Jkg^{-1}) をそれぞれ示す。また、プライム (') は平均値からの偏差、オーバーバー (—) は平均を示す。渦相関法は乱流を計測することで地表面フラックスを直接算出する方法であり、フラックス算出の際、仮定が少ないのが特徴である。

渦相関法を用いたフラックス算出の際用いられる超音波風速計は1960年代後半から1970年代にかけて

各種計測機が開発され、現在では大変安定した計測機である。また、乱流観測を行う研究者も、接地層乱流を専門とする研究者から、熱収支・熱収支の一部として乱流計測を行う広い範囲の研究者（例えば Aoki *et al.*, 1998）へと広がってきている（玉川, 1999）。それに伴い、商用電源が無いような観測地点でも乱流観測・フラックス計測が出来るように、バッテリー＋ソーラーパネルのみで計測できるシステムも出始めてきている。例えば、GAME (GEWEX Asia Monsoon Experiment) でのフラックス計測に用いられているPAM-III (Portable Automated Mesonet III) では、商用電源が確保できない地域でも測定を行えるように大型のバッテリー＋ソーラーパネルのみで計測が行える。しかしながら、大半の乱流観測システムは商用電源の使用を前提としており、可搬式であっても発電器等を用いなければ僻地での観測は不可能であった（例えば 甲斐他, 1994）。また、乱流計測システムの多くは、PC に直接計測データ（通常10 Hz, 1秒間に10回データを所得）を取り込み、生データから（1）式、（2）式を用いて研究室でフラックス計算を行うため、すぐにフラックスデータを得ることが出来なかった。乱流計測を行う研究者が広がって来ている現在、スペクトル解析等の生データ解析を行わない限り、最終的に

*筑波大学大学院博士課程地球科学研究科(現・千葉大学環境リモートセンシング研究センター特別研究員)

筑波大学地球科学系 * (有) クリマテック

必要となるデータは計算後のフラックスデータであり、生データの重要性は薄れてきているといえる。

近年、データロガーの性能向上に伴い、ロガーの機能のみで乱流計測、分散・共分散計算が行えるようになってきている。本報告では、今回開発した可搬式地表面フラックス計測装置の仕様について記述し、また、その観測例も示す。今回の可搬式地表面フラックス計測装置の利点は以下に要約できる：

