

第 9 章

各種プロジェクトにおけるフラックス測定

宮崎 真,¹ 杉田倫明,¹ 安成哲三,¹ 鈴木力英,²
石川裕彦,³ 田中賢治,⁴ 山本 晋,⁵

9.1 GAME/AAN

9.1.1 はじめに

ユーラシア大陸は、地球上で最も大きな大陸で、気候システムにおける地球規模の地表面でのエネルギーの交換や輸送の季節サイクルに対して大きな役割を果たしている。様々な地表面、植生があることによって、大陸上の地表面の顕熱や潜熱フラックスが季節的にも空間的にも大きな変化をしている。そして、これが大陸上の季節サイクルに局地性をもたらしていると考えられる。地表面の放射収支は顕熱や潜熱フラックスに対する主な強制力であり、気候システムの季節進行に対する強制力として必要不可欠な役割を果たしている。これらの要素は、東アジア大陸においては、冬と夏のモンスーンに対する

海陸の加熱コントラストの役割を明らかにする為には特に重要である。人間活動による土地利用や土地被覆の変化は地表面の熱、水収支を変化させ、局地スケールはもちろん大陸スケールの気候も変化させる可能性がある。東アジア大陸には、地上気象観測所のネットワークが、これまでも相当に密にあり、それぞれの国の気象庁によって維持されてきた。アジア地域においては、これらの既存観測所のデータを用いて地表面の放射収支、熱収支を間接的方法によって算出したものしかなかった (Budyko *et al.*, 1954 他)。長期にわたって、放射収支や熱収支を直接観測しているところは、いくつかの微気象観測所を除いては、ほとんどなかった。大陸スケールでの地表面熱収支や地表面状態 (アルベド、土壌水分、植生など) の長期的なモニタリングは、大陸スケールでの近年の気候変動 (例: シベリアやモンゴルでの急激な温暖化など) の物理過程を明らかにする為の鍵になる情報を我々に提供してくれると考えられる。(以上, GAME-ISP, 1998)

全球エネルギー・水循環観測計画 (Global Energy and Water cycle EXperiment, GEWEX) の一環として、GEWEX アジアモンスーン観測計画 (GEWEX Asian Monsoon EXperiment, GAME)

¹筑波大学地球科学系
(shin@erc2.suiri.tsukuba.ac.jp,
sugita@atm.geo.tsukuba.ac.jp,
yasunari@atm.geo.tsukuba.ac.jp)

²地球フロンティア研究システム
(riki@bosai.go.jp)

³京都大学防災研究所
(ishikawa@storm.dpri.kyoto-u.ac.jp)

⁴京都大学防災研究所
(tanaka@wracs.dpri.kyoto-u.ac.jp)

⁵経済産業省資源環境技術総合研究所
(yamas@nire.go.jp)

プロジェクトが現在実行中である。GAMEの目的は、全球におけるアジアモンスーンの役割の理解と、アジアモンスーンパターンの水資源のシミュレーション、季節予報の改善である。GAMEのサブプロジェクトの一つとして、GAMEアジア地域熱収支自動観測ネットワーク (Asian Automatic weather station Network, GAME-AAN) がある。GAME-AANの主な目的は、モンスーンアジアにおける南北及び東西方向の線に沿った地表面における放射収支と熱収支をモニタリングすることである。GAME-AANで得られた観測結果は、衛星から得られた地表面状態の検証や、様々な気候における地表面過程のモデリングに大きく貢献すると考えられる。現在の地表面観測の不足を補う為に、地上気象観測のネットワークを構築することは重要である。このようなネットワークの構築は、GAMEの研究活動の一環として大陸スケールの運動量、熱、放射の地表面フラックスや土壌水分量の季節変化や年々変動を観測したり、検出したりすることにも役立ち、また、砂漠化の様な局地的環境問題や気候への、土地利用や土地被覆の変化の影響を明らかにする事に貢献すると考えられる (以上、GAME-ISP, 1998)。

9.1.2 GAME-AANによる各種フラックス観測

GAME-AANには、大きく分けて放射フラックスをモニタリングする班と熱・水フラックス観測班とに分かれている (GAME-AAN homepage: <http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/Project/aan/aan.html> 参照)。

まず放射フラックス班では、アジア域における地表面放射収支観測と衛星を使った同地域の放射収支を利用して、同地域の放射収支場が雲、水蒸気、エアロゾル、地表面状態によってどのように決定されているかを調査している。観測サイトはタイ Si-Samrong (Sukhothai 近郊) と中国

Shou-Xian で行われている。ここでは、全天日射計、赤外放射計、直達日射計、スカイラジオメータを設置して、BSRN (Baseline Surface Radiation Network, WCRP 基準地表面放射収支ネットワーク: 大村, 1997) 準拠の高精度放射収支の測定が行われている。(以上、中島他, 1998)

次に熱・水フラックス観測班では、図9.1.1に示した16地点において、1996年の秋より自動気象観測装置 (AWS) を展開し始めた。そのうち2地点 (MS3478, MS3637) はGAME-IOP期間中 ('98年4月-9月) のみ観測を行っていたが、現在は周辺の別の地点へ移動した。GAME-AANで用いられているAWSは、地域によって異なっている。最も多くの5地点で用いられているのが、米国NCAR (National Center for Atmospheric Research) 製のPAMIII (Portable Automated Mesonet III: Miltzer *et al.*, 1995) である。PAMIIIはArvaikheer (モンゴル, 半乾燥, 草原: station catalog: http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/Project/aan/dataset/aan_dataset_arvaikh.html), Linze (中国, 乾燥, 砂漠), Toutouhe (中国, チベット高原, 草原), Shou-Xian (中国, 温暖湿潤, 水田: 田中他, 1998; station catalog: http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/Project/aan/dataset/aan_dataset_shxn.html), Tak (タイ, 熱帯, 灌木林: 戸田他, 1998; station catalog: http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/Project/aan/dataset/aan_dataset_tak.html) で稼動している。PAMIIIでは、表面温度 (赤外放射温度計: IRT), 風向・風速及び気温, 湿度のプロファイルの測定, 3次元超音波風速温度計と温湿度計を用いて、運動量, 熱, 水蒸気の地表面乱流フラックスを渦相関法及びバンドパスコバリエンス法 (Horst and Oncley, 1995; Horst *et al.*, 1997; Aoki *et al.*, 1998) を適用して算出している。また、長波, 短波放射量の上向きと下向き, 日射量, 正味放射量, 地中熱流量および地温, 土壌水分のプロファイルを測定している。PAMIIIの測定項目, 測定高度, および使用している測器, データロガー, 電源について

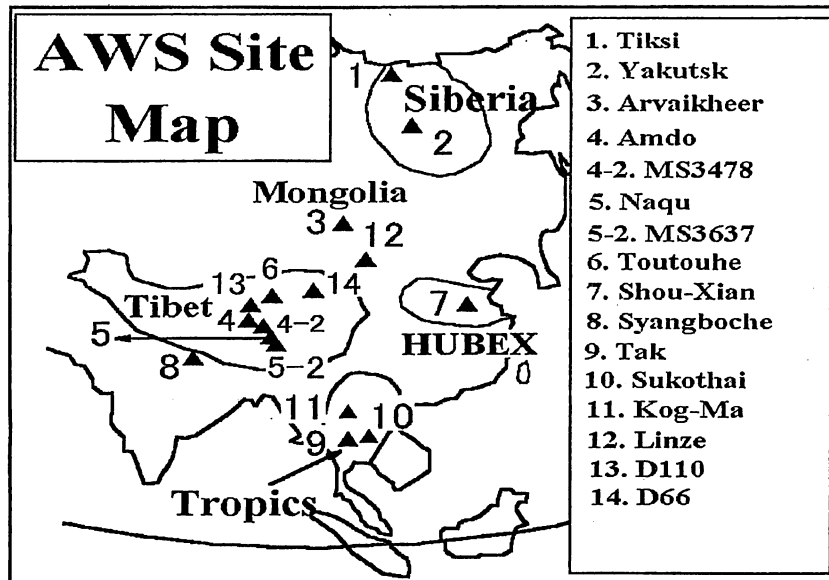


図 9.1.1: GAME-AAN 自動気象観測装置の展開状況

ての一覧を表 9.1.1 に示す。さらに PAMIII の特徴として、静止気象衛星ひまわり (GMS) を介して、これらのデータをリアルタイムで転送する機能がある (9.2 節)。現在、モンゴルでのみ、このデータ転送を行っているが、他の地点への展開も準備中である。また、Shou-Xian は、電話回線によるモニタリングを行っている。

シベリアでは、ACOS (Automatic Climate Observation System) と呼ばれる、白山工業製の低温で雪の多い地域に適した自動気象観測装置を使用している。Tiksi (ロシア、ツンドラ: 兒玉他, 1998; station catalog: http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/Project/aan/dataset/aan_dataset_tiksi.html) では 10 m のタワーで、風速、気温、湿度のプロファイル、風向、気圧、下向き・上向き短波放射量、下向き・上向き長波放射量、正味放射および地温、土壤水分のプロファイルを測定している。また、集中観測時には超音波風速温度計と、赤外線湿度変動計のデータから、運動量、熱、水蒸気の乱流フラッ

クスは渦相関法を適用して算出する。Yakutsk (ロシア、タイガ、森林: 太田, 1998; station catalog: http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/Project/aan/dataset/aan_dataset_taiga.html) では、32 m のタワーを建て、風速、温湿度のプロファイル、樹幹上、林庄上での下向き・上向き短波放射量、下向き・上向き短波放射量、正味放射量、地中熱流量、地温、土壤水分量が計測されている。集中観測時には超音波風速温度計を用いて顕熱フラックス、運動量フラックスを測定している。ACOS の測定項目、測定高度、および使用している測器の一覧を表 9.1.2 に示す。

チベット高原では、上述の PAMIII の他に、Amdo (草原) には 14 m の高さの PBL (Planetary Boundary Layer) タワーが設置された (9.3 節、石川他, 1998)。PBL タワーの測定項目、測定高度、および使用している測器の一覧を表 9.1.3 に示す。その他には、D110, D66, Toutouhou, Naqu (MS3608) (全て草原) に、HEIFE (HEIthe river

表 9.1.1: PAMIII の観測項目 (単位), 測定範囲, 測定高度, 使用している測器, データ記録装置, 電源の一覧 (各地点ごとの項目や測器, 測定高度の有無は○と空欄で示してある)。③: モンゴル, Arvaikher, ④ (④-2) 中国, Linze (チベット, MS3478), ⑥ (⑤-2) 中国チベット Toutouhe (チベット, MS3637), ⑦中国, Shouxian, ⑨タイ, Tak

観測項目	測定範囲	単位	測定高度	使用している測器	③	④ (④-2)	⑥ (⑤-2)	⑦	⑨	
正味放射量		W/m ²	+1.5m	REBS, Q7	○	○	○			
			+2.5m				○			
			+5, +32m					○		
短波放射量(上向き・下向き)		W/m ²	+1.5m	Eppley PSP	○					
				Kipp & Zonen CM21		○				
				LICOR LI200SA	○	○	○			
			+2.5m	Kipp & Zonen CM21				○		
		LICOR LI200SA					○			
	+5m, +30m	Kipp & Zonen CM21					○			
長波放射量(上向き・下向き)		W/m ²	+1.5m	Eppley PIR	○	○				
			+2.5m					○		
			+5m, 30m						○	
降水量		mm	+1m	ETI NOAA-II Weighing gauge Tipping Bucket Gauge, Hydro-TB3.8	○	○	○		○	
気圧	500 1100	hPa	+2.3m	Valisara PTB220	○	○	○	○	○	
風速	0~60	m/s	+9.8m	R.M.Young 09101	○	○	○			
			+11.5m					○		
			+20, 30, 90m						○	
			+45, 70, 110m		牧野 AG750					○
風向	0~360	°	+9.8m	R.M.Young 09101	○	○	○			
			+11.5m					○		
			+20, 30, 90m						○	
気温・相対湿度	-40~ +60°C, 0~ 90%	°C %	+2.3, 5.6, 7.8m	Vaisala 50Y (通風及び放射シールドはNCAR製のものを使用)	○	○				
			+2.3, 5.6m					○		
			+3.4, 9.2, 11m						○	
			+20, 45, 60, 90m						○	
	+20, 35, 55, 60, 75, 110m	Vaisala HMP-35A						○		
表面温度	-40~ +60°C	°C	+1.5m	EVEREST 4000. 4GL	○					
			+9.8m			○	○			
			+11.2m						○	
			+30m							○
地温	-20~ +45°C	°C	-0.03m	REBS STP-1 Pt	○					
			-0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 1.0			○				
			1.8m							
			-0.05, 0.1, 0.2m						○	
			-0.1, -0.3, -0.6, -0.9m							○
	-0.01, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7m							○		
地中熱流量		W/m ²	-0.05m	REBS HFT3. 1	○	○	○	○	○	
顕熱 flux 潜熱 flux		W/m ²	+7.8m	GILL R3A + Vaisala 50Y (通風及び放射シールドはNCAR製のものを使用)	○					
			+5.6m			○	○			
			+9.5m						○	
			+60m							○
土壌水分量	0-70%	%	-0.05, -0.1, -0.2, -0.4, -0.7, -0.95	IMKO TRIME-MUX6 (TDR 土壌水分計)	○					
			-0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 1.0			○				
			1.8m							
			-0.05, 0.1, 0.2m						○	
			0~-0.3, 0.3~-0.6, 0.9~ 1.2m		Campbell CS615 (TDR 土壌水分計)					○
	-0.01, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7m							○		
水温		°C	+0.0m	KADEC-US					○	
水位		cm	+0.0m	池田 KWH-4PHT					○	
データ記録装置				EVE data System, Campbell CR10X, MUX416	○	○	○	○	○	
電源				太陽電池パネル (SolarexMSX64(60W × 4)+バッテリー プロパンガス発電機 (Global Thermo. Electornic 5060型)	○	○	○	○	○	

表 9.1.2: ACOSの観測項目(単位), 測定範囲, 測定高度, 使用している測器, データ記録装置, 電源の一覧(各地点ごとの項目や測器, 測定高度の有無は○と空欄で示してある)。①ツンドラ, Tiksi, ②タイガ, Yakutsuk。括弧内の測器は集中観測時のみ測定