1. データサンプリング、データ処理、フラックス

計算を汎用データロガーが持つ機能を用いて行っているため、データ回収を除いて PC は必要ない。

2. データロガー、超音波風向風速計、紫外線湿度変動計ともに 12 V 電源で稼働するため、商用電源が必要なく、僻地あるいは海外でもそのまま使用可能である。

3. 超音波風向風速計・紫外線湿度変動計・コントロールモジュールがそれぞれ非常にコンパクトであり、設置時間・設置面積共に節約できる。

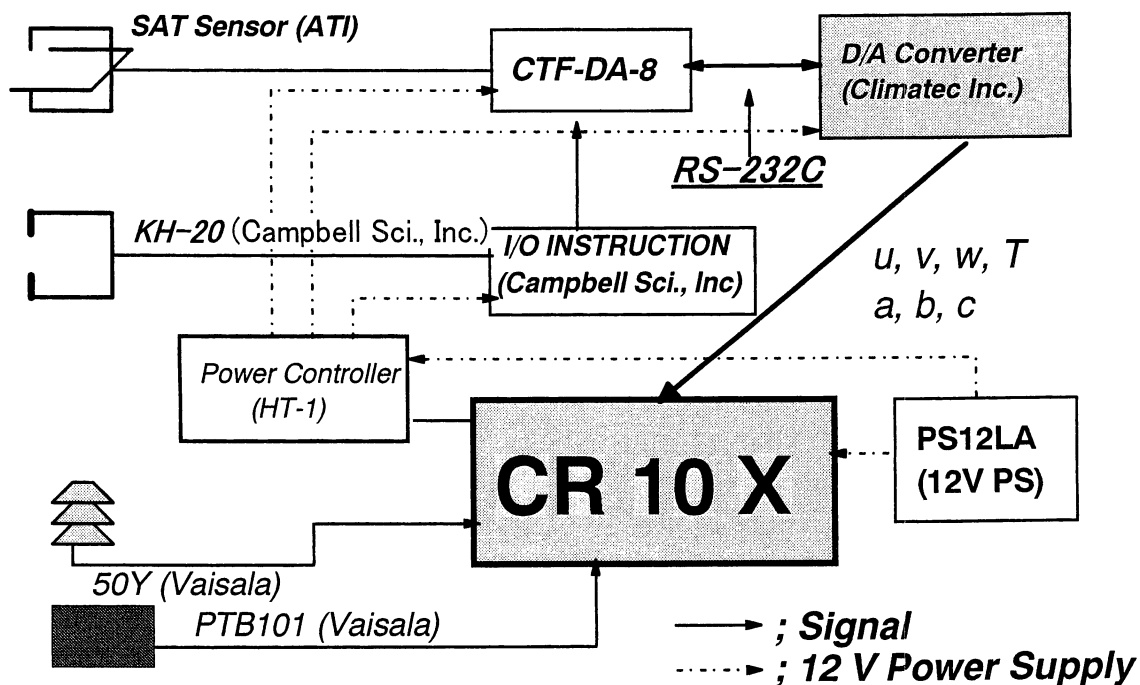


図 1 可搬式地表面フラックス計測システム概要

u, v は風速の水平成分, w は風速の鉛直成分, T は気温, a, b はプローブの傾き(ピッチ&ロール), c は KH-20 の出力

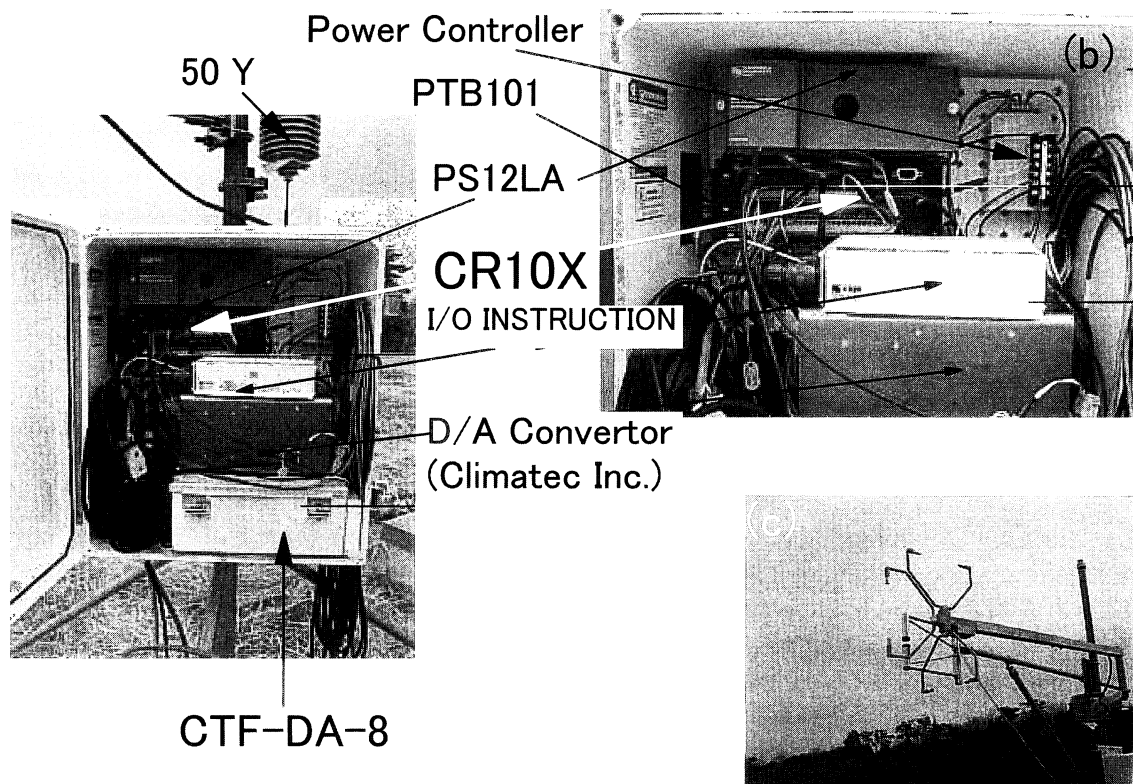


図2 システム設置例

(a) ボックス内部 (b) ボックス上部拡大 (c) センサー部分

表1 可搬式地表面フラックス計測システム
使用観測機器一覧

センサー、機器名	メーカー名	型番等
3次元超音波風速計	Applied Technologies Inc.	SATI 3K
Data Packer	Applied Technologies Inc.	CTF-DA-8
紫外線水蒸気測定器 (Krypton Hygrometer)	Campbell Sci., Inc.	KH-20
KH-20 入出力装置	Campbell Sci., Inc.	I/O INSTRUCTION
D/A 変換器 (CR10X にデータをアナログで送るため)	Climatec Inc.	
汎用データロガー	Campbell Sci., Inc.	CR10X
12V バッテリー (充電機能付き)	Campbell Sci., Inc.	PS12LA
パワーコントローラー	ほくさん	HT-1
温湿度センサー	Vaisala	50Y
気圧計	Vaisala	PTB 101

II システム概要

地表面フラックス計測システムの概要および使用観測機器一覧をそれぞれ図1、表1に示す。本システムでは、超音波風向風速計には Applied Technologies, Inc. (ATI) 社製、紫外線水蒸気変動

計には Campbell 社製のものをそれぞれ使用している。それぞれのセンサーから送られてくるデジタル信号線は ATI 社製の Data Packer である CTF-DA-8 で処理（紫外線水蒸気変動計のデータは Campbell 社製の I/O INSTRUCTION を通過し CTF-DA-8 に接続）され、シリアルケーブル（RS-232C）を通じて Climatec 社製の D/A コンバーターでアナログデータ化される。シリアルケーブル経由のデジタル信号は後述するように分岐することが可能であり、必要であれば生データを PC を用いて取得することが出来る。アナログ化されたデータ（u, v, w, T, a, b, c; u, v はそれぞれ風速の水平成分, w は風速の鉛直成分, T は気温, a, b はプローブの傾き（ピッチ[縦ずれ]とロール[横ずれ]）, c は KH-20 のシグナル）は汎用データロガーである Campbell 社製 CR-10X に 0.125 秒間隔（8 Hz、

CR-10X の仕様上、1 秒以下のサンプリングは $1/n$ 倍 [n は整数, e.g., $1/2, 1/4, 1/8, \dots$] でのみ可能でサンプリングされ、CR-10X 内で統計量計算 (平均, 分散, 共分散) が行われる。また、このシステム以外で微気象要素 (正確な空気密度・気化熱算出に必要なデータ) が計測されない場合を考慮し、温度・湿度 (50Y, Vaisala), 大気圧 (PTB 101, Vaisala) も同時に計測できるようになっている。

本システムの電源供給はソーラーパネルにより充電されている 12V バッテリー (PS12LA) で行われ、商用電源は一切用いられていない。しかし、必要に応じてソーラーパネルの代わりに商用電源を用いてバッテリーを充電しながら使用することも可能である。また、センサーへの電源供給はパワーコントローラーを用いて制御可能で、例えば夜間のデータが必要でない場合には、超音波センサー部分 (ATI, KH-20) のみ電源を落とすことで電力消費を押さえることが可能である。パワーコントローラーの制御は CR-10X で行っており、今回のデータロガープログラムでは "F1" のフラグの On/Off で電源供給を制御する (フラグの On/Off の PC 側での制御方法は CR-10X 用のソフトウェアによって

異なる。MS or PC-DOS Version の "PC-208E" に関しては、"Real Time" の "monitor" を選択し、"F1" ボタンを押すことで電源のコントロールが可能。詳しくは Campbell Sci., Inc. (1987) を参照。Windows 3.1/95/98/NT Version の "PC-208W" に関しては、"Connect" ボタンをクリックし、本観測の station を選択し、"Connect" ボタンをクリックする。接続を確認後、"NumericDisplay" タブをクリックし、"Ports/Flags" ボタンをクリックする。その後、Flag1 をクリックすることで電源コントロールが可能。詳細は Campbell Sci., Inc. (1997b) を参照されたい。実際には、50W のソーラーパネル + 100Ah 程度のバッテリーを使用することによって無電源 (観測地の日照時間に依存) で連続運用することが可能である。

図 1、表 1 よりシステムは非常に大きいものであると思われるが、実際にはそれぞれのコンポーネントは非常にコンパクトであり、Campbell 社製の収納箱 (ENC16/18, 406mm × 457mm) に全てが収まる (図 2 (a))。また、CTF-DA-8 は防水仕様であり、大容量バッテリーを追加する場合にはこれを外に設置することで対応できる。