観測項目	測定範囲	単位	測定高度	使用している測器	①	②
正味放射量		W/m ²	+2m	REBS, Q7	○	
			+2, 32m			○
短波放射量(上向き・下向き)		W/m ²	+2m	英弘 MS-801F	○	
			+2, 32m			○
長波放射量(上向き・下向き)		W/m ²	+2m	Eppley PIR	○	
			+2, 32m			○
降水量		mm	+1m	ETI NOAA-II Weighing gauge	○	○
気圧	500~1100	hPa	+2.0m	Valisara PTB220	○	○
風速	0~60	m/s	+10m	牧野 AF860	○	
			+2, 6, 24, 32m			○
風向	0~360	°	+10m	牧野 VR236	○	
			+2, 6, 24, 32m			○
気温・相対湿度	-40~+60℃, 0-90%	℃ %	+2.4m, +10m	Vaisala HMP35D	○	
			+2, 6, 24, 32m			○
表面温度	-40~+60℃	℃	+0.5m	EVEREST 4000. 4GL	○	
			+32m			○
地温	-20~+45℃	℃	-0.0, -0.1, -0.2, -0.4, -1.0, -1.8m	チノ Pt100	○	
			-0.1, -0.2, -0.4, -0.8, -1.2m	REBS STP-1 Pt		○
地中熱流量		W/m ²	-0.05m	REBS HFT3.1	○	○
(顕熱 flux)		W/m ²	+4m	(カイジョー-DA-300TV)	○	
(潜熱 flux)				(カイジョー-AH-300)		
(顕熱 flux)			+32m	(カイジョー-DA-300TV)		○
土壌水分量	0-70%	%	-0.05, -0.1, -0.2, -0.4, -0.8, -1.6m	IMKO TRIME-MUX6 (TDR 土壌水分計)	○	
			-0.1, -0.2, -0.4, -0.8, -1.2m			○
データ記録装置				白山工業 Datamark LS3300	○	○
電源				太陽電池パネル +バッテリー	○	○

表 9.1.3: チベット PBL タワーの観測項目 (単位), 測定範囲, 測定高度, 使用している測器, データ記録装置, 電源の一覧 (④中国チベット, Amdo) 括弧内の測器は集中観測時のみ測定

観測項目	測定範囲	単位	測定高度	使用している測器
正味放射量		W/m ²	+1.5	REBS Q-7
下向き・上向き短波放射量		W/m ²	+1.5	英弘 MS-801F
下向き・上向き長波放射量		W/m ²	+1.5m	Eppley PYG
降水量		Mm	+1.0m	ETI NOAH II Weighing gauge
気圧	500-1100	hPa	+2.0m	Valisara PTB220
風速	0-60	m/s	+2,7,14m	小笠原 WS-51
風向	0~360	°	+2,7,14m	小笠原 WS-51
気温	-40~+60	°C	+2,7,14m	ヴァイサラ HMP-35D
相対湿度	0-90	%	+2,7,14m	ヴァイサラ HMP-35D
表面温度	-40-+100	°C	+32m	Everest 4000.4G
地温	-20-+45	°C	-0.1,-0.2, -0.4,-0.8 -1.2m	Vaisala DTS12G
地中熱流量		Wm-2	-0.05m	HFT-3.1 (REBS)
(顕熱フラックス)		Wm-2	+32m	(カイジョー DA-300)
(潜熱フラックス)		Wm-2	+32m	(カイジョー DA-300 + カイジョー AH-300)
土壌水分量	0-100	%	-0.1,-0.2, -0.4,-0.6 -0.8,-1.2m	IMKO Micro.TRIME-MUX6
データ記録装置				Vaisala MILOS-500 (PBL Tower) Vaisala QLC50 (放射 station) National DAQPadMIO + PC (乱流)
電源				太陽電池パネル+バッテリー

Field Experiment: 光田, 1988, 1995) の際に用いられた AWS が設置されている。ただし PBL タワー以外では乱流を直接測定していないので, 集中観測時に移動乱流観測を行った結果を用いて, バルク係数を決定し, バルク法により, 顕熱フラックスと運動量フラックスを算出し, 潜熱フラックスは熱収支法によって算出する。これらの HEIFE-AWS の測定項目, 測定高度, および使用している測器の一覧を表 9.1.4 に示す。

タイの Sukhothai 水田基地では, 高さが約 10 m のタワーには通風乾湿計, 正味放射計, 日射計, IRT, バイサラ, 風向風速計が設置されおり, 地上ではテンシオメーター, 地温センサー, 地中熱流板, TDR, 雨量計などが設置されていて, 気圧や地下水位なども測定している (表 9.1.5: 青木, 1997; 千村他, 1997)。データはロガー (EVAS-15 型 (メテオ電子計測) をメインで使用し, solac5

(英弘精機)) で回収すると同時に, 携帯電話を用いてデータ転送を行っている (第 10 章)。

また, タイの Chiang-Mai 郊外にある Kog-Ma (熱帯季節林, 森林: 瀧澤, 鈴木, 1999) でも, タワーにより観測を行っている (表 9.1.6)。ここでは, 正味放射量, 下向き上向き短波放射量, 下向き上向き長波放射量, 光合成有効放射量 (PAR), 降水量, 気圧, 気温湿度, 風向風速, 表面温度, 地温, 地中熱流量を計測している。また, 集中観測時には, 超音波風速温度計を用いて, 顕熱フラックスを計測している。

ネパールでは, 1994 年より GEN (Glaciological Expedition in Nepal: Higuchi, 1980, 1993; Yamada, 1989) の一環として設置されている AWS が Syangboche (ヒマラヤ, 山岳地域: Ueno *et al.*, 1996) に設置されている。AWS の測定項目, 測定高度, および使用している測器の一覧を表 9.1.7

表 9.1.4: チベット AWS (HEIFE-type) の観測項目 (単位), 測定範囲, 測定高度, 使用している測器, データ記録装置, 電源の一覧 (中国チベット, ⑥Toutouhe, ③D110, ④D66)

観測項目	測定範囲	単位	測定高度	使用している測器
下向き短波放射量		W/m ²	+6.0m	英弘 S-100
降水量		Mm	+1.0m	ETI NOAH II Weighing gauge
気圧	500-1100	hPa	+1.5m	Valisara PTB100
風速	0-60	m/s	+6.0m	小笠原 WS-942
風向	0~360	°	+6.0m	小笠原 WS-942
気温	-40~+60	°C	+1.5m	ヴァイサラ HMP-35A
相対湿度	0-90	%	+1.5m	ヴァイサラ HMP-35A
表面温度	-40- +100	°C	+6.0m	CHINO HR1-FL
地温	-20- +45	°C	-0.0,0.04, -0.2,-0.4, -0.6,-0.8, -1.0,-1.3, -1.6,-1.8m	白山工業 Pt100
土壌水分量	0-100	%	-0.04,-0.2, -0.4,-0.6 -0.8,-1.0 -1.6,-1.8m	IMKO Micro.TRIME-MUX6
データ記録装置				TEAC DR101M
電源				太陽電池(Solarex MSX64(60W×6) パネル+バッテリー

に示す。

上記の各地点における数種類の AWS による熱・水フラックスの測定及び算出方法をまとめたものを表 9.1.8 に示す。AAN 各地域 (シベリア, モンゴル, 中国, チベット, タイ) の観測結果では, 熱収支の Imbalance 問題 (顕熱フラックス+潜熱フラックス+地中熱流量の合計が正味放射量と合わない) についての指摘が最も多くなされた。しかしながら Imbalance の問題はすべての地域に共通しているのではなく, また同じサイトでも季節によって, その度合いが異なるという傾向が見られた。この問題については AAN サイエンスワークショップや 6 月に行われた GEWEX/GAME 北京国際会議の際に行われた熱収支に関するミニワークショップでも議論された。それによると, 多くの計測の較正を含む種々の誤差に加え, Webb *et al.* (1980) による補正等とは別の平均鉛直流の効果や, 熱流板では見えていない地中への熱輸送などの問題を一つ一つ丹念に調べる必要があるという認識に至った (石川, 玉川, 2000)。

各地域の観測結果の中で, 熱収支の特性についてのこれまでの報告の中で, 特に興味深いものは以下の通りである。シベリアのツンドラでは, 熱収支には風向依存性があり, 北東風および東風 (高気圧に支配されている。) のときは顕熱フラックスが大きくなるが, 南西風 (低気圧からの流入がある。) のときは小さくなるという傾向が見られた (兒玉他, 1998)。シベリア, タイガでは, 日単位で見ても, 熱収支が閉じなかった。その原因は地中熱流量の過小評価の可能性があり, 凍土の融解を考慮に入れる必要があると考えられる。カナダの BOREAS では Imbalance は見られなかったと報告されているが, シベリアでは Imbalance が大きく, 葉が少ない時に 3 割ぐらいの Imbalance で, 葉が多い時で 6 割から 7 割にもなった (太田, 1998)。熱帯地域のタイでは, 雨季, 乾季の変化が明瞭であるが, それによって, スコタイ近郊の Tak での結果では, ボーエン比 (顕熱フラックス/潜熱フラックス) に大きな変化が見られたが (戸田他, 1998)。これに対して,

表 9.1.5: タイ水田タワー, @Sukhothai の観測項目 (単位), 測定範囲, 測定高度, 使用している測器, データ記録装置, 電源の一覧

観測項目	測定範囲	単位	測定高度	使用している測器
正味放射量		W/m ²	+1.5m	英弘 MF-40 改
下向き短波放射量		W/m ²	+1.5m	英弘 S-100
降水量		Mm	+1.0m	ETI NOAH II Weighing gauge
気圧	500-1100	hPa	+1.5m	Valisara PTB100
風速	0-60	m/s	+10.5m	R.M.Young 09101
風向	0~360	°	+10.5m	R.M.Young 09101
気温	-40~+60	°C	+2, 9.5m	自作熱電対+ヴァイサラ HMP-35A
相対湿度	0-90	%	+2, 9.5m	自作熱電対+ヴァイサラ HMP-35A
表面温度	-40- +100	°C	+10m	CHINO HR1-FL
地温	-20- +45	°C	-0.05,-0.1, -0.15,-0.3, -0.5m	サーミスター
土壌水分量	0-100	%	-0.05,-0.1, -0.15,-0.3, -0.5m	IMKO Micro.TRIME-MUX6
水温		°C		KADEC-US
水位		cm		KADEC-MIZU
データ記録装置				EVAS-15 型(メテオ計測) + SOLAC5(英弘精機)
電源				プロパンガス発電機 (Global Thermo. Electornic 5060 型) + バッテリー

Kog-Ma の森林サイトでは、ポーエン比の季節変化に大きな違いがみられなかった (瀧澤, 鈴木, 1999)。

9.1.3 AAN における観測結果の一例

AAN における観測結果の一例として、モンゴル中部のウブルハンガイ県 Arvaikheer 空港内のサイト (46°16'N, 102°47'E, 標高 1812 m) における結果を示す事にする (宮崎他, 1999)。PAMIII の観測データから、地表面熱収支各項を次のような方法を用いて 30 分平均値を算出した。正味放射量は、長波放射量、短波放射量それぞれの下向き、上向きの放射量から計算した。なお、長波放射量については、塩原・浅野 (1992) によって示された補正方法で、ドーム係数は 3.0 としてドーム温度およびケース温度補正を施した。顕熱フラックスは渦相関法を用いて算出し、潜熱フラックスは熱収支の残差として算出した。ま

た、地中熱流量は熱流版の計測値を用いた。

図 9.1.2 に 1999 年 3 月 31 日 (春季) の熱収支各項の日変化を示す。春季は顕熱フラックスが正味放射量の 3 分の 2 を占めて、かなり大きくなっていった。この日の表層土壌水分量の日平均値は 5% 以下で、地表面は非常に乾いていた。図 9.1.3 に 1998 年 8 月 22 日 (夏季) の熱収支各項の日変化を示す。潜熱フラックスが夏季には、顕熱フラックスの 3 倍程度にまでなり、春季とは逆に、潜熱フラックスが正味放射量の 5 分の 3 程度に達していた。この日の表層土壌水分量の日平均値は 16% となっており、地表面は湿っていた。福本・広田 (1994) は、表層土壌水分量が 15% から 20% 付近を境に、ポーエン比 (顕熱フラックスと潜熱フラックスの比) が大きく変わると指摘しており、春季と夏季で、顕熱フラックスと潜熱フラックスの熱収支に占める割合が大きく変化したのは、表層土壌水分量と深く関係している

表 9.1.6: タイ, ①Kog-Maの観測項目(単位), 測定範囲, 測定高度, 使用している測器, データ記録装置, 電源の一覧

観測項目	測定範囲	単位	測定高度	使用している測器
正味放射量		W/m ²	+43.4m	Eiko CN-11
短波放射量(上向き・下向き)		W/m ²	+2, 50.5m(下向き)	Eiko MS-801
			+43.4m(上向き)	Eiko MS42
長波放射量(上向き・下向き)		W/m ²	+50.5m(下向き)	Eiko MS201F
			+43.4m(上向き)	
PAR(光合成有効放射量)		W/m ²	+43.4m	自作
降水量		mm	+50.5m	Tipping Bucket Gauge, Hydro-TB3.8
気圧	500~1100	hPa	+2.0m	Valisara PTB101
風速	0~60	m/s	+34, 39.7, 43.4, 50.3m	牧野 AF860
風向	0~360	°	+50.1m	牧野 VR236
気温・相対湿度	-40~+60°C, 0-90%	°C %	+2, +43.4m	自作(東京大学)
			+34, 39.7, 43.2m	Meteo electricl
表面温度	-40~+60°C	°C	+0.5m	EVEREST 4000 4GL
			+32m	
地温	-20~+45°C	°C	-0.0, -0.1, -0.3m	自作(東京大学)
地中熱流量		W/m ²	-0.1m, -0.2m	自作(東京大学、日本大学)
(顕熱 flux)		W/m ²	+44.5m	(カイジョー-DA-300TV)
土壌水分量	0-70%	%	-0.1, -0.3, -0.6m	Campbell CS615
データ記録装置				Campbell CR10X, KADEC-UP, KADEC-U2 KADEC-PLS, KADEC-MIZU, GRANT, IKEDA CHART
電源				バッテリー

考えられる。これは、Miyazaki *et al.* (1999)でモンゴル国の Barunkharaa における観測結果と定性的には同じで、本研究ではこの傾向を定量的に明らかにすることができた。図9.1.4は1998年10月28日(秋季)の熱収支各項の日変化を示す。秋季には、再び顕熱フラックスが、正味放射量の3分の2程度に達していた。表層の土壌水分量は5%程度で、非常に乾いていた。春季も秋季も正味放射量に占める顕熱フラックスの割合は同じ

だが、秋季の正味放射量が春季の5分の3程度であることから、顕熱フラックスの絶対値も同様に、秋季は春季の5分の3程度であった。モンゴルでは、春季は春分の日を過ぎてから夏至に至るまでで、秋季は逆に、秋分の日から冬至に近い時期までであることから、日射量が春季の方が大きくなっていることが関係していると考えられる。(宮崎 真, 杉田倫明, 安成哲三)

表 9.1.7: ネパール, ⑧Syangboche の AWS の観測項目 (単位), 測定範囲, 測定高度, 使用している測器, データ記録装置, 電源の一覧

観測項目	測定範囲	単位	測定高度	使用している測器
正味放射量		W/m ²	+1.5m	REBs Q-7
下向き・上向き短波放射量		W/m ²	+1.5m	AANDERA 2770
積雪量		mm	+1.0m	Keyence UD-320
降水量		Mm	+1.0m	転倒マス雨量計
気圧	500-1100	hPa	+1.5m	AANDERA 2810
風速	0-60	m/s	+3.1m	AANDERA 2740
風向	0~360	°	+3.1m	AANDERA 3150
気温	-40~+60	°C	+3.1m	AANDERA 2775
相対湿度	0-90	%	+3.1m	AANDERA 2820
地温	-20- +45	°C	-0.005, .0.15m	AANDERA 2770
データ記録装置				AANDERA-DSU + KADEC
電源				太陽電池パネル、リチウムバッテリー

表 9.1.8: GAME-AAN サイトにおけるフラックス測定法の一覧。(地点番号: ①ツンドラ, Tiksi, ②タイガ, Yakutsk, ③モンゴル, Arvaikher, ④チベット, Amdo (PBL), ⑤ (⑤-2) 中国チベット, Totouhe-PAMIII (チベット MS3637), ⑦中国, Shou-Xian, ⑧ネパール, Syangboche, ⑨タイ, Tak, ⑩タイ, Sukhothai, ⑪タイ, Kog-Ma, ⑫ (⑥-2) 中国, Linze (チベット MS3478), ⑬, ⑭チベット AWS: Totouhe, D66, D110) (フラックス測定法: EC: 渦相関法, BC: バンドパスコバリアンス法, PL: 傾度法, BW: ボーエン比法, BK: バルク法, EB: 熱収支法, LY: ライシメータ法。×: 測定していない。また, 各測定法のうち括弧内のみは集中観測時のみ測定)

	①	②	③	④	⑤	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬,⑭
顕熱 flux	BK BW (EC)	BK BW (EC)	EC BW	BW BK (EC)	EC BK	EC BW	BK	EC BW	BW	BW (EC)	EC BW	BK
潜熱 flux	BW EB (EC)	BW EB	BC BW	EB (EC)	BC EB	BC BW (EC)	EB	BC BW (EC)	BW	BW (EC)	BC BW	EB
運動量 flux	(EC)	(EC)	EC	(EC)	EC	EC	×	EC	×	(EC)	EC	-(EC)

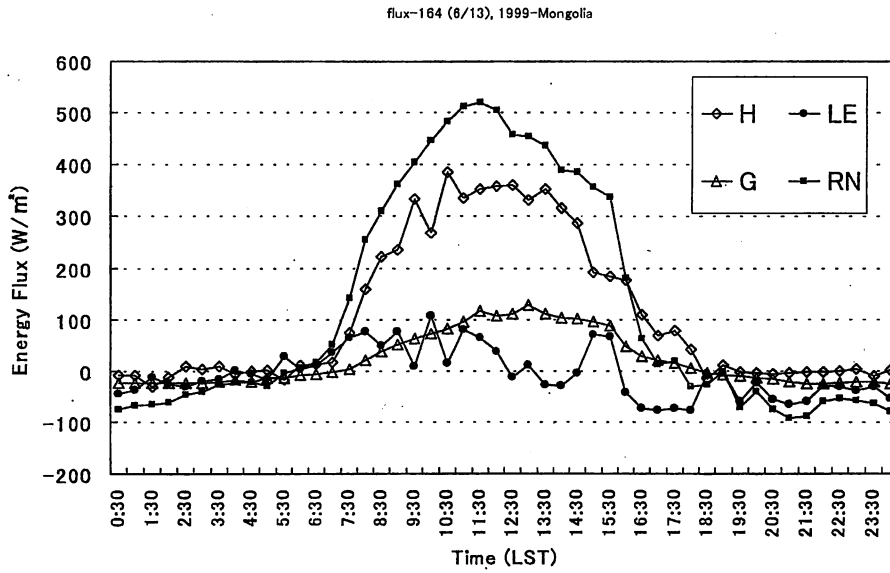


図 9.1.2: Arvaikheer における春季の地表面熱収支各項の日変化 (RN: 正味放射量, H: 顕熱フラックス, LE: 潜熱フラックス, G: 地中熱流量)

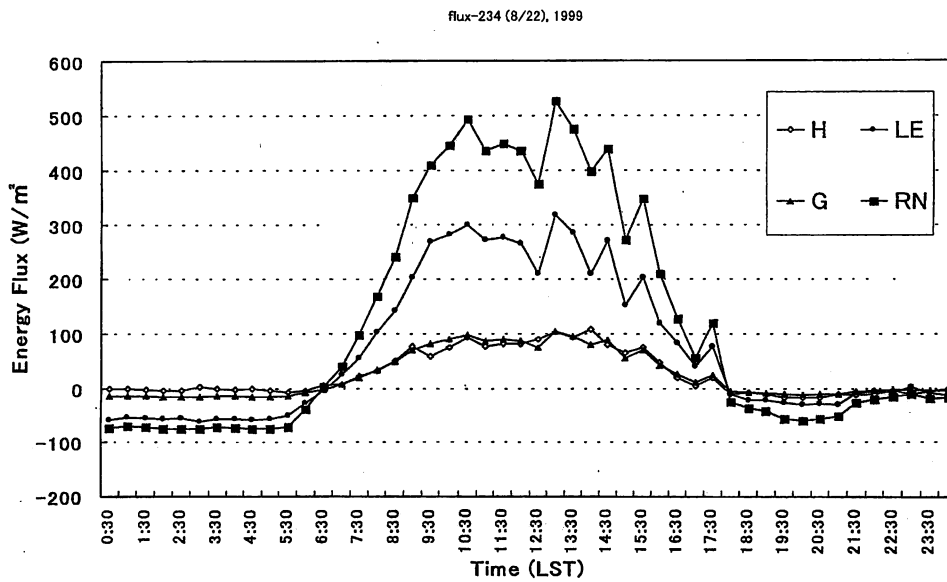


図 9.1.3: Arvaikheer における夏季の地表面熱収支各項の日変化 (RN: 正味放射量, H: 顕熱フラックス, LE: 潜熱フラックス, G: 地中熱流量)

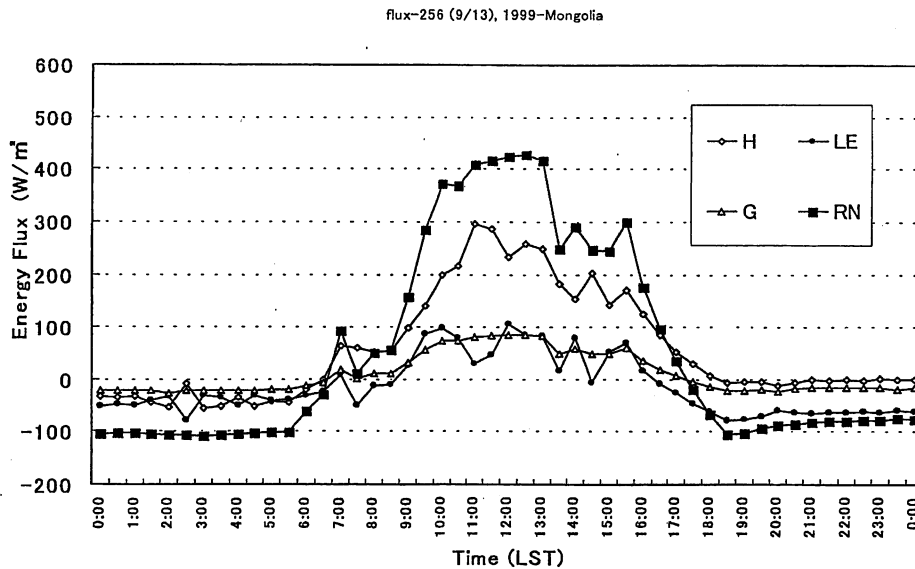


図 9.1.4: Arvaikheer における秋季の地表面熱収支各項の日変化 (RN: 正味放射量, H: 顕熱フラックス, LE: 潜熱フラックス, G: 地中熱流量)

参考文献

青木正敏 (1997): タイ国 Sukhothai 付近の天水田における微気象・蒸発散・熱収支長期観測計画—GAME-Tropics に参加して—. 日本熱帯生態学会ニューズレター, **25**, 7-13.

Aoki, M., T. Chimura, K. Ishii, I. Kaihotsu, T. Kurauchi, K. Mushiake, T. Nakaegawa, N. Ohte, P. Polsan, 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. 水文・水資源学会誌, **11**, 39-60.

Budyko, M.I., T.G. Berliand, L.I. Zubenok (1954): 地表面の熱収支. *Izv. AN. SSSR, ser. geogr.*, No. 3.

千村隆弘, 青木正敏, S. Booyawat, S. Pukngam (1997): スコタイ観測基地水田, その周辺の二次林およびワタ畑の蒸発散量同時観測結果—'97年9月観測—. 1997年度 GAME 国内集会発表要旨集, 62-63.

福本昌人, 広田知良 (1994): 表層土壌水分が裸地面熱収支に与える影響. 水文・水資源学会誌, **7**, 393-401.

GAME International Science Panel (1998): GEWEX Asian Monsoon Experiment (GAME) Implementation Plan. 136pp.

Higuchi, K. (1980): Outline of the Glaciological Expedition of Nepal (4). *Seppyo*, **41**, Special Issue, 1-4.

Higuchi, K. (1993): Nepal-Japan cooperation in research on glacier and climates of the Nepal Himalaya, *IHAS Publ.* **218**, 9-36.

Horst, T. W., S.P. Oncley (1995): Flux-PAM mea-

surement of scalar flux using cospectral similarity. *Proceedings of the 9th AMS Symposium on Meteorological Measurements and Instrumentation*, Charlotte, NC, 495-500.

Horst, T.W., S.P. Oncley, and S.R. Semmer (1997): Measurement of water vapor fluxes using capacitance RH sensors and cospectral similarity. *Proceedings of the 12th AMS Symposium on Boundary Layers and Turbulence*, 360-361.

石川裕彦, GAME-Tibet 境界層観測グループ (1998): GAME/Tibet における接地層観測. 1998年度 GAME 国内集会発表要旨集, 39-40.

石川裕彦, 玉川一郎 (2000): シンポジウム報告: 第3回 GEWEX 国際会議及び第4回 GAME 国際会議報告 14, 熱収支ミニワークショップ. *天気*, **47**, 192.

兒玉裕二, 佐藤軌文, 矢吹裕伯, 石井吉之 (1998): シベリアツンドラ地帯における観測状況と乱流フラックスの風向依存性について. 1998年度 GAME 国内研究集会発表要旨集, 11-12

Militzer, J.M., M.C. Michaelis, S.R. Semmer, K.S. Norris, H.W. Horst, S.P. Oncley, A.C. Delany and F.V. Brock (1995): Development of the prototype PAMIII/Flux-PAM surface meteorological station, *Proceedings of the 9th Symposium on Meteorological Measurements and Instrumentation*, Charlotte, NC, 490-494.

光田 寧 (1988): 大気—地表面相互作用に関する日中共同研究 (HEIFE). *天気*, **35**, 501-505.

光田 寧 (1995): 序章. *気象研究ノート* 第184号, 1-12.

Miyazaki, S., T. Yasunari, and T. Adyasuren (1999): Abrupt Seasonal Changes of Surface Climate Ob-

served in Northern Mongolia by an Automatic Weather Station. *Journal of Meteorological Society of Japan*, **77**, 583-593.

- 宮崎 真, 宮本 格, 安成哲三, 大野宏之, 開発一郎 (1999): モンゴルにおけるPAMIIIによる地表面フラックス観測結果と今後の計画. 1999年度GAME国内研究集会発表要旨集, 5-6.
- 中島映至, 竹内延夫, 高村民雄, 高萩 緑, 石 広玉 (1998): GAME放射サイトにおける観測. 1998年度GAME国内研究集会発表要旨集, 73-74.
- 大村 纂 (1997): 気候システムにおける放射の意味—Baseline Surface Radiation Network (WCRP) 発足に寄せて—. 測候時報, **64**, 69-92.
- 太田岳史 (1998): タイガの水・熱フラックス季節変化. 1998年度GAME国内研究集会発表要旨集, 1-2.
- 塩原匡貴, 浅野正二 (1992): シリコン製ドーム付野外放射計のドーム効果の定量化と測定誤差について. 気象研究所研究報告, **43**, 17-31.
- 瀧澤英紀, 鈴木雅一 (1999): 熱帯季節林の微気象とフラックス観測結果. 1999年度GAME国内研究集会発表要旨集, 11-12.
- 田中賢治, 椎葉充晴, 池淵周一, 立川康人 (1998): HUBEXにおけるフラックス観測. 1998年度GAME国内集会発表要旨集, 107-108.
- 戸田 求, 大手信人, 西田顕郎 (1998): GAME-Tropics: 複雑地表面場を対象とした野外観測報告. 1998年度GAME国内集会発表要旨集, 89-90.
- Ueno, K., H. Iida, H. Yabuki, K. Seko, A. Sakai, G.S. Lhakupa, R.B. Kayastha, A.P. Pokhrel, M.L. Shrestha, T. Yasunari, and M. Nakawo (1996): Establishment of GEN Automatic Weather Station (AWS) in Khumbu region, Nepal Himalayas. *Bulletin of Glacier Research*, **14**, 13-22.
- Yamada T. (1989) An outline of the Glaciological Expedition of Nepal: Lantang Himal Project 1987-88. *Bulletin of Glacier Research*, **7**, 191-193.
- Webb, E.K., G.I. Pearman and, R. Leuning (1980) Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **106**, 85-100.