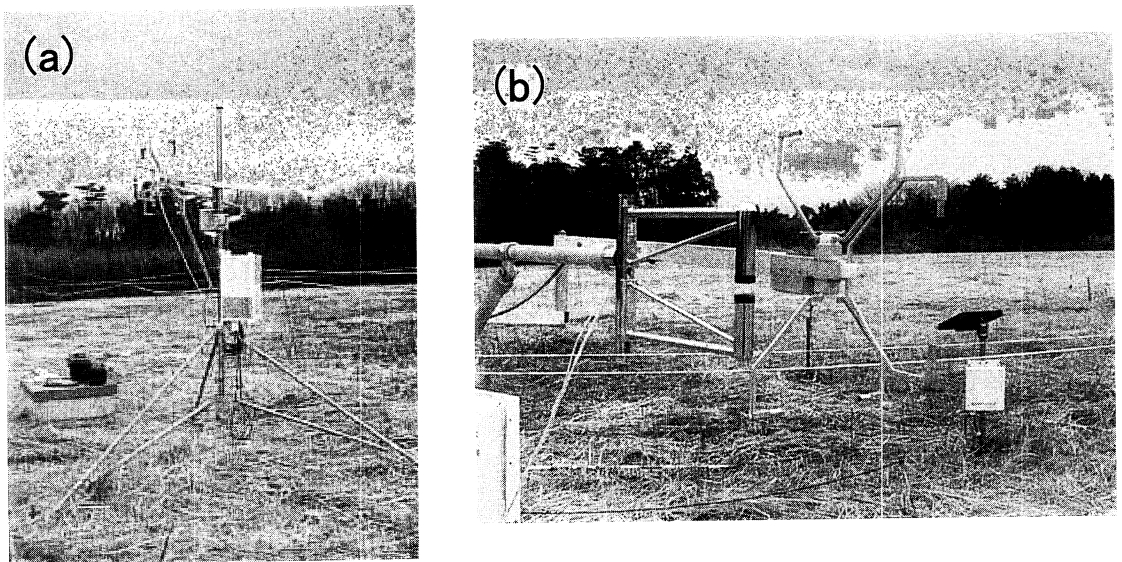


図 3 筑波大学水理実験センター熱収支・水収支観測圃場での観測例

(a) システム全体図 (b) センサー部分拡大図
左側が紫外線水蒸気変動計、右側が超音波風速・温度計

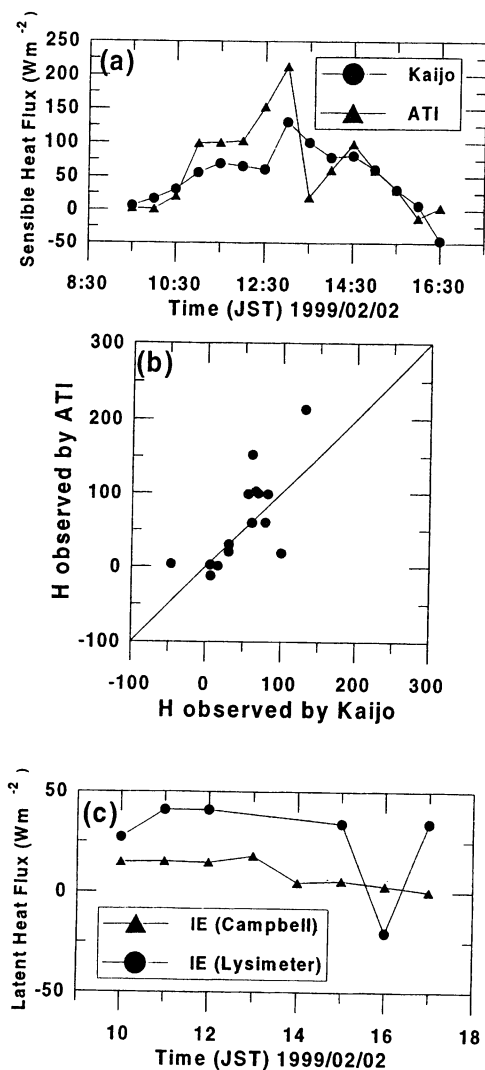


図4 1999年2月2日の観測データの比較

- (a) 水理実験センタールーチン観測データ(Kaijo)と本観測システム(ATI)の顕熱フラックスの日変化
- (b) 水理実験センタールーチン観測データ(Kaijo)と本観測システム(ATI)の顕熱フラックスの比較
- (c) 水理実験センタールーチン観測データ(Lysimeter; ウェーイングライシメータによる観測値)と本観測システム(Campbell)の潜熱フラックスの日変化。本観測システムデータは1時間平均値に再計算

Ⅲ 実際の運用例

Ⅲ. 1 筑波大学・水理実験センター熱収支・水収支観測圃場

本観測システムの試験観測が1999年2月2日～2月3日の2日間、筑波大学水理実験センター熱収支・水収支実験圃場で行われた。設置された様子(全体像)を図3(a)、センサー部分の拡大を図3(b)に示す。地表面は草刈り後の枯れ草で覆われており、2日はほぼ快晴、3日は晴天であった。この実験圃場ではルーチン観測データが常に取りられており(鳥谷他, (1989), 新村・杉田(1998)), 今回の試験観測もルーチン観測データから得られる地表面フラックスとの比較を行う予定であったが、2日には観測測器のメンテナンス日と重なり、放射関係のデータ(短波放射・正味放射)を得ることが出来なかった。よって、2日に関しては樋口・杉田(1998)および樋口他(1999b)で得られる超音波風向風速計の30分平均値と本システムの観測値との比較を行った(図4(a), (b))。図中"Kaijo"がルーチン観測値,"ATI"が本システム観測値である。日変化の傾向は両者とも同じであるが、本システムデータの方が午前中やや過大評価してしまう傾向にある。しかしながら、今回の試験観測では超音波風向風速計を正確に設置していなかったこと(ピッチ・ロールがゼロに近づくように微調整する必要がある)や、冬季の観測であり、フラックス値そのものが非常に小さいため、それぞれの測器の測定誤差も相対的に大きくなると考えられる。また、紫外線水蒸気変動計から得られる潜熱フラックスと、ルーチン観測のライシメータの観測値との比較も行った(図4(c))。ルーチン観測値が1時間平均であるため、本システムデータも潜熱に関しては1時間平均に計算し直した。図中"IE (Campbell)"が紫外線水蒸気変動計で得られた潜熱フラックス,"IE (Lysimeter)"がライシメータの値である。この図より、顕熱フラックスとは対照的に潜熱フラックスは過小評価する傾向が見られる。しかしながらその差は 25 W m^{-2} であり、各測器の測定誤差に収まる程度である。