9.2 海外に設置された気象観測ステーションからのGMSを中継したデータ転送

9.2.1 はじめに

静止気象衛星GMS (Geostationary Meteorological Satellite) には, 山岳, 離島, ブイおよび船舶等に設置された通報局 (DCP: Data Collecting Platform) によって観測された気象データをGMSの通信機能を利用して収集する気象資料収集シ

ステム (DCS: Data Collection System) がある。米国国立大気研究センター (NCAR) が開発した自動気象ステーション “PAM III (Portable Automated Mesonet III)” は, 観測されたデータ等をGMSのこのシステムを利用し, 中継して転送するための機能を持つ。電話回線などを利用したデータ転送が望めない遠隔地域に気象観測ステーションを設置した場合, 観測データやシステム全体の状態などを準リアルタイムで監視できる非常に強力な機能となる。

GAME-AANの活動の一環として気象庁, 日本気象協会, モンゴル国気象水文研究所の協力の下, モンゴルのアルバイヘル (102.78 E, 46.27 N, 標高 1,813 m) に設置された PAM III から, フラックスを含む観測データのGMS転送を1999年3月より行なっている。その要点をここで紹介する。

9.2.2 GMS用送信機

PAM III には Signal Engineering 社製の送信機 SE110 が付属される。これはもともと米国の静止気象衛星 GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) 用に設計された送信機であった。よって, GMS-DCS に対応した GAME (GEWEX Asian Monsoon Experiment) 用の送信機として使用するために, 送信周波数をGMSの電波帯域に合わせるなど, メーカーによる改造が行われた。

(1) 送信機の概観と仕様

実際に PAM III に取付けた状態での SE110 の概観を図 9.2.1 に示す。外形寸法は 18.5×17.7×8.1 cm で, 質量は約 1.8 kg である。図から分かるように, 筐体には電源スイッチ以外は操作するスイッチ類はない。電源 ON/OFF 以外の操作はシリアルケーブル (RJ45 phone cable) を介して, パソコン等を通して行われる。パソコンからは, 時刻合わせの他, 送信動作などの命令が可能となっ

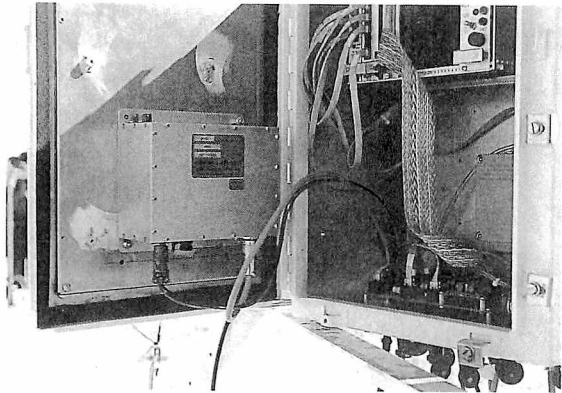


図 9.2.1: PAM III のコントロールボックス (EVE box) の扉の内側に取付けられた SE110 (写真中央からやや左側にある箱)。SE110 の下部からは電源ケーブルとアンテナケーブルが接続されている。写真ではシリアルケーブルは未接続である。

ている。この操作機能は、送信機のチェックの際に便利であり、実際にアンテナ端子に擬似アンテナ (ダミーロード) を接続した上で、高周波出力計 (パワーメータ) での出力チェックなどを行なった。

運用時にはこのシリアルケーブルにはパソコンではなく、PAM III の制御装置である EVE (Environmental Variable Extractor) が接続される。SE110 は、EVE から送られてくる観測値を含むメッセージ (1 回の送信で送られる情報のこと) を、EVE から発せられる命令に従って定時に送信動作を行なうことになる。SE110 の内部時計は、GMS システムの時計と正確に同期しなければならない意味から、年差 15 秒以内の精度の高いものが使われている。送信出力は 10 W であるが、アンテナケーブルの長さによって変動がある。作動電圧は 12.5 V、送信時の電流が約 3.5 A、待機時の電流が 10 mA 以下である。図 9.2.2 に見える SE110 のアンテナの Seavey Micro-strip Antenna は、RG-8 同軸ケーブル (7 m) を介して SE110 に接続される。アンテナの指向性は ± 22.5 度である。GMS の静止軌道位置である東経 140 度の赤道線を指向させるため、アルバイハールの観測現場では、アンテナの向きを方位角 134 度、仰

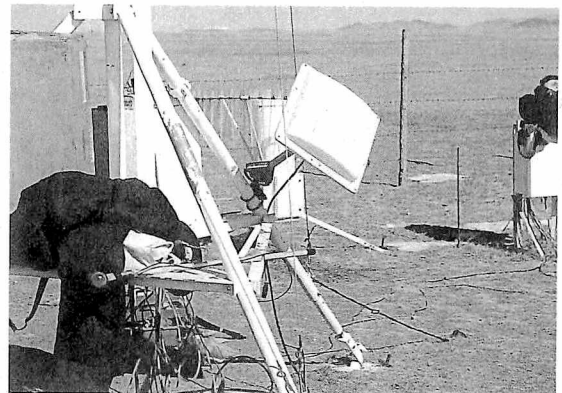


図 9.2.2: PAM III の三脚に取付けられた GMS 向け DCP 用送信アンテナ (白い正方形)。GMS の方角を向けて設置されている。

角 26 度としている。

(2) GMS への送信のタイミング

GMS の DCP チャンネルはそれぞれ 2 分毎に時分割されており (ここでは、時分割された一つ一つの 2 分の時間帯を「タイムスロット」と呼ぶことにする)、地上の送信機からはこの 2 分毎のタイムスロットに同期させるようにメッセージを送信することになる。アルバイハールからのメッセージは毎時 1 回 (毎正時 4-6 分のタイムスロットを利用) 送信された。

(3) GMS-DCS を利用する送信機の技術要件

GMS 転送を行うために、その送信機を含むシステムにはいくつかの技術要件が必要となる。詳細はここでは割愛するが、主だった内容を以下に挙げる。

- ・データ長の制限: データの送信時間は 1 分を超えてはならない。(GMS-DCS のタイムスロットは 2 分の長さを持つが、送信時刻の誤差を吸収するための余裕を見ている。)
- ・送信周波数: 送信する周波数は 402.1 ~ 402.4 MHz の帯域から気象庁が割り当てる。(GAME の場合はこの中から、402.2936 MHz (帯域: 3 kHz) が割り当てられた。)

- ・電波強度: EIRP は 43 dBm から 46 dBm の間でなければならない。
- ・占有帯域幅 (OBW) : 電波の占有帯域幅は 1.8 kHz 以内でなければならない。
- ・データ転送速度: データ伝送速度は 100 bit per second とする。
- ・送信時刻の精度: 送信時刻の精度は年差 15 秒以内とする。

1 回 (1 分以内) の送信メッセージで、観測データを最長 5192 ビット (649 文字) 分送ることができる。データは International Alphabet No. 5 に準拠した文字コードを用いた text である。また、途中 69 文字を超えない範囲で改行コード (CR CR LF) によってメッセージを区切る必要がある。

9.2.3 転送されるデータの内容と転送経路

アルバイヘールの PAM III の場合、毎時送られるメッセージには送信前の 1 時間に観測された気温、降水量、気圧、各種フラックスの 30 分間平均値のほか、PAM III の電源電圧、充電電流など、システムの状態を診断する上で重要な項目を含めた。1 メッセージに対して 649 文字の長さの制限があるので、効率的なデータ転送を図る意味から、10 進数ではなくて 16 進数を用いた。結果として、1 メッセージは 16 進数で 590 文字となった。

GMS で中継された PAM III からのメッセージは、埼玉県鳩山町にある地上局 (気象衛星通信所) で受信された後、気象衛星センターに送られ、ここでアドレス等がチェックされる。さらに、メッセージは気象庁の C-ADESS (Central-Automated Data Editing and Switching System)、日本気象協会の MICOS (Meteorological Information Comprehensive Online System)、さらに Internet を通じて筑波大学の陸域環境研究センターのサーバへと届く仕組みとなっている。サーバ上で 16 進数のメッセージを 10 進数に変換し、実際の観測値としてデータを管理する。

9.2.4 おわりに

GMS 転送を実現するためには、ここで述べてきたような機器の整備ほかに、DCP が設置される国から気象庁への GMS-DCS 利用申請、気象庁との覚書の締結や、設置される国における無線局のライセンスの取得など、書類上の手続きが必要となる。こういった手続きは、相手国からの協力を得た上で、処理して行くことになる。アルバイヘールに設置されている PAM III からは、おおかた毎時の観測データが筑波大学陸域環境研究センターまで現在も送られてきている。PAM III の送信機からの電波にノイズが乗ることがあるなどの問題があるが、PAM III の観測値や状態を準リアルタイムでモニターしている。

通信手段が未発達な海外の遠隔地における気象観測において、準リアルタイムでデータが転送されることの利便性は計り知れない。転送されてきたデータは気象業務に対して貢献することはもとより、気候学、気象学、水文学などの分野における貢献が今後も期待されるだろう。

謝辞

ここで紹介された内容は気象庁、日本気象協会、モンゴル国気象水文研究所の協力の下、GAME-AAN の活動の一環として行われた。本計画の実現にあたり、気象庁の太田弘明氏、鈴木孝雄氏と松田修三氏、モンゴル国気象水文研究所の L. Natsagdorj 氏と D. Oyunbaatar 氏、アルバイヘール測候所の J. Davasuren 氏、日本気象協会の森本陸世氏と下田晋也氏、筑波大学地球科学系の宮崎真氏、地球フロンティア研究システムの遠藤伸彦氏ほか多数の方からのお世話になった。ここに記して、深く感謝する。(鈴木力英)

9.3 GAME/Tibet におけるフラックス観測

9.3.1 GAME/Tibet の概要

チベット高原は平均標高が4000 mを優に越える。このため大気中層における熱源として、アジアモンスーンにおけるその重要性が指摘されてきた。Yanai *et al.* (1992) のレビューや, Yanai and Li (1994) で述べられているように, 高層観測データを用いた大気熱収支解析や, 地上気象観測データを用いたバルク法などにより, 地表面からの顕熱, 潜熱フラックスが見積もられてきた。GAME/Tibet では, 1998年の5月末から9月上旬までの期間, 大気陸面相互作用の定量的評価を目的として, 土壌水分量や地中温度プロファイルの計測, 接地境界層のプロファイル観測, 放射収支観測とともに, 渦相関法による顕熱, 潜熱フラックスの算出を目的とした乱流計測を実施した。

GAME/Tibet における乱流フラックス観測は, 高原を南北に走る青蔵公路沿いの4地点(北から, 安多(アムド), MS3478, 那曲(ナチュ), MS3637)で実施された。MS3478とMS3637では9.1節で述べたFlux-PAMが使用され, ナチュでは韓国Yonsei大学の観測グループが, 超音波風速温度計とクリプトン湿度計を用いたフラックス観測を実施した。このほか, 可搬型の乱流計測装置を用いたフラックス観測を自動気象観測設置地点で行った。

本稿では, アムドで行った連続フラックス観測と, 可搬型乱流計測装置を用いたフラックス観測について述べる。

9.3.2 アムドにおける連続フラックス観測

(1) 計測器

計測器は, HEIFE (Tsukamoto *et al.*, 1995) で使用したものをを用いた。その構成は, 超音波風速温度計 (KAIJO DA-300, センサーは120度交

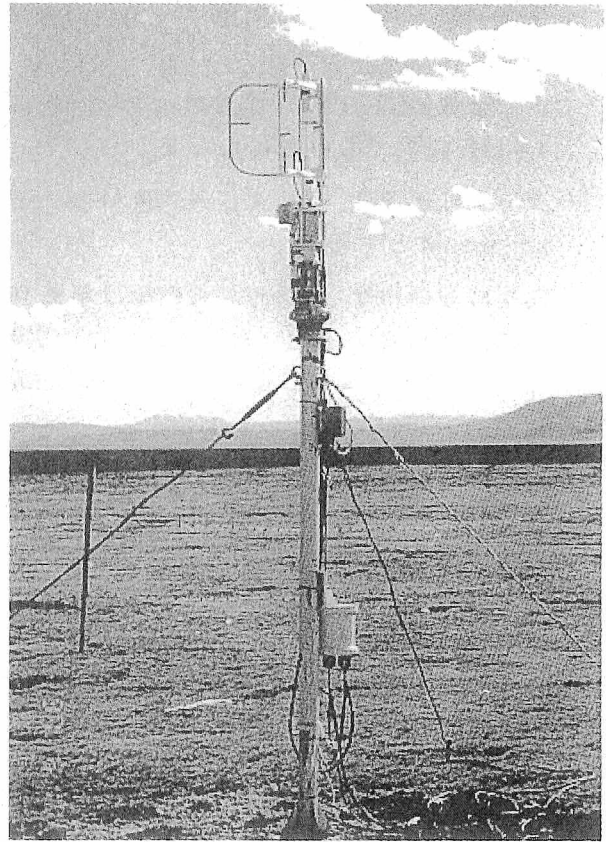


図 9.3.1: アムドに設置された乱流計測装置

差型), 赤外線湿度変動計 (KAIJO AH-300), 傾斜計, 回転台である。高さ2.3 mのポールの上に設置し, センサー高度は2.85 mである。本体部は, 約80 m離れた観測小屋の中に設置した。本体とセンサーの間のケーブルは, プラスティック製の保護管の中を通し, ネズミや家畜からケーブルを保護した。設置の様子を図9.3.1に示す。

(2) データ収集

ここ数年のパソコンとその周辺機器の急激な進歩により, 乱流観測におけるデータ取得は随分容易になった。その肝どころは, MOに代表されるコンパクトな大容量記憶メディアの登場, A/Dコンバータの小型化, パソコンのCPUの高速化とそれにとまなうグラフィクス機能の向上などである。

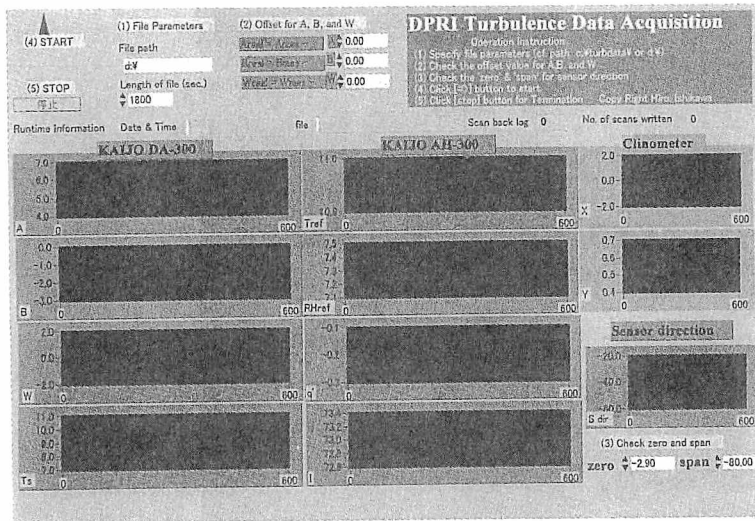


図 9.3.2: PC の Display 上に表示される操作, 表示画面。全チャンネルのデータが常時表示される。

アムドの連続観測に用いたデータ処理機器は、計算機 (IBM ThinkPad 535E, Windows95), MO ドライブ (Logitech LMO-643), AD コンバータ (National Instruments DAQPad -MIO-16XE-50) である。AD コンバータは、16 bit 解像度、シングルエンド 16 ch 入力、計算機の平行ポート (Enhanced Parallel Port モード) に接続する形式のものである。この AD コンバータに、超音波風速温度計の出力 (A, B, W, T_s), 赤外線湿度計の出力 (I, q', T_{ref}, Rh_{ref}), 傾斜計の出力 (X, Y), センサー方向の出力 (θ) の合計 11 信号を入力した。

データ収集ソフトウェアは、National Instruments の計測制御ソフトウェア LabView を用いて構成した。ソフトウェアの主な機能を以下に列挙する：

- ・ 全 ch の常時波形表示
- ・ 30 分間隔の自動ファイル切り替え (スタート時は、スタート時刻を付したファイルを作成し、以後、毎 00 分、30 分にファイルを変更する。1 ファイルの時間幅も可変)
- ・ スタートボタンとストップボタンのみの簡単操作

- ・ センサー・バイアスの設定機能。

全チャンネルの常時波形表示は、データ監視の為に欠かせない機能ではあるが、従来のロガーでは 11 ch も同時にモニターするのは難しかった。計測ソフトウェアを応用して、専用の計測プログラムを作成すれば、必要な表示を構成することができる。図 9.3.2 に、計測ソフトウェアの表示画面のプリントアウトを示す。出力 path に 640 MB の MO ディスクを指定すると、10 Hz サンプルングで約 6 日間のデータを記録できる。

Windows 配下で計測ソフトウェアを連続動作させる上で注意すべき点を 2, 3 述べておく。第一には、省電力機能をすべて無効にしておくことである。スクリーン・セーバーももちろん切っておく。これらの機能が自動起動すると CPU 負荷が一時的に増加し、データ取得が停止する場合がある。この他にもアプリケーションに付随する自動起動ユーティリティが起動することもある。筆者は、1997 年夏に実施した予備観測時に、計測システムが数時間動作した後、突然停止するトラブルに見舞われた。一晩動作を見張ったところ、MS Word の watch dog が定期的に動作し、これが始まると CPU 負荷があがり計測ソフ

トが停止することを突き止めた。

もう一つ長期間連続データ取得するときに注意すべき点は、計算機クロックの時間遅れ(進み)である。ファイル名を作成する都合で計算機のクロックを用いたが、当初使用した別のメーカーの計算機では、顕著な時計遅れが見られた。計算機のクロックを使わず、ADコンバータでサンプルされるデータ数で時間をカウントする方法も可能であるが、この場合でもADコンバータの変換周波数の正確さを確認しておくことが必要である。GAME/Tibetでは採用しなかったが、この問題の解決策として、携帯型のGPSを用いて、その時刻情報を用いて定期的にPCのクロックを補正する方法が実用化されている。

(3) 電源

GAME/Tibetの観測を通じて最も苦労したのが電源確保であった。この計測システムでは、超音波風速温度計、赤外線湿度計、ADコンバータ、計算機併せて約100Wの100VACが必要である。この電源を確保するため、日本からガソリン発電機と大容量の無停電電源を持ち込み、これらから電力供給を行った。

(4) 観測結果

5月の下旬にアムドサイトに設置し、9月10日まで、ほぼ連続してデータ取得を行った。全部で、4800以上の30分データ(10Hzサンプリング)を取得した。データ解析の方法は、玉川(1999)に詳しく述べられている。ただし、比湿変動に関しては、AH-300の演算回路が、降水後などに誤動作するが多かったことから(注: AH-300の誤動作は、初期の製品で発生しており、最近の機器では生じない)、 I (受光強度)の変動記録から、

$$q' = \frac{I'}{I}$$

により計算した。

図9.3.3には、GAME/Tibetの集中観測期間に

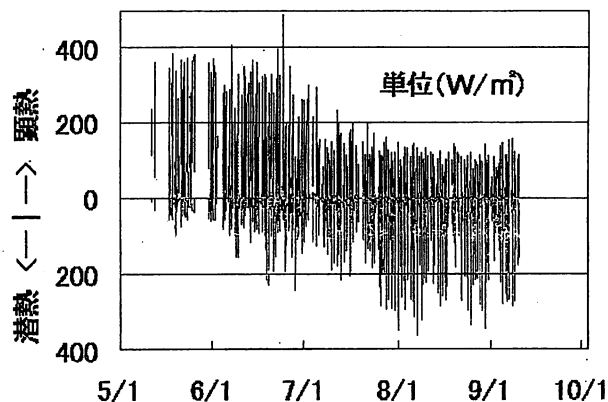


図9.3.3: GAME/Tibetで計測された顕熱・潜熱フラックス

Surface Energy Flux (W/m^2) (1998/7/16)

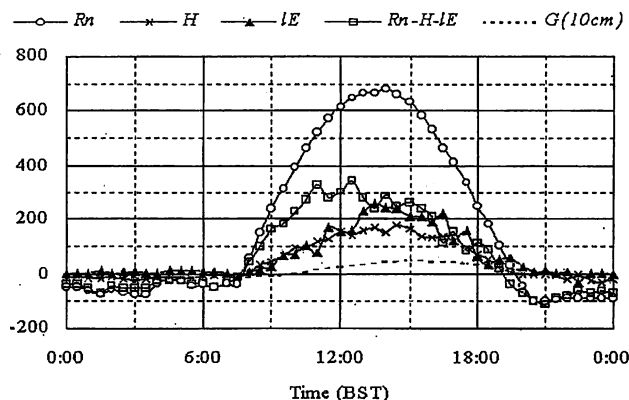


図9.3.4: 1998年7月16日の測定例。正味放射, 地中熱流量(10cm)とともに示す。

計測された30分間隔のフラックスをべたうちした結果を示す。上向きが顕熱フラックス, 下向きが潜熱フラックスである。観測が開始された5月中旬から6月中旬にかけては顕熱フラックスが圧倒的に支配的であるが、6月中旬以降潜熱フラックスの割合が増加しているようすがわかる。この変化は、モンスーン入り後の降水による地表面の湿潤化に対応している。

図9.3.4には、モンスーン期間中の快晴日の測定例を示す。顕熱フラックス(H), 潜熱フラックス(LE), 正味放射(Rn), 地中10cmにおける地中熱流量(G)をとともに示してある。

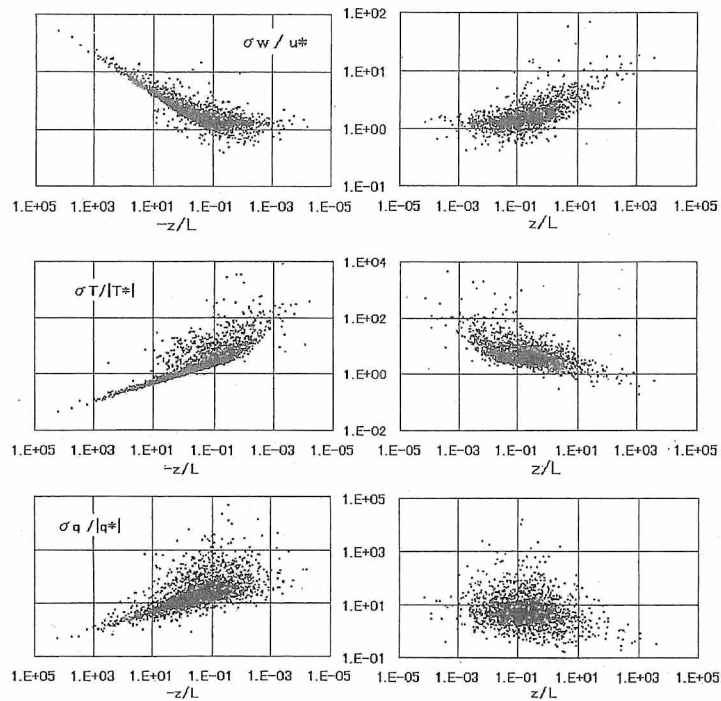


図 9.3.5: z/L の関数としてプロットした乱流強度

図 9.3.5 には、集中観測で得られた全てのデータについて、鉛直風速、温度変動、湿度変動の乱流強度を z/L (L : Monin-Obukov の長さ) の関数としてプロットした結果を示す。これらは、いずれも従来の研究で得られているプロットに乗っている。さらに、 $-z/L > 10^4$ の強不安定、 $z/L > 10^3$ の強安定な領域までデータが得られ、これらも従来のプロットを外挿した延長上に乗ることが示された点が新しい成果と言える。

9.3.3 可搬型乱流計測装置

可搬型乱流計測装置は、電源の無いところで 2 日間程度の連続乱流観測を行うことを目的とした。

(1) 計測器

風速 3 成分と気温変動の計測には、12VDC で動作する超音波風速温度計 (KAIJO PA-600, 直交型センサー) を使用した。また湿度変動の計

測には、消費電力を考慮して容量型湿度計を使用した。変動計測用には、カタログ仕様によれば 63% レスポンスで 5-10 Hz の応答特性のあるという、米国 AIR 社製の HUMAIR (HA-1PX) を使用し、Reference に、VAISALA HMP133 を併用した。(注: AIR 社製の HUMAIR は、同社の VAISALA 社への吸収合併により、今後製造されるかどうかは不明)。

(2) データ収集

省電力の目的で、MS-DOS ベースの特注ロガー ((株) 東洋電子工業) を利用した。このロガーは、CPU に Intel 486 を用い、8MB RAM、記憶媒体にはノートパソコン用の薄型 HDD (1.2GB) を使用し、消費電力を押さえるため、クロックを可能な限り下げて (16 MHz/40 MHz 切替可) 動作させるように工夫されている。入力信号は、PA-600 からのデジタル出力と湿度計からのアナログ出力が混在するため、PA-600 からのシリアル通

信で10Hzで送られてくるデータ受信をトリガーにADコンバータを動作させて、湿度計信号のAD変換を行う。

条件の悪いフィールドでの使用を考慮して、ロガーの機能は極力簡素化されており、基本的には、フィールドで機器を設置・接続して電源を投入するだけで、自動的にデータ収集が始まり、10分間隔のファイルにデータを収録し続けるプログラム仕様になっている。

ロガーの設定、データ収集の監視やデータ回収は、パソコンとロガーをシリアル接続して行える。以下の機能を用意した：

- ・ロガー・クロックの修正
- ・ロガーのファイル操作
- ・ファイルリスト表示
- ・ファイル転送
- ・ファイル削除
- ・動作テスト・スタート
- ・動作テスト・ストップ
- ・ファイルの拡張子（各RUNの識別に用いる）の変更

これらロガーとしての機能に加え、計測器への電源供給機能、バッテリーの監視と電源電圧降下時の自動停止機能などの電源管理もこのロガーで行っている。センサー・ロガーの結線図を図9.3.6に示す。

電源には110AHの密封式のバッテリー（Sonenschein dryfit-a212/110A）を使用した。実働状態でバッテリーからの供給電流は、実測で1.4 A（12VDC）である

図9.3.7にD110サイトに設置された移動乱流計測装置の写真を示す。超音波風速温度計センサー基部にあるT字型のパイプの中に2本の容量型湿度計が設置されている。後方の銀箱の中に超音波風速温度計の本体とロガーが、またその左側のプラスチック箱の中にバッテリーが入っている。

観測結果の一例として図9.3.7の観測で得られた結果（浅沼による解析）を図9.3.8に示す。

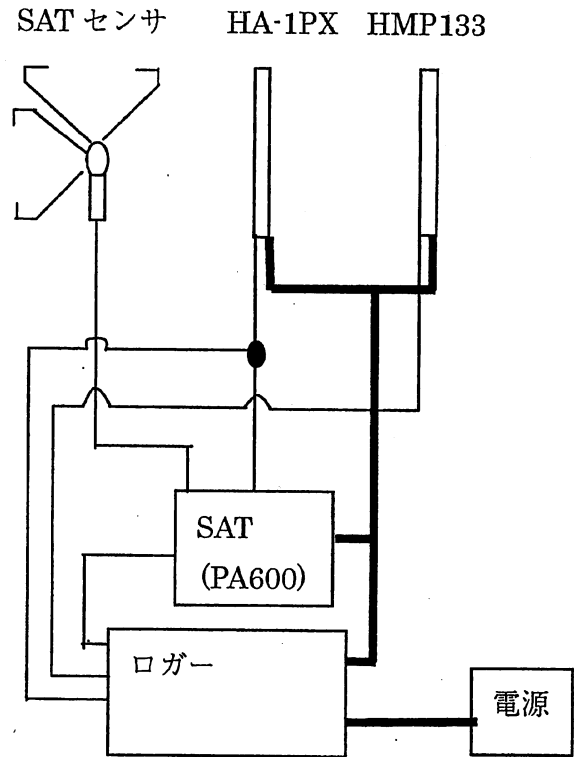


図 9.3.6: 移動乱流計測装置のブロックダイアグラム。太線は電源供給，細線が信号系

9.3.4 おわりに

アムドで使用した乱流計測システムは、HEIFEで使用したセンサーを用い、データ収集システムを一新したものであった。大容量記憶媒体の利用と自動データ取得により大量の乱流データが手を掛けずに取得できた。ごく最近20 GBのHDDを装備したB5サイズのPCが発表された。乱流計測装置で得られるデータは、30分あたり1 MBに満たないから、1年間連続で計測しても、データ量はたかだか(?) 17 GBそこそこであり、100 W程度の電力を確保できれば記憶メディアの交換無しで、通年観測が可能な勘定になる。

しかし、このことは乱流計測が完全にメンテナンス・フリーで行えることを意味するわけではない。精度のよいフラックス観測を行うためには、例えば降水直後に超音波風速温度計や赤外線湿度計のセンサー部の水滴を拭うなどの細か

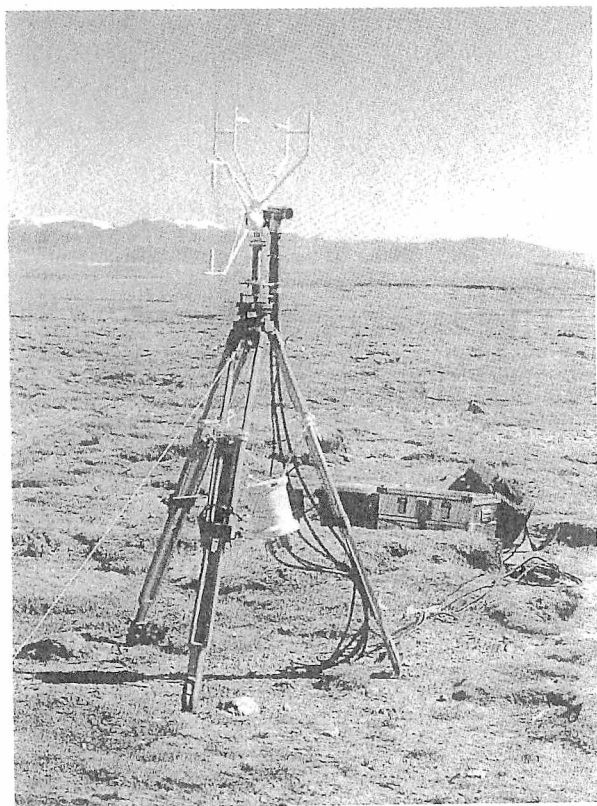


図 9.3.7: D110 サイトに設置された移動乱流計測システム

な配慮が必要である。データ処理の自動化により、ともすればこれらの配慮を怠りがちになることを自戒しなければならない。また逆に、このような配慮が不要であるようなセンサーの改良が今後の課題とも言える。