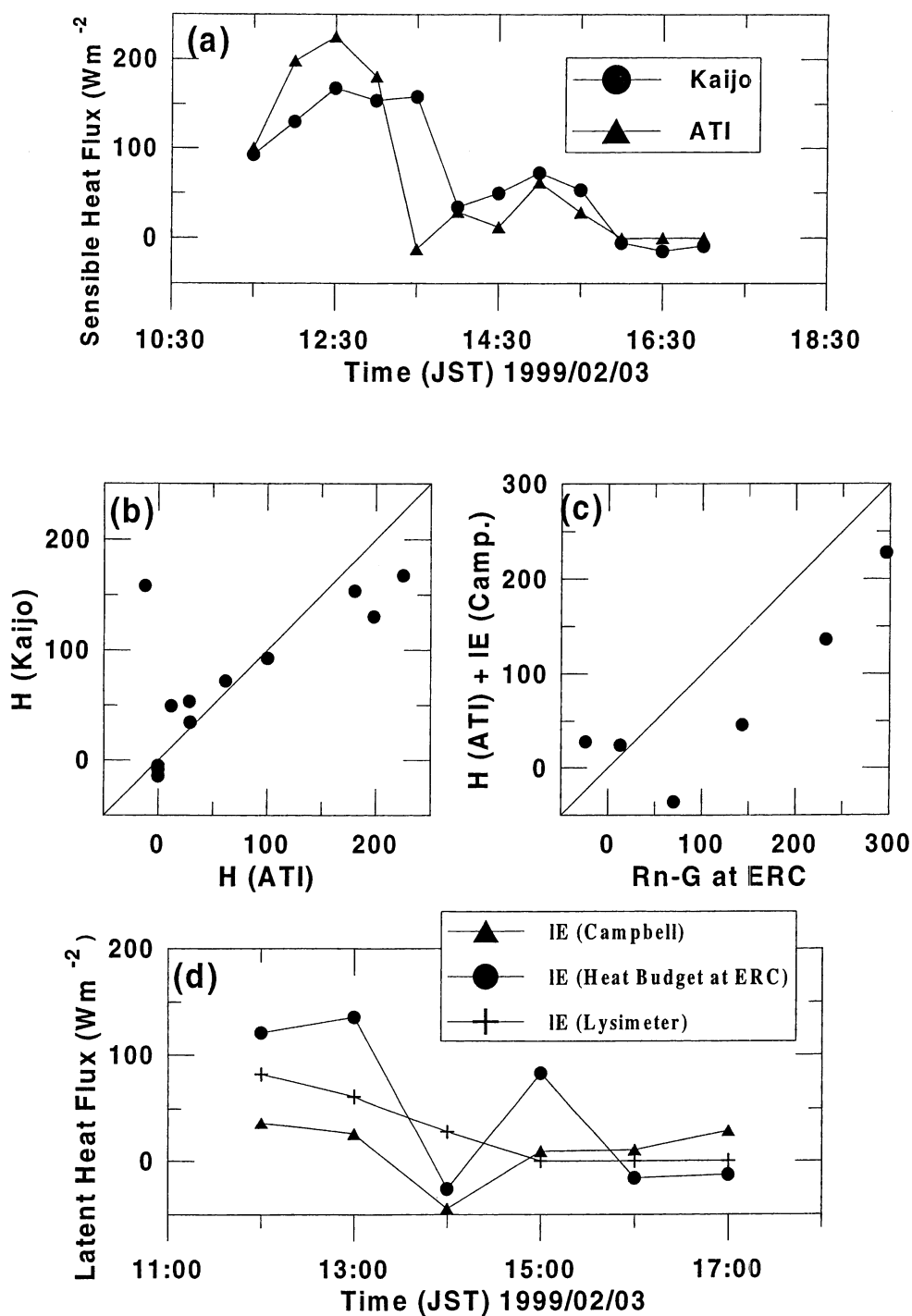


図5 1999年2月3日の観測データの比較

- (a) 水理実験センタールーチン観測データ(Kaijo)と本観測システム(ATI)の顕熱フラックスの日変化
 (b) 水理実験センタールーチン観測データ(Kaijo)と本観測システム(ATI)の顕熱フラックスの比較
 (c) 水理実験センタールーチン観測データによる有効エネルギー Q_n と、本観測システムでの顕熱フラックス+潜熱フラックスの比較
 (d) 水理実験センタールーチン観測データ(Lysimeter, Heat Budget at ERC; 熱収支式による残差)と本観測システム(Campbell)の潜熱フラックスの日変化

2月3日には放射要素のデータが取れ始め、2月2日のデータに加えて、熱収支式より得られる潜熱フラックスが得られるようになった。熱収支式より得られる潜熱フラックスは次式で計算される：

$$LE = Rn - G - H \quad (3)$$

ここで、 Rn は正味放射量 (Wm^{-2})、 G は地中熱流量 (Wm^{-2})、 H は渦相関法より得られる顕熱フラックス (Wm^{-2}) である。図5に2月3日のそれぞれのフラックス値の比較を示す。顕熱フラックス (30分平均) に関しては2月2日同様類似した傾向を示しており (図5(a))、散布図上 (図5(b)) では13時30分のデータを除いてほぼ1:1の直線に乗っている。一方、潜熱フラックス (1時間平均) に関してはそれぞれの手法で得られた値は異なっている (図5(d))。全体的な傾向として、熱収支式で得られた潜熱 (LE (Heat Budget at ERC)) が最も

大きく、次いでライシメーターの観測値 (LE (Lysimeter))、紫外線水蒸気変動計 (LE (Campbell)) の順で値が小さくなっている。熱収支式の残差から求めた潜熱フラックスとライシメーターのそれとの比較として、同じ実験圃場の観測例である Saigusa *et al.* (1998) や檜山他 (1993)・田他 (1994) が挙げられるが、近藤 (1998) は熱収支式より得られる潜熱フラックスの方がライシメーターのそれより約1.1倍大きいと見積もっている。今回の結果でも両者には同様の傾向が見られたが、紫外線水蒸気変動計で得られた潜熱フラックスは更にその値が小さい。原因は今のところ不明であるが、その理由として以下の2点が挙げられる；

- 1) 今回の試験観測の時期が冬季であり、潜熱フラックスの値そのものが小さく、それぞれの測定誤差に差が埋もれてしまう可能性がある。

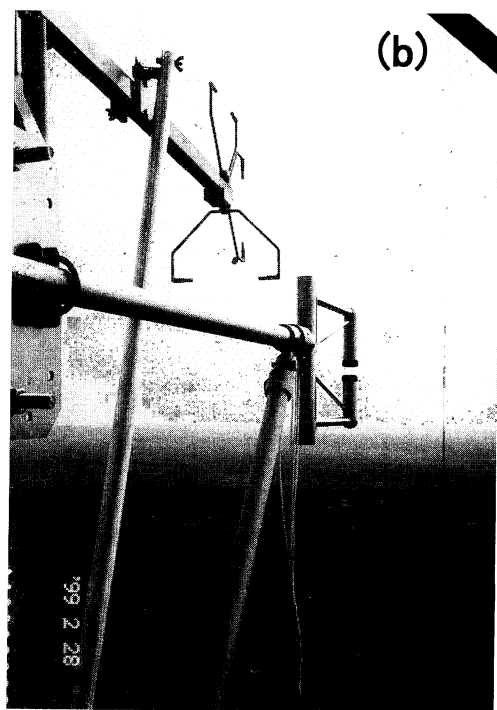
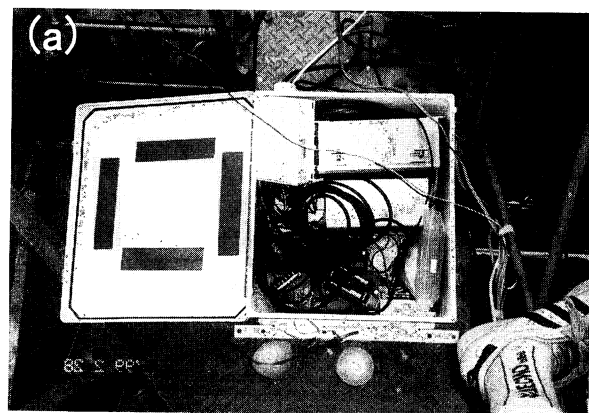


図6 タイ・モンスーン林での観測例
(a) タワーでのボックス内部の様子 (b) センサー部分の様子

2) 補足2でも触れるが、本システムで使用した紫外線水蒸気変動計はその観測環境によって係数を変更する必要がある、今回の観測では湿潤環境 (Wet Vapor Range) をカバーする係数を使用した。また、今回の解析ではその後の補正等を全く行っていない。補正を行うことによって、3者の差は縮まる可能性がある。

図5(c)に今回の地表面フラックス計測システムより得られた有効エネルギー ($Q_n \equiv Rn - G = IE + H$) とルーチン観測で得られるその比較を示す。ゼロ近傍2点のデータを除くと、2者の関係は；

$$H(ATI) + IE(Campbell) = 1.15(Rn - G) - 119.228 \quad (4)$$

となる。傾きがほぼ1であるのに対し、切片は約120であり、これは 120 W m^{-2} 本観測システムがフラックスを過小評価していることになる。この結果も今後の研究・評価課題ではあるが、これまで行われた研究・観測例でも、両者（独立して計測された潜熱+顕熱フラックス, Q_n ）との間で収支が閉じないことが示されてきており、様々な要因を考慮する必要がある。

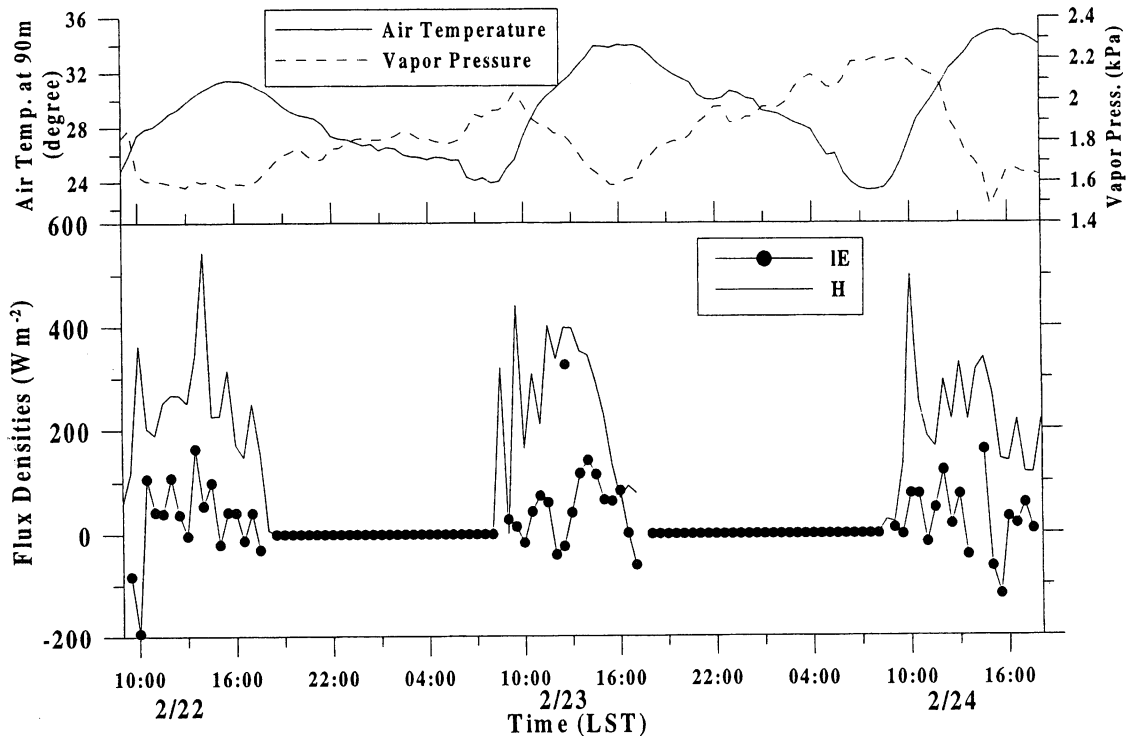


図7 タイ・モンスーン林での観測結果

上：気温・水蒸気圧の変動 下：タワー90m 部分で得られた顕熱・潜熱フラックス

Ⅲ. 2 タイ・モンスーン林での乾期の観測

GAME (GEWEX Asia Monsoon Experiment)の一環として、本システムをタイ・モンスーン林に設置した。観測期間は1999年2月15日～3月3日までの17日である。なお、観測目的・項目・概要等は樋口他(1999a)を参照していただきたい。図6に

タイ・モンスーン林での観測時の設置状況を示す。本システムは、現地の通信用タワーの上空90m部分に設置された。図7に計測されたフラックス例を示す。筑波大学水理実験センター熱収支・水収支観測圃場での観測とは対照的に、気温は日中常に30度を超え、また、降雨がほとんどないため高温・乾燥条件下にあった。地表面フラックスの日変化を見ると(夜間は落雷によるシステム破壊を防ぐため、超音波と紫外線水蒸気変動計のスイッチを切っている)顕熱フラックスが卓越しており、午後には 500Wm^{-2} をしばしば超える時が見られた。一方、潜熱フラックスは対照的に小さく、2/23日の正午の観測値を除くとほとんど 100Wm^{-2} 程度に収まっていた。このような潜熱・顕熱フラックスの対照性は、高温・乾燥条件下での地表面フラックスを比較的良く反映していると言える。また、図7では揭示しなかったが、観測期間中2度の降雨イベントがあり、その翌日には潜熱フラックスは 500Wm^{-2} 程度示したことを追記しておく(日中にはレンジオーバーのため[タイでの観測では赤外線水蒸気変動計の係数は Dry Vapor Range を使用。水蒸気環境の違いによる係数変更については補足2を参照]データロガー内部でのフラックス計算は不可能であった)。

システム概要でも述べたように、本システムはシリアルケーブル経由のデジタル信号を分岐させることが可能である。分岐させた RS-232 ケーブルを PC に接続することで、データロガーでデータのサンプリング・処理を行いながら、生データの取得が可能である。PC 側の通信設定を以下の様に設定すること(通信ソフトの種類は問わない。但し、生データをそのまま取り込むので、CPU 速度の早い PC (Penitum 程度が必要))で、データの所得が可能である:

- ・通信速度...9600bps
- ・パリティビット...Even
- ・データビット...7 bit
- ・ストップビット...1 bit
- ・フロー制御...None