可搬型乱流計測装置については、ほとんど試作状態であったが、とりあえず必要要件は満たすことができあがり、顕熱フラックスについては良い計測結果が得られた。湿度変動、およびそれによる潜熱フラックスの算出に関しては、今後の改良が必要である。

湿度変動の計測法は、今後まだまだ改良する必要があると思われる。那曲の南に設置したBJサイトと呼ばれる地点でフラックス観測を行った韓国 Yonsei 大学の研究グループは、クリプトン湿度計を使用していたが、大気密度の低いチベッ

ト高原上では、酸素による吸収が小さいため、出力がスケールアウトしたという。急遽、スパンを広げて測定範囲内に信号が入るように現地で工作したそうであるが、後日、メーカーに依頼して減圧室で再キャリブレーションしたそうである。

最後に地表面フラックスの imbalance の問題に簡単に触れておく。地表面においては、地表面エネルギー平衡 (Surface Energy Balance) :

$$Rn = H + LE + G$$

(Rn : 正味放射, H : 顕熱フラックス,

LE : 潜熱フラックス, G : 地中への熱流量)

が成立しているはずである。この原理に基づいて、比較的計測の容易な Rn や G の計測値と、接地気層内の温度、湿度 (比湿) のプロファイルを入力として、ボーエン比法やプロファイル法を用いて、 H や LE を算出する方法が用いられてきた。この方法はまた、数値モデルにおける大抵の大気-陸面パラメタリゼーションの基礎となっている。

ところが、乱流計測データと渦相関法を用いて顕熱・潜熱フラックスを実際に算出して地表面熱平衡式にいれてやると、等式は成立せず、多くの観測例で、

$$Rn - G > H + LE$$

となることが報告されている。このような imbalance が生じる原因については、超音波風速温度計では計測できないような微少な平均鉛直流による輸送の寄与、それぞれの計測項目が測定対象とする空間的範囲の相違 (計測の空間代表性) に原因を求める議論、地中熱流量の測定評価手法に関する疑問等々が呈示されている。最近の研究 (Gu *et al.*, 1999) では、渦相関法の方に問題があるのではないかと結論している。

そもそも乱流計測と渦相関法によるフラックス解析は、それまで間接的に評価されてきた潜熱・顕熱フラックスを直接測定により精度良く求

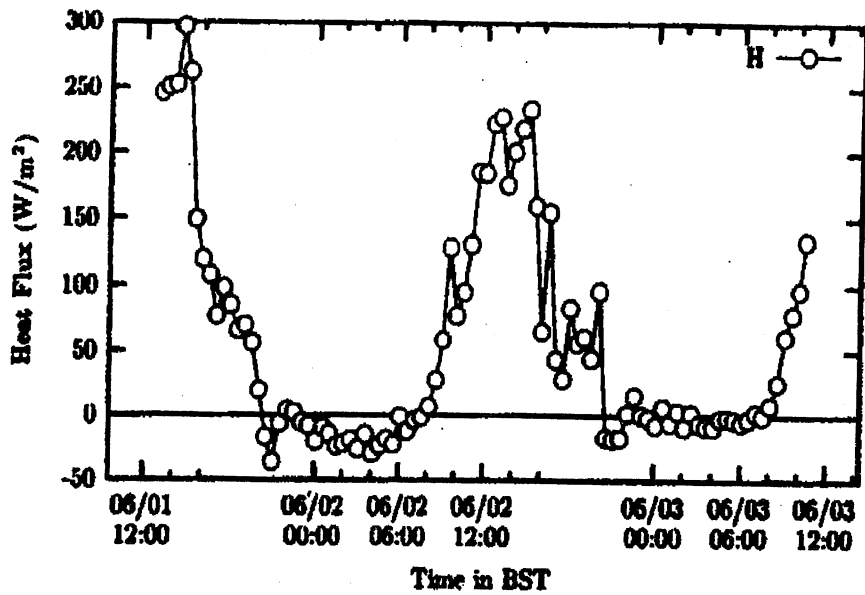


図 9.3.8: D110 サイトで観測された顕熱フラックス

めることを目的に発展してきた手法である。少なくとも植生のない理想的な地表面において地表面熱平衡が成立することを実証することは、この手法の存在価値を主張する上で非常に重要かつ急務な課題である。(石川裕彦)

参考文献

- Gu, J, E.A. Smith and J.D. Merritt, 1999: Testing energy balance closure with GOES-retrieved net radiation and insitu eddy correlation fluxes in BOREAS, *J. Geophys. Res.*, **104**, 27, 881-2-7, 893.
- Tsukamoto, O., K. Sahashi and J. Wang, 1995; Heat budget and Evapotranspiration at an Oasis Surface Surrounded by Desert, *J. Meteor. Soc. Japan.*, **73**, 925-935.
- Yanai, M., C. Li and Z. Song, 1992; Seasonal Heating of the Tibetan Plateau and Its Effects on the Evaluation of the Asian Summer Monsoon, *J. Meteor. Soc. Japan.*, **70**, 319-351
- Yanai, M. and C. Li, 1994; Mechanism of Heating and the Boundary Layer over the Tibetan Plateau, *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 305-323.
- 玉川一郎, 1999: 超音波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 of 解析法の検討, *水文・水資源学会誌*, 12巻(2号), pp. 130-138.

9.4 琵琶湖プロジェクト

琵琶湖プロジェクトは「琵琶湖流域の水・熱循環過程解明に向けた総合研究と衛星同期共同観測」を骨子としたオープンなプロジェクトであり、1989年以来様々な関係機関のサポートを受けながら継続し続けてきた。本プロジェクトは全国の各分野からの水文研究者が一同に会して議論し、衛星リモートセンシングやGISなどの最新の技術を駆使した共同観測・解析を行うことにより、水文学の新たな方向や飛躍をもたらすことを最も基本的な目的としている(中北・砂田, 1997; 中北・砂田, 1998)。

これまでは短期集中型のスポット的な検証観測が主体であったが、水・熱循環の季節変化、年々変化、さらには衛星データのオペレーショナルな運用、気象—水文結合モデルへのデータ同化、ならびに、それらを用いた20 kmスケールまでのスケール効果の解明を通じた長期地点観測情報の面代表性の定量的な明確化等を目指して、1998年度より水田、森林の2地点、1999年度からは都市、湖面の2地点で常設熱収支観測システム

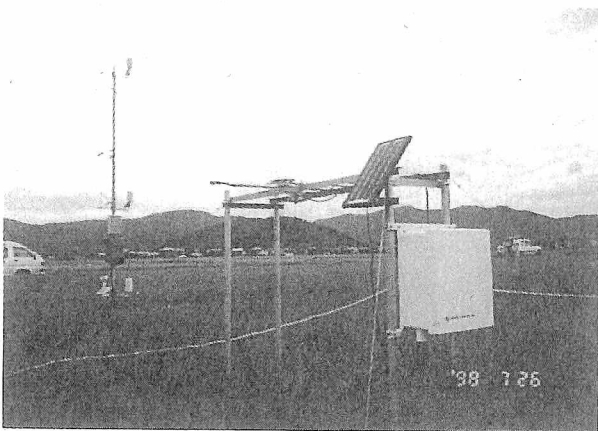


図 9.4.1: 水田観測システム

表 9.4.1: 水田観測のセンサー

要素	センサー	設置高度
気温湿度	Vaisala VH-G-Z	507,264,111cm
風速	Vector A100L2	523,266,116cm
風向	Vector W200	523cm
気圧	Vaisala PTB100	210cm
光量子	Licor LI-190SA	200cm
ロガー	Grant SQ1021	
地温プロファイル	Campbell 107	-1,-10,-20cm
水温	Campbell 107	1cm
放射収支	REBS Q7	195cm
地中熱フラックス	REBS HFT-3	-1cm
長波放射(上・下)	Eppley PIR	195cm
アルベド	Kipp&Zonen CM-14	195cm
土壌水分(TDR)	Campbell CS615	-5,-5,-20,-20cm
水位(フロート式)	Ikeda KWH-4PHT	地上
雨量(転倒ます)	Ikeda RT-5	地上
ロガー	Campbell CR10X	

の運用を開始した。

9.4.1 水田における観測システム

水田の観測システム(図9.4.1, 表9.4.1)は滋賀県伊香郡高月町井ノ口(N35.49, E136.23)に位置する。集中田と呼ばれるこの水田は小森和正氏の所有する約100m×30mの区画であり、1991年より毎年琵琶湖プロジェクトの集中観測地点として位置付けられてきた。水田常設観測システムは1998年7月より運用を開始した。

システムは2系統にわかれており、プロファイル関係はGrant, 放射, 地中関係はCampbellの

ロガーでデータを収録している。電源としてそれぞれ11.1W, 14.5Wの太陽電池パネル, 18.0Ah, 13.5Ahのバッテリーを使用する。また, 気温湿度計シェルターにはそれぞれ2.5Wの太陽電池パネルとファンを取り付け, 日照時にのみファンが回転する。観測項目, センサー設置高度は以下の通りである。ただし, 光量子センサーは1999年6月に追加した。

一般的な熱収支観測に加えて, 特に水田観測用の項目として水温と水位を計測しているが, 日々水深が変化するため代表的な水温を計測することは困難であり, 今後の課題である。

水田の観測では, 田植え準備時期や農薬散布時, 刈り入れ時等にシステムを一時的に撤収する必要がある, 必然的にデータの欠測が生じる。また, 水中のセンサーはケーブルにわずかな傷があってもショートしてしまうので注意が必要である。

なお, 滋賀県農業試験場湖北分場(集中田の北方, 約200m)の協力を得て, 2000年11月より常設乱流観測を開始した。

9.4.2 森林における観測システム

森林の観測タワー(図9.4.2)は滋賀県伊香郡余呉町大字上丹生磯見谷地区の山腹斜面(N35.56, E136.21)に位置する。この場所は地元の共有林となっており私有地で, 保安林にも指定されている。タワー設置地点は南南東向き斜面の尾根よりに位置し, 標高は約430mである。地形は非常に急峻で, タワー周辺の斜面勾配は30°以上である。タワー周辺の植生はケヤキ, ホウノキ, ミズナラなどの落葉広葉樹で, 樹高は約16~17mである。

タワーは建設用足場鋼管資材を用いたもので, 幅1.8m×奥行2.4m×高さ26mであり, 斜面山側に昇降用の階段を設けた構造になっている。この森林熱収支・フラックス観測タワーにおける観測項目は, 一般的な森林の熱収支観測ができる

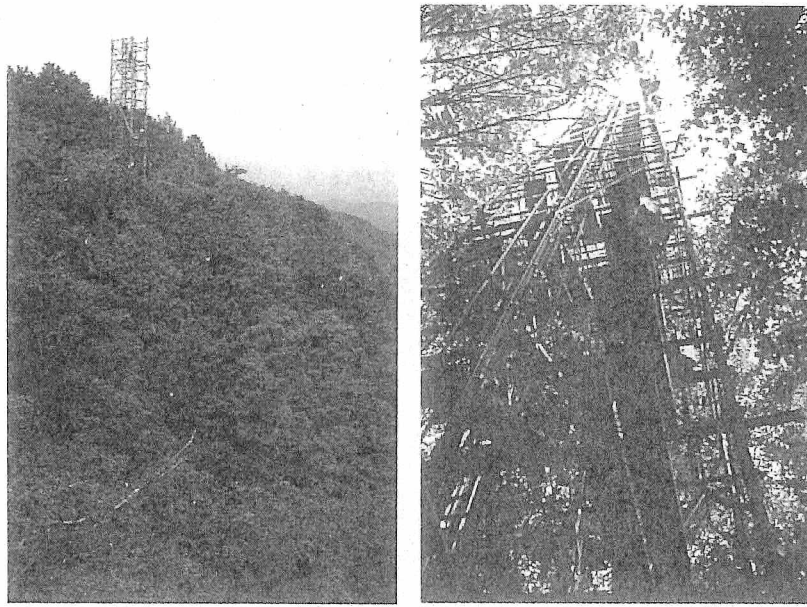


図 9.4.2: 森林観測システム

表 9.4.2: 森林観測のセンサー

項目	センサー	設置高さ
長波放射(下)	Eppley PIR	26.5m
風向風速	R.M.Young 5103	26.5m
顕熱・運動量	Campbell CSAT	26.5m
土壌水分(TDR)	Campbell CS615	-0.1~0.3m
ロガー	Campbell CR23X	
風速プロファイル	R.M.Young 03001	20.5,17.1,15.4m
気温湿度	Vaisala HMP45C-L	20.0m,17.2m
葉面温度	Tasco THI-500	20.5m
アルベド	Kipp&Zonen CM-14	17.7m
放射収支	REBS Q7	17.7m
気圧	Vaisala CS105	7.0m
地温プロファイル	Campbell 107	-0.1,-0.2m
地中熱フラックス	REBS HFT-3	-0.02,-0.02m
ロガー	Campbell CR10X	
風速プロファイル	Vector A100L2	25.6,20.5,17.1 15.4,10.3m
	Makino KC-101	5.1,2.4m
ロガー	Campbell CR10X	

ように決められた。さらに超音波風速計(SAT)による乱流観測(10 Hz)も実施しているが、ロガーのメモリ容量の関係上、生データを全て記録できないため、ロガーで演算処理した乱流統計量のみを記録している。観測項目、センサー設置高度は表9.4.2にまとめたが、観測要素が非常に多く、3つのロガーに分けて記録されている。電源には20 Wの太陽電池パネル4枚、40 Ahの

バッテリー2個を使用し、測器(SATも)、ロガーとも12 VDCで駆動する。森林常設観測システムは1998年10月より運用を開始した(西川ほか, 2000)。

この他センサーとロガーがセットで、気温・湿度7点、日射(樹冠上、樹冠下)、地温4点、樹液流速(ヒートパルス法)3点、雨量(林外)を計測している。日射やプロファイル等、観測要素が重複しているのは、バックアップのためである。

9.4.3 湖面における観測システム

湖面の観測(図9.4.3、表9.4.3)では、滋賀県衛生環境センターの協力を得て、水質自動測定局である北湖湖心局(N局)を観測プラットフォームとしている。湖底から係留されているこのブイは最大径6 m、水面上8 mの浮体構造物であり、琵琶湖上で長浜市と今津町のほぼ中央、竹生島の南南西3.5 kmに位置する。湖面常設観測は1999年7月に開始した。

気象要素、放射要素、水温プロファイルに加え、ブイ自体の状態をモニターするために、水位

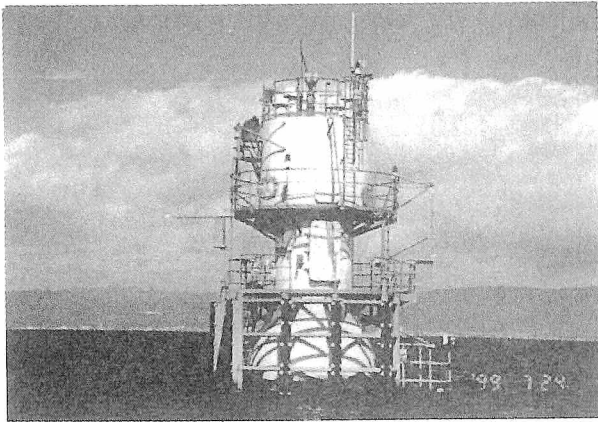


図 9.4.3: 湖面観測システム (北湖湖心局)

表 9.4.3: 湖面観測のセンサー

要素	センサー	設置高度
アルベド	Kipp&Zonen CM14	5.5m
放射収支	Kipp&Zonen NR LITE	5.5m
表面温度	OPTEX BS30T	5.8m
気圧	Vaisala PTB100A	5.5m
風向	Vector W200G	10m
風速	Vector A100L2	10.0,3.5,1.5m
気温湿度	Vaisala VH-G-Z	8,1.5m
水温	CS-U	0,0.05,0.5,1,2,4,6,8m
ロガー	Grant SQ1031	6m
方位	アレック電子 AC-2	6m
水位	HAENNI ED552	圧力センサー
データロガー	SQ1000(Grant)	6m

計と方位センサーを取り付けている。放射収支計には受感部をテフロンコーティングして、ポリエチレンドームをもたないものを採用した。なお、ブイの影響を考慮して風速計は2方向に設置している。電源は26.4 Wの太陽電池パネル、チャージコントローラー、60 Ahのバッテリーで構成されている。

水温プロファイルのために特別にフロートを用意しているが、激しい波の影響もあり、表面付近の水温を正確に測定するには至らず、今後改良が必要である。

9.4.4 都市における観測システム

都市域の観測(図9.4.4,表9.4.4)では、関西電力の協力を得て、長浜市内に位置し、かつ圧倒的な高度をもつ長浜変電所鉄塔を観測プラットフォームとしている。高所からの観測により、都市の平均的な放射環境、温度環境を捉えることを目的とする。高所での観測のため、センサー自体の耐久性のみならず、取り付け金具にも細心の注意が払われている。

放射要素、気象要素を計測するが、全ての要素を1つのロガーで収録している。電源は26.4 Wの太陽電池パネル、チャージコントローラー、60 Ahのバッテリーで構成されている。

また、気温湿度計シェルターにはそれぞれ2.5 Wの太陽電池パネルとファンを取り付け、日照時のみファンが回転する。都市域常設観測システムは1999年7月より運用を開始した。また長浜市内の民家でも、埼玉大学チームがキャニオンスケールの熱環境観測を実施して(2000年12月まで)。

9.4.5 携帯電話によるデータ通信

熱収支観測をする場合、理想的な観測場所を求めれば、通常は電話回線や商用電源を期待できない。そこで、電源にはセンサーの消費電力から適正なサイズの太陽電池パネルとバッテリーを用意する。また通信に関しては、携帯電話の通話範囲が拡大してきたため、市街地に限らず、見晴らしの効く場所では携帯電話を利用できる可能性が高い。

これまで紹介してきた常設観測システムに使用しているデータロガー(Campbell, Grant)およびそのデータ回収ソフトはパソコンのシリアル接続だけでなく、携帯電話による通信機能をサポートしているので、全てのサイトに携帯電話を用意した。ただし、携帯電話を使用する場合には専用のモデム(NTT, モバイルアダプター96F2)が必要である。またこのモデムの消費電

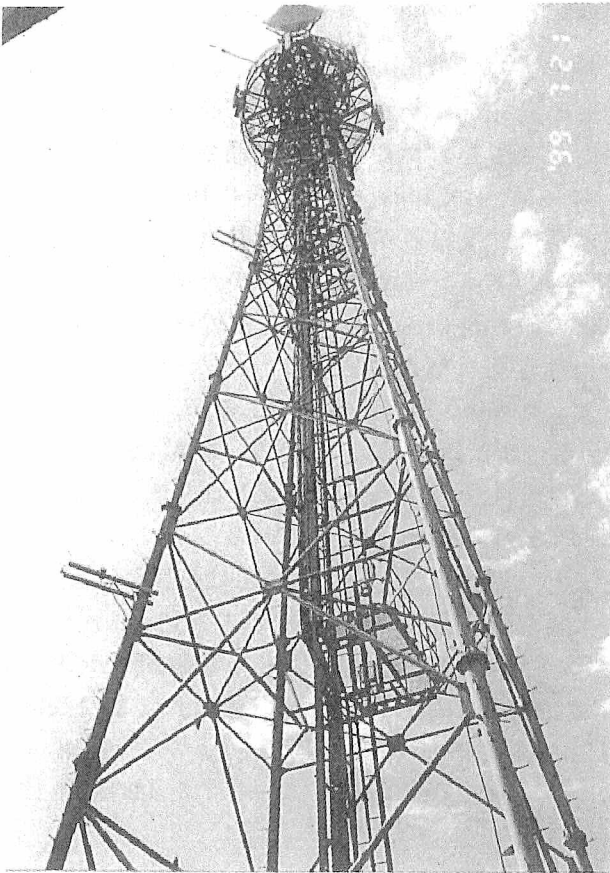


図 9.4.4: 都市観測システム

流は 60 ~ 80 mA とやや大きいため、タイマーを使って1日に4時間だけモデムに電源を供給することにした。

遠隔地からデータロガーにアクセスすることができるようになってもトラブルがなくなるわけではないが、少なくともトラブルの早期発見、早期解決につながる。冬期には特に森林サイトでは積雪量が多く現場には近付けない。また湖面では天候が荒れると現場に近付けない。そのような場合にも、いかなる天候でも、電源が落ちない限り、観測データを確認したり、データを回収したりできるのが、携帯電話によるデータ通信の最大の利点である。

表 9.4.4: 都市域観測のセンサー

要素	センサー	設置高度
放射収支(4成分)	Kipp&Zonen CNR1	47m
地表面放射温度	OPTEX BS-30T	43m(3つ)
風向	Vector W200G	44m
気温プロファイル	Vaisala VH-G-Z	44,26,10m
湿度プロファイル	Vaisala VH-G-Z	44,26,10m
風速プロファイル	Vector A100L2	44,26,10m
データロガー	Grant SQ1036U	43m

9.4.6 4地点の晴天日の熱収支

4つの常設観測システムで得られた夏期の晴天日の熱収支の日変化を図9.4.5に示す。ただし、水田ではボーエン比熱収支法、森林では顕熱をSATで、潜熱を熱収支の残差として、湖面と都市では潜熱と顕熱をバルク法で(Gは残差)で計算している。

水田の蓄熱項は土壌と水体への蓄熱の合計である。蓄熱項の位相は水深にも大きく影響する。森林のSATについては降雨日に問題があり、地形の影響もあるので、ボーエン比法による結果も併用していく必要がある。湖では日射が水面から透過するので、大部分が蓄熱に回る。残差で求めた蓄熱項を水温プロファイルから計算した値でチェックする必要がある。都市ではキャニオンスケールの観測とタワーでの観測との併用も重要である。複数の観測・解析手法でチェックできるようにシステムを組んでおけば、観測精度も保証され、トラブル時のバックアップにもなる。今後も観測項目や観測方法を検討して行きたい。

なお、琵琶湖プロジェクトの最新情報は <http://www.wrrc.dpri.kyoto-u.ac.jp/biwapro/biwapro-j.html> でご確認ください。(田中賢治)

参考文献

中北英一・砂田憲吾 (1997): 琵琶湖プロジェクト-その歩みと現在, 第5回水資源に関するシンポジウム論文集, pp.689-694.
 中北英一・砂田憲吾 (1998): 琵琶湖プロジェクトについて, 水文過程のリモートセンシングとその応用に関するワークショップ論文集, 地球科学技術フォーラム, pp.1-10.
 西川 敦, 戎 信宏, 田中隆文, 吉田 弘 (2000): 急斜面上の森林の接地気象特性-琵琶湖プロジェクト気象観測タワー, 第2回水文過程のリモートセンシングとその応用に関するワークショップ論文集, 地球科学技術フォーラム, pp.119-124.

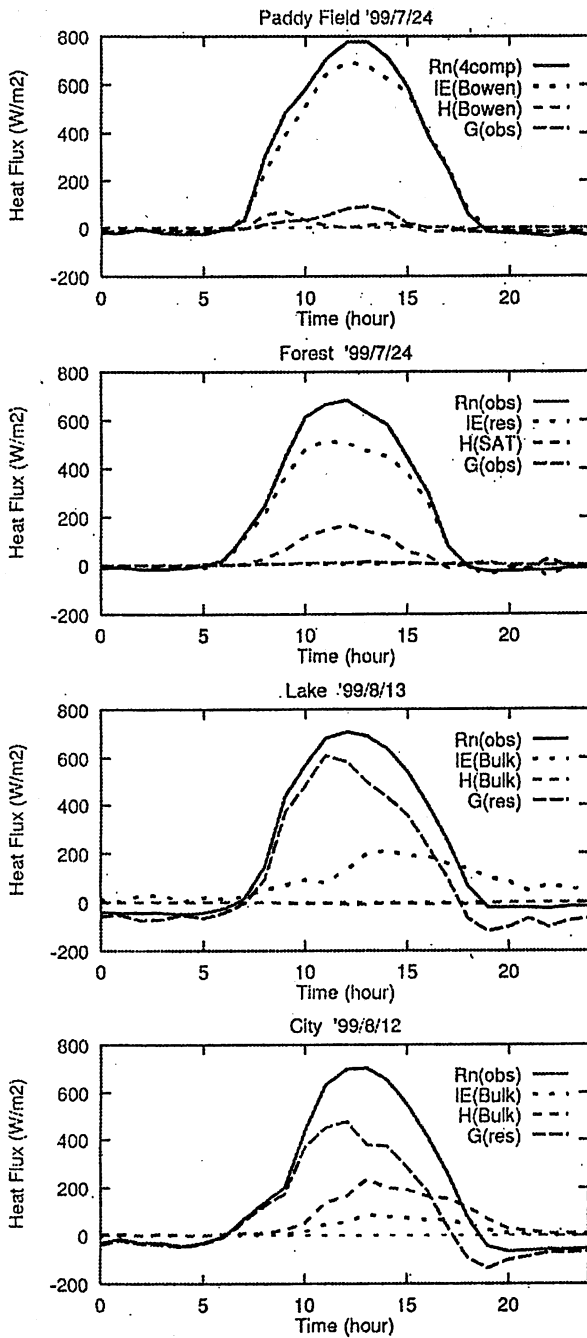


図 9.4.5: 夏期晴天日の熱収支

9.5 グローバルフラックス測定網 / FLUXNET 計画

9.5.1 はじめに

地球上の炭素は大気, 海洋, 陸上植生, 地圏という貯蔵庫に蓄積・存在している。また, 炭素はこれらの貯蔵庫の間で気体, 無機炭素, 有機炭素と形を変えながら, 出入りし, 循環している。現在, 大気中の二酸化炭素濃度が増加しているが, それは化石燃料消費や熱帯林の破壊などの人間活動による大気への CO₂ 放出 (大気貯蔵庫への入) が海洋および陸上植生の貯蔵庫への吸収・固定能力を上回り, 炭素の大気貯蔵量が増えていると言いかえることが出来る。そこで, 大気中二酸化炭素濃度上昇とその将来推移を考える上で, 各貯蔵庫間の炭素の出入りの定量的解明が大変重要になる。しかしながら, 化石燃料消費とセメント生産にともなう放出量, 大気中の CO₂ 濃度についてはかなり正確であるが, その他の正味の交換量 (フラックス) については ±50 ~ ±100% もの大きな誤差があるものと考えられている (IPCC, 1995)。

また, 二酸化炭素濃度の上昇量を一定程度に押さえ濃度を安定化させるには人間活動にともなう二酸化炭素の大気への放出量を削減するとともに, 大気からの吸収・固定量を増大させることが必要である。植林等森林生態系の適正な管理がその吸収・固定能力を増加させるのにどの程

表 9.5.1: 資環研観測タワー（岐阜県高山市）での測定項目、測定機器、型番および測定高度。

項目	機器	型番	測定高度 (m)
全天日射	全天日射計	EKO MS41	25.5
アルベード	アルベドメータ	EKO MR21	25.5
赤外放射	赤外放射計	EKO MS201	24.5
樹冠放射温度	放射温度計	HORIBA	24.0
光合成有効放射	光子センサー	KOITO IKS27	19.5, 2.0
風向・風速	風向風速計	EKO MA050	26.0, 10.0
気温・相対湿度	温湿度計	VAISALA HMP	25.5, 19.0, 9.0
CO ₂ 濃度平均値	赤外線分析計	Beckman Model 880	27.0, 18.0, 8.8, 5.8
風速・気温変動	超音波風速温度計	KAIJO DAT600	25.0
CO ₂ ・H ₂ O変動	赤外線分析計	LI-COR LI-6262	25.0
地温	白金抵抗測温体		-0.01~-0.50(5深度)
地中伝導熱	熱流板	EKO MF81	-0.02
土壌水分量	TDR 土壌水分計	Campbell CS615	-0.15, -0.40
葉面積指数	プラントキャノピーアナライザ	LI-COR LAI-2000	

度有効であるかをはっきりさせることが1997年12月の京都における気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP3)以降重要な課題となっている。

森林をはじめとする陸上植物生態系の二酸化炭素吸収能力はどの程度なのか?また、二酸化炭素の吸収・固定対策として、どのように森林を管理すれば良いのか? これらに答えるためには大気/陸上植物生態系間での炭素交換過程をグローバルな規模で知らなければいけない。この課題に科学的な基盤を与えることがFLUXNET計画のねらいである。

9.5.2 FLUXNETにおけるタワー観測

FLUXNETの観測計画では大気と森林生態系間のCO₂フラックスを野外でのタワー観測に基づき調べ、大気と森林生態系間のCO₂交換量と気象条件の関係、その季節変化、年々変化を解明する。このようなタワー観測は森林生態系での炭素循環モデルを構築する上で不可欠であり、特定地点での森林上層と大気間のCO₂のフラックスを直接的に知ることが出来、しかも長期的な連続観測に適している。また、タワー観測地点の