U-00.05	V 00.36	W 02.29	T 25.84	a 0141	b-4105	c 1625	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.04	V 00.54	W 02.31	T 25.62	a 0141	b-4105	c 1625	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.16	V 00.47	W 02.37	T 25.62	a 0141	b-4105	c 1626	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.31	V 00.06	W 02.56	T 25.69	a 0141	b-4105	c 1626	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.31	V 00.31	W 02.63	T 25.50	a 0141	b-4105	c 1626	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.43	V 00.74	W 02.59	T 25.57	a 0141	b-4105	c 1625	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.19	V 00.20	W 02.83	T 25.54	a 0141	b-4105	c 1624	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.02	V 00.73	W 02.31	T 25.63	a 0141	b-4105	c 1623	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.26	V 00.53	W 02.69	T 25.62	a 0141	b-4105	c 1621	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.18	V 00.46	W 02.69	T 25.57	a 0141	b-4105	c 1620	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.04	V 00.30	W 02.29	T 25.37	a 0141	b-4105	c 1621	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.45	V 00.45	W 02.76	T 25.42	a 0141	b-4105	c 1619	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.38	V 00.21	W 02.20	T 25.45	a 0141	b-4105	c 1618	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.15	V 00.34	W 02.41	T 25.51	a 0141	b-4105	c 1618	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.05	V-00.17	W 02.83	T 25.37	a 0141	b-4105	c 1617	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.15	V 00.06	W 02.34	T 25.13	a 0141	b-4105	c 1616	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.48	V 00.01	W 02.56	T 25.33	a 0141	b-4105	c 1616	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.23	V 00.21	W 02.93	T 25.53	a 0141	b-4105	c 1616	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.19	V 00.12	W 02.44	T 25.34	a 0141	b-4105	c 1616	d 0001	e 0000	f 0000
U-00.51	V 00.37	W 02.29	T 25.30	a 0141	b-4105	c 1616	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.54	V-00.15	W 01.82	T 24.72	a 0141	b-4105	c 1616	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.45	V 00.57	W 02.42	T 25.58	a 0141	b-4105	c 1615	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.28	V 00.31	W 02.47	T 25.29	a 0141	b-4105	c 1616	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.28	V 00.47	W 02.52	T 25.12	a 0141	b-4105	c 1617	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.32	V-00.10	W 02.44	T 25.64	a 0141	b-4105	c 1619	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.02	V 00.50	W 02.59	T 25.49	a 0141	b-4105	c 1620	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.09	V 00.71	W 02.26	T 25.30	a 0141	b-4105	c 1622	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.11	V 00.48	W 02.74	T 25.30	a 0141	b-4105	c 1626	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.16	V 00.28	W 02.73	T 25.42	a 0141	b-4105	c 1628	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.00	V 00.37	W 02.72	T 25.57	a 0141	b-4105	c 1630	d 0000	e 0000	f 0000
U-00.08	V 00.09	W 02.49	T 25.62	a 0141	b-4105	c 1632	d 0000	e 0001	f 0000

図8 データパッカーより出力される生データの取り込み例

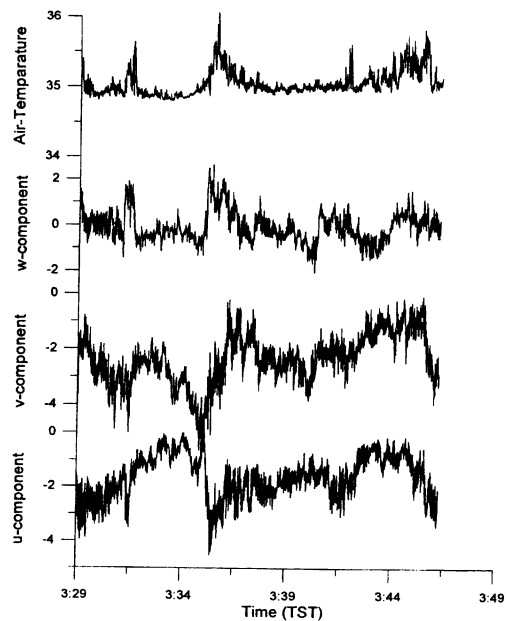


図9 生データの出力例。下からU成分、V成分、W成分、気温

生データの取り込み例を図8に示す。データ自身はASCII Formatなので、取り込み後プログラムを作成すれば生データの解析も可能である。タイでの観測期間中、Spikeと呼ばれるエラーデータが発生している（エラーデータが多く発生していると、PCで生データを所得している場合にはSpikeデータを削除・処理を行うことで補正が可能であるが、データロガー内で計算している場合計算結果が実際のフラックスと大きく異なる可能性がある）かどうかをチェックするため、約20分間、前述した方法で生データを抽出した。その結果を図9に示す。この期間ではu, v, w, T全ての要素でSpikeは検出されなかった。従って、データロガー内部で計算される地表面フラックスは少なくとも顕熱に関しては、PCで後で計算し直したフラックスと同じクオリティを持っていると言える。

IV おわりに

GCMやメソスケールでの大気モデルの発達に伴い、大気-陸面過程の検証データの重要性が増加してきている。これらの検証データは非常に少なく、データが必要な地域は電源が確保できないところが多い。本報文で紹介した地表面フラックス計測システムは商用電源がいらないという利点とともに、可搬性に優れていることを挙げることができる。実際、タイでの観測の際には、筑波大学から空港までの輸送の際、軽乗用車1台で全ての機材が運搬できた。この可搬性のよさは、海外での観測のみならず国内でのフラックス・乱流計測の観測可能範囲を広げるであろう。また、設置時間の短さは短期観測時の観測者の負担をより低減させることができる。筑波大学水理実験センター熱収支・熱収支実験圃場での試験観測の際には、2時間で全ての測器が設置終了し、すぐに観測が開始できる状態までセットアップできた。これは従来の乱流観測では考えられないほどの早さである。今後、本報文で紹介したような無電源で運営できるフラックス計測システムが更に増え、地球上の様々な地域での地表面フラックス観測データが増えることを期待したい。

補 足

1. 超音波風速計 (ATI) の設定

超音波風速計は非常に繊細な測器である。その取り扱いには細心の注意を払う必要がある。今回の測定システムで使用した超音波風速計の設定はシリアル通信を通じてチェックすることができる。なお、通信設定は前述したのと同じである。ここでは実際の設定をログファイルに従って説明する。

シリアル通信で接続すると、最初にデータが出力されてくるが（図8を参照）、"Esc"ボタンを押すことで以下の画面が表示される；

Applied Technologies Inc.
Data Packer
Version 1.41

- A. Serial Setup
- B. Analog Setup
- C. Calibrate Menu
- D. Restore Factory Defaults
- E. Current Settings
- F. Output Options
- G. Trigger Options
- Z. Factory Settings
- 0. Exit

この画面はData PackerのMain画面であり、ここでA. Serial Setupを選択すると以下の画面になる；

Applied Technologies Inc.
Data Packer
Version 1.41

Serial Setup Menu:

Channel 1:

- A. Change Channel
- B. Baud Rate

- C. Parity (On)
- D. Channel Type
- E. Missing Data Type
- F. Serial Pass Thru
- G. Assert Known State (Off)
- H. Reset Instrument
- 0. Main Menu

ここで、Channel 1 とは Data Packer につながれている測器を表し、今回の観測システムでは ATI 社の超音波風速計が接続されている。ここで F. Serial Pass Thru を選択することによって、超音波風速計の設定画面が表示される；

Applied Technologies Inc.
Sonic Anemometer/Thermometer
Version 1.20

Main Menu:

- A. Output Options
- B. Sampling Options
- C. Trigger Options
- D. Calibration
- E. Current Settings
- F. Reset Factory Defaults
- Y. Analog Options
- Z. Factory Settings
- 0. Exit

ここで、A. Output Options を選択すると、データ出力に関する設定が得られる；

Applied Technologies Inc.
Sonic Anemometer/Thermometer
Version 1.20

Output Options Menu

- A. Baud Rate
- B. Parity (On)
- C. ASCII Output (On)
- D. Terse ASCII Output (Off)
- E. Binary Output (Off)
- F. Break Binary (Off)
- G. Output Cs (Off)
- H. Output Temp (On)
- I. Output Wind Speed & Direction (Off)
- 0. Main Menu

上記が今回の観測システムの出力設定である。データはテキスト (ASCII) 形式でのみ出力 (詳しくは図 8 参照) され、風向・風速の出力は行っていない。場合によっては出力させることが可能である。Main 画面に戻った後、B. Sampling Options を選ぶと、データサンプリングに関する Option が表示される；

Applied Technologies Inc.
Sonic Anemometer/Thermometer
Version 1.20

Sample Options Menu

- A. Median Filter (Off)
- B. Data Quality Algorithm (On)
- C. Shadow Correction Algorithm (On)
- D. Remove RH from Temp Calculation (Off)
- 0. Main Menu

ここで B. Data Quality Algorithm は出力値の中の Spike を取り除くアルゴリズムで今回の観測システムでは On になっている。また、C. Shadow Correction Algorithm は他のブームの影響で影になった場合の補正である。また、Main 画面に戻り C. Trigger Options を選択すると以下の画面が表示される；

Applied Technologies Inc.

Sonic Anemometer / Thermometer
Version 1.20

Trigger Options Menu

- A. External Triggering (On)
- B. Character Triggering (Off)
- C. Trigger Character (*)
- 0. Main Menu

ここで、A. External Triggering は超音波風速計の出力を他の観測測器と同期させたいときに On にする必要があります。今回の観測システムでは紫外線水蒸気変動計を用いたため On にしている。データの区切りに記号（例えば、* 等）を使用する場合には B. Character Triggering を On にする必要がある（今回の設定は区切り記号は無し）。現在の具体的な Setting 値は Main 画面に戻り、E. Current Settings を選択すると出力される（図10）。

本観測システムを設置する際には、超音波風速計

のキャリブレーションを行う必要がある。具体的には以下の様にして行う；

- A. 正確な気温・湿度が測れる測器（検定済みのアスマンが望ましい）を用意しておく。
- B. キャリブレーション直前に気温・相対湿度を測定しておく。
- C. シリアル通信で超音波風向風速計のMain画面に行き、D. Calibration を選択すると以下の画面が表示される；

Choice: Calibrate

Are you sure?

ここで、超音波風速計に付属している "Zero-Air Chamber"を用いて、キャリブレーションを行いたい軸を覆う。その後、B. で測定した気温・相対湿度を入力し、キャリブレーションを行いたい軸を入力 (u, v, w) し、しばらく待つと以下の画面が出る；

Applied Technologies Inc.
Sonic Anemometer / Thermometer
Version 1.20

Status Screen

Serial Number = 981102

Distance[0]	=	0.146356	[1]	0.146330	[2]	0.145514
WS_Offset[0]	=	1.282277	[1]	0.148784	[2]	-0.018851

SamplesPerOutput = 20 TicksPerSample = 0

Gamma_ZeroRH	=	402.434000	Gamma_Slope	=	0.040400
RH_Value	=	20	Calc_Gamma	=	403.242000

NumXDCRs	=	6	NumAxis	=	3			
Spike_Reset	Sample Count	=	100	Spike Parameter	=	65		
Max_Correct	=	0.84	Correct_Adjust	=	0.16	Correction_Angle	=	70

図 10 超音波風向風速計の設定値の出力例（出力方法は本文を参照）

Cal Temp C: 25.6

Cal RH: 12

Cal Axis (U,V,W):u

Performing Calibration.

Distance = 0.146667

Offset = -0.019036

distance と Offset 値が出力されればキャリブレーションは終了であり、その後"Esc"ボタンを押すことで Main画面に戻る。その後、残りの2軸に対しても同様にキャリブレーションを行えば終了である。

計測を再開する場合には、超音波風速計のMain画面で 0. Exit を選択し、さらに Data Packer の Main 画面に戻りそこで同じく 0. Exit を選択すれば、図8の出力が得られる。なお、表2にセンサー出力等の仕様を示す。

2. 紫外線水蒸気変動計 (KH-20 Krypton Hygrometer) の設定

赤外線水蒸気変動計から得られる出力は mV 値である。出力値は次式で共分散値に換算される（詳しくは Campbell Sci., Inc. (1997a) の Appendix 1 を参照のこと）；

$$\overline{w' \rho' v} = \frac{\overline{w(\ln Vh)} - \overline{w} \overline{\ln Vh}}{-kw} + \frac{ko}{-kw} (\overline{w \rho o} - \overline{w} \overline{\rho o}) \quad (5)$$

ここで、 ρv は水蒸気密度（絶対湿度）、 Vh は KH-20 の出力値、 w は超音波風向風速計より得られる鉛直成分の風速、 ko は酸素の吸収係数（=0.0045）、 kw および xkw は係数である。 kw と xkw は KH-20 に添付される "Campbell Scientific KH20 Calibration Sheet" に記述されているものを用いる

が、このシートにはほとんどのレンジをカバーする "Full Vapor Range ($2 - 19 \text{ gm}^{-3}$)"、乾燥した大気をカバーする "Dry Vapor Range ($2 - 9.5 \text{ gm}^{-3}$)"、湿潤な大気をカバーする "Wet Vapor Range ($8.25 - 19 \text{ gm}^{-3}$)" の3種類の係数が記述されている。Full Vapor Range よりも Wet, Dry の Vapor Range を使用した方が水蒸気密度の測定精度が上がる（約2倍程度異なる）。どの係数を使用するかは観測環境に依存するが、観測地域の微気象データがあれば事前に係数を決定できる。レンジを決定する絶対湿度 (absolute humidity; 近藤, 1994) は次式で計算される；

$$\rho w = \rho v = 0.2167(e/T) \quad (6)$$

ここで、 e は水蒸気圧 (hPa)、 T は気温 (K) である。観測地域の微気象データが無い場合、係数は "Full Vapor Range" を用いておき、数日の観測後温湿度計より得られる温度・水蒸気圧よりレンジを改めて設定する必要がある。

今回の観測システムで用いた紫外線水蒸気変動計はオープンパスと呼ばれるタイプのものであり、常に大気と接しているため水蒸気変動の高周波部分まで測定できる一方、常に大気に触れているためにセンサー部分の劣化が早いといわれている。センサー部分は超音波風向風速計同様非常に繊細であり、メンテナンスには細心の注意を払う必要がある。具体的には2日から3日に一度蒸留水で洗浄し、キムワイパー等できっちりとふき取ることである程度の汚れは取れる。しかしながら、中期～長期利用の際には再キャリブレーションが必要であり、メーカー側では12ヶ月に1度センサーのメンテナンス+再キャリブレーションを奨励している。

文 献

甲斐憲次・富田知宏・武井弘樹 (1994): ポータブル乱流フラックス測定システムについて. 筑波大学地球環境変化特別プロジェクト研究報告集, 2, 298-304.

表 2 センサー出力等の仕様

A). ATI SATI 3K 出力仕様

	測定範囲	分解能	精度
U,V,W	±20.00 m/s	0.01 m/s	0.05 m/s
T	-20 +50 °C	0.01 °C	0.05 °C

B). Data Packer出力仕様

出力数値： a ～ fは±2048 (bipolar)

C). 計測仕様

Input	Output	AX(mV) + B
Ch. (SE)		
Ch. 1-3	U,V,W	0.008
Ch. 4	T	0.008
Ch. 5,6	Pitch, Roll	0.02
Ch. 7	KH-20 (mV)	0.8
Ch. 8	Press	0.08
Ch. 9	Air_Temp.	0.1
Ch. 10	RH	0.001

D). D/A 変換器仕様

1) 基本仕様

DAC部はアナログデバイス社AD7237ABN採用
アナログ出力最終段にはオペアンプOP482配置
DAC : 分解能12 Bit (2048)
相対精度：1/2 LSB
電圧出力セトリング時間：8 μS
アナログ出力：8 Channel
リファレンス電源：5V 内部リファレンス、
または外部リファレンス
消費電流：350 mA (基本構成) 又は250 mA
使用温度範囲：0 °C ～ 50 °C

2) 出力精度

出力ビット：符号付き12 Bit
出力電圧：±2500 mV
分解能：1.22 mV
総合出力精度：±2.5 mV (分解能+1 Digit)

3) 変換速度

100 msec 以下

E). 計算精度

1) U,V,W

D/A 変換精度...2.5 mV, よって出力精度は
20 m/s × (±2.5mV/2500mV) = ± 0.02 m/s

2). T

20 °C × (±2.5mV/2500mV) = ± 0.02 °C

3). Pitch, Roll

50 deg. × (±2.5mV/2500mV) = ± 0.05 deg.

4). CR10X の入力精度

入力レンジ：±2500 mV
分解能：0.666 mV (Single Enabled)
精度：0.2 % (Full Temperature Range)
(±5 mV for ± 2500 mV Range)
0.1 % (0 - 40 °C)
(± 2.5 mV for ±2500 mV Range)

- 近藤純正(1994):水環境の気象学-地表面の水収支・熱収支-. 朝倉書店, pp. 348.
- 近藤純正(1998):種々の植生地における蒸発散量の降水量および葉面積指数への依存性. 水文・水資源学会誌, 11, 679-693.
- 玉川一郎(1999):超音波風向風速計と赤外線湿度変動計を用いた渦相関法による乱流輸送量測定の解析法の検討. 水文・水資源学会誌, 12, 130-138.
- 田少奮・檜山哲哉・杉田倫明(1994):ウエイングライシメーターによる蒸発散量のバラツキの原因とその改善について. 筑波大学水理実験センター報告, 19号, 57-62.
- 鳥谷均・川村隆一・嶋田純・谷口真人・西本貴久(1989):気象日報作成装置新システムについて. 筑波大学水理実験センター報告, 13号, 147-158.
- 樋口篤志・杉田倫明(1998):筑波大学水理実験センター熱収支・水収支観測圃場における特別観測用データ収録システムについて. 筑波大学水理実験センター報告, 23号, 91-94.
- 樋口篤志・杉田倫明・檜山哲哉・戸田求・大手信人・Panya Polson (1999a):熱帯モンスーン林での乾期の大気境界層観測(第1報). 日本水文科学会講演予稿集, 13. 68-71.
- 樋口篤志・杉田倫明・飯田真一(1999b):筑波大学水理実験センター水収支・熱収支観測圃場における, 新・特別観測用データ収録システムについて. 筑波大学水理実験センター報告, 24号, (135-141)
- 檜山哲哉・杉田倫明・三上正男(1993):ウエイングライシメーターと熱収支法による潜熱フラックスの比較. 筑波大学水理実験センター報告, 18号, 41-53.
- 新村典子・杉田倫明(1998):熱収支・水収支観測資料-1997年-. 筑波大学水理実験センター報告, 23号, 103-136.
- Vaisala(1996):取扱説明書, PTB101シリーズ. PTB 1001-U212en-1.1, June 1996.
- Aoki, M., T. Chimura, K. Ishii, I. Kaihotsu, T. Kurauchi, K. Musiake, T. Nakaegawa, N. Ohte, P. Panya, S. Semmer, M. Sugita, K. Tanaka, O. Tsukamoto, and T. Yasunari (1998): Evaluation of surface fluxes over a paddy field in tropical environment: Some findings from preliminary observation of GAME. *J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.*, 11, 39-60.
- Applied Technologies, Inc. (ATI) (1998): Operators manual for a sonic anemometer/thermometer model sati/3k. Rev. F, *Applied Tech., Inc.*, Longmont, Colorado.
- Applied Technologies, Inc. (ATI) (1998): Operators manual for a data packer model PAD 401. Rev. A, *Applied Tech., Inc.*, Longmont, Colorado.
- Campbell Scientific, Inc.(1987): PC208 datalogger support software instruction manual. *Campbell Sci., Inc.*, Logan, UT.
- Campbell Scientific, Inc.(1989): KH20 krypton hygrometer. Rev. 11/89, *Campbell Sci., Inc.*, Logan, UT.
- Campbell Scientific, Inc.(1997a): Eddy covariance system operator's manual CA27 and KH20. Rev. 3/97, *Campbell Sci., Inc.*, Logan, UT.

Campbell Scientific, Inc.(1997b): PC208W Ver. 2 software instruction manual. *Campbell Sci., Inc.*, Logan, UT.

Campbell Scientific, Inc.(1997c): CR10X measurement and control module operator's manual. Rev. 5/97, *Campbell Sci., Inc.*, Logan, UT.

Saigusa, N., T. Oikawa, and S. Liu(1998): Seasonal variations of the exchange of CO₂ and H₂O between a grassland and the atmosphere: An experimental study. *Agric. For. Meteorol.*, **89**, 131-139.