周辺で森林生態学的調査を合わせて行うことも重要である(Baldocchi *et al.*, 1996)。このようなタワー観測の試みが世界の諸研究機関、諸大学で始まっている。図9.5.1は資源環境技術総合研究所が岐阜大学流域環境研究センターと協力して行っているCO₂フラックスと気象条件のタワー通年観測の状況を示すものである。タワーの測定項目としては、大気と森林生態系間のCO₂フラックス、CO₂濃度の他に熱や水蒸気のフラックス、気温・風・湿度・日射量等の気象条件がある。さらに、森林生物量、樹種・樹冠高度、葉面積指数(単位面積の地面上にある樹木の葉の面積の総和)、土壌水分・温度、土壌呼吸量、落葉や枯れ枝量とそれらの分解速度等も併せて調べられている。表9.5.1に測定機器、型番、測定高度をまとめて示す。この高山での観測は1993年10月から継続して行われており、世界でも数少ない貴重な長期観測データを取得している(Yamamoto *et al.*, 1999)。

このような個々のタワー観測ではその地域、植物種での炭素循環が解明されるが、その結果は緯度、気象条件の異なる諸地域、色々の植物種に

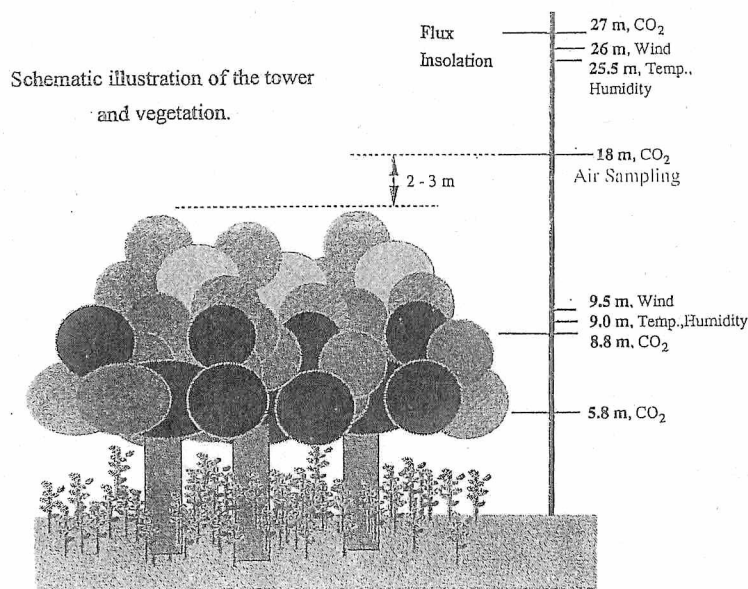


図 9.5.1: タワーによる CO₂ のフラックスと濃度と気象条件の観測。連続測定: CO₂ 濃度 (4 高度), CO₂・水蒸気・熱 フラックス, 風速・風向 (2 高度), 気温・湿度 (2 高度), 日射量, 放射収支量, 地表面・葉面温度, アルベド, 地温, 土壌水分など。その他: 空気のサンプリング, 葉面積指数, 土壌呼吸, 落枝・落葉量, 樹種 (カンバ類, ミズナラ等), 樹高 (15-20 m), 材積量など。

そのまま適用することは勿論できない。陸上植物生態系のグローバルな吸収・固定量を推定するには、気候、緯度などの異なる諸地域での多様な植物種に対する測定結果を集結し、総合的に解釈することが大切である。FLUXNET 計画では世界の諸地域に測定ネットを構築し、さらに世界的な規模で協力してゆくことを目指している。

9.5.3 世界のフラックス測定ネット構築の現状

現在アメリカやヨーロッパではすでにフラックス測定網 (AmeriFlux, EUROFLUX, MedeFlu) が構築されており、これら相互の連携を図り、発展させて世界のフラックス測定ネットを構築しようという動きが始まっている。1998年6月にアメリカのモンタナ州ボルソンで世界のフラックス研究者のワークショップ (FLUXNET1998) が開かれ、フラックス研究の現状と課題、世界のフラックス測定ネットについて活発に議論された。このワー

クショップを契機に地域ネットのパートナーシップとしてのグローバル測定ネット網 / FLUXNET の構築の機運が高まっている。図 9.5.2 にタワー観測サイト、地域のフラックス測定ネットと世界の FLUXNET の協力関係を模式的に示している。

図 9.5.3 に計画も含めて、世界のフラックス長期測定地点の位置の概略を示す。このマップにはアメリカ大陸の測定ネット (AmeriFlux) で 17 地点、ヨーロッパ (EUROFLUX, MedeFlu) で 17 地点、アジア (AsiaFlux) で 6 地点、オセアニアなどで 4 地点の測定サイトがある。ここ 1-2 年で測定地点が大幅に増えて、現在 60 以上の地点で観測が開始されている。樹種別には亜寒帯針葉林、熱帯林が不足している。さらに地域別にはアジア、アフリカ、南アメリカ、オセアニア等の測定地点数が不足しており、その増強が必要である。また、測定地点の多くは保全状態の良い森林に設営されていると考えられるが、人為的な伐採、自然災害、森林火災等を受けた履歴の異なる地点での測定も重要となる。

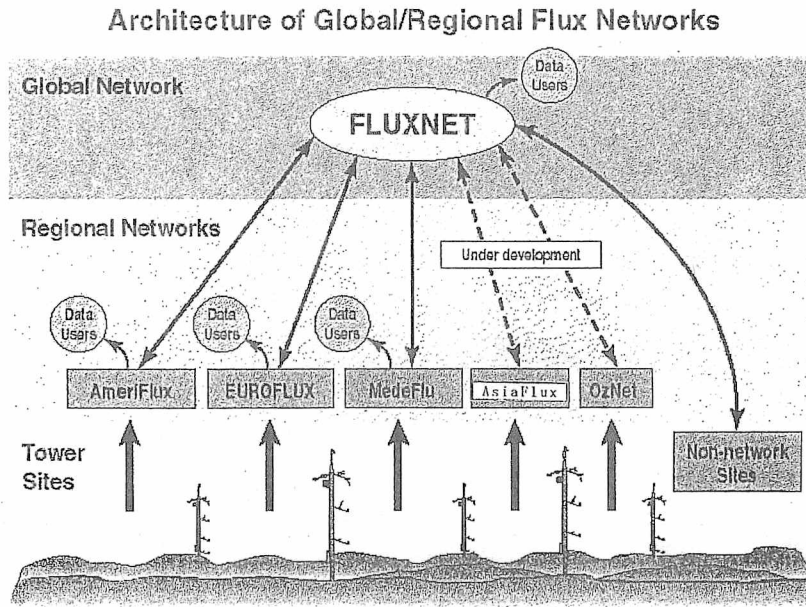


図 9.5.2: タワー観測サイト, 地域フラックス観測ネットとグローバルなネット (FLUXNET) の関係 (Valentini R. 他, 1999 より引用)。

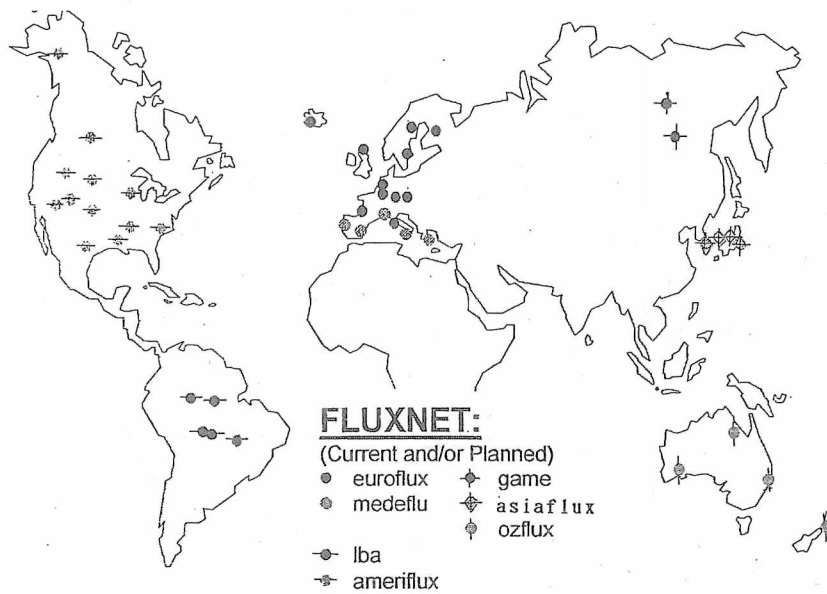


図 9.5.3: 世界のフラックス長期測定地点の位置マップ (BAHC NEWS, 1998)。

表 9.5.2: 世界の各種森林でのタワー長期観測から求めた森林生態系の炭素吸収・固定量（単位は tC/ha/年），気象条件等：気温（°C），降水量（mm），海拔高度（m），葉面積指数（LAI）を示す。

Site (ref.)	Carbon uptake	Ecosystem respiration	Gross production	Remarks
Massachusetts, USA (Wofsy et al., 1993) (Goulden et al., 1996)	3.7 (1991) deciduous forest (oak, maple, pine) 2.1 (1994)	7.4 —	11.1 —	7.5°C — mm 340 m —
Oak Ridge, TN, USA (Greco et al., 1996)	5.3 deciduous forest (oak, hickory, maple), LAI = 4.9	—	—	13.9°C 1350 mm 365 m
Central Italy (Valentini et al., 1996)	4.7 deciduous forest (almost pure beech), LAI = 4.6	5.4	10.1	7.2°C 1100 mm 1564 m
Rondonia, Brazil (Grace et al., 1996)	1.0 tropical rain forest (palm rich), LAI = 4	23.4	24.4	120 m
Manaus, Brazil (Malhi et al., 1997)	5.9 tropical rain forest, LAI = 5.6	24.5	30.4	2200 mm 90 m
Saskatchewan, Canada (Black et al., 1996)	1.3 boreal forest (aspen, jack pine, hazelnut), LAI = 3.3	8.9	10.2	458 mm 1564 m
Takayama, Japan (Yamamoto et al., 1998)	1.8 (1994) deciduous forest (birch, oak), LAI = 3.5	6.2	8.0	7.3°C 2382 mm 1420 m

9.5.4 フラックス観測で得られた成果

世界数カ所で行われているこのようなタワー
 通年観測による CO₂吸収・固定量の推定結果を表
 9.5.2 にまとめて示す。それによると 1-5 tC/ha/
 年とその幅は大きいですが、いずれの地点でも森林
 生態系が CO₂を吸収しているという結果になっ
 ている。この結果を用いて、世界の保護林（530
 万 km²:全森林面積の 13%）による CO₂取り込み
 量を推定すると 0.6-2.2 GtC/年となる。このよう
 な現場での直接的な CO₂フラックスの測定結果
 から IPCC（1995）が化石燃料消費と熱帯林破壊
 などの土地利用変化に伴う大気への放出量から
 大気への残留量と海洋への吸収量を差し引いた
 残り、森林再生やその他の植生活動によると
 想定している吸収・固定量推定値（0.5-1.9 GtC/
 年）に相当する値が得られる事は注目される。

図 9.5.4 は日本／高山冷温帯落葉広葉樹林での
 CO₂フラックスの季節・経年変化（日中，夜間，全
 日別の CO₂交換量の月別積算値，1993 年 10 月～
 1998 年 12 月）を示す。測定地点の海拔高度は

1420 m，平均気温 7.3°C，年間降水量 2400 mm，
 積雪量 1～1.5 m で，主要樹種はカンバ類，ミズ
 ナラで樹高は 15～20 m である。森林が活動を
 開始する 5 月末から光合成が盛んになり，CO₂
 交換量が正の値（森林への CO₂吸収）となり 7，
 8 月に CO₂吸収量が最大になっている。9 月にな
 ると森林の生産活動が弱まり CO₂吸収量は急減
 する。落葉の時期は 10 月上旬で，積雪は 12 月上
 旬から 4 月中旬の間見られる。また，フラックス
 の年々変動，たとえば 1994 年夏季と 1995 年夏季
 の日中の CO₂吸収量を比較すると，後者は前者
 の 70%程度と小さく，特に 6，7 月にその傾向が
 顕著である。このような年々変動は森林の光合
 成量，有機物分解量が日射量，気温の変化や梅
 雨の活動状況に関係していると考えられ，将来
 の気候変動により森林生態系の CO₂吸収量が変
 わることを示唆している。

図 9.5.5 はヨーロッパのフラックス長期測定結
 果から推定した二酸化炭素吸収量（負値は大気
 から森林生態系への取り込み）を緯度別に示し
 たものである。これから，ばらつきは大きいですが，

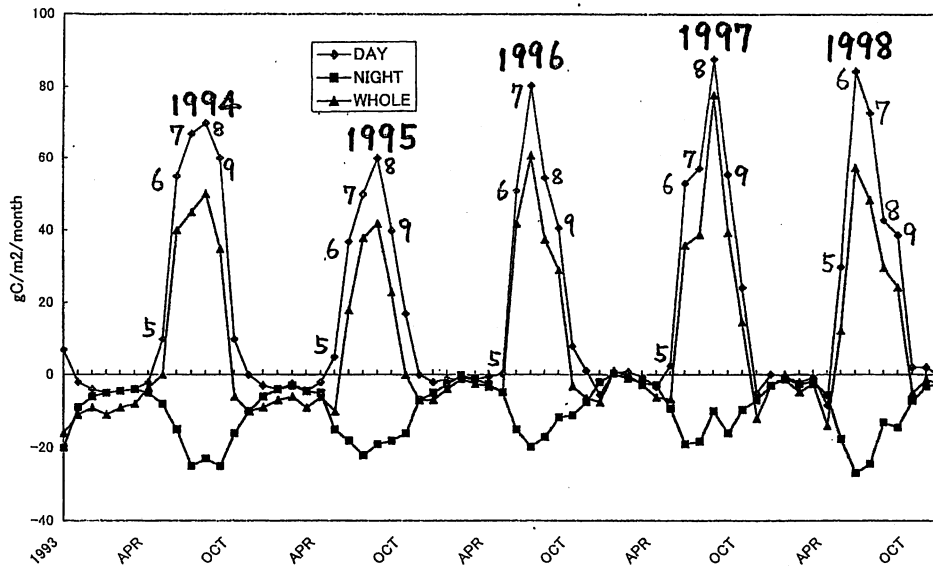


図 9.5.4: 日本／高山冷温帯落葉広葉樹林での CO₂フラックスの季節・経年変化（日中，夜間，全日別の CO₂交換量の月別積算値：1993年10月～1998年12月，ここで正值は大気から森林生態系への取り込み）。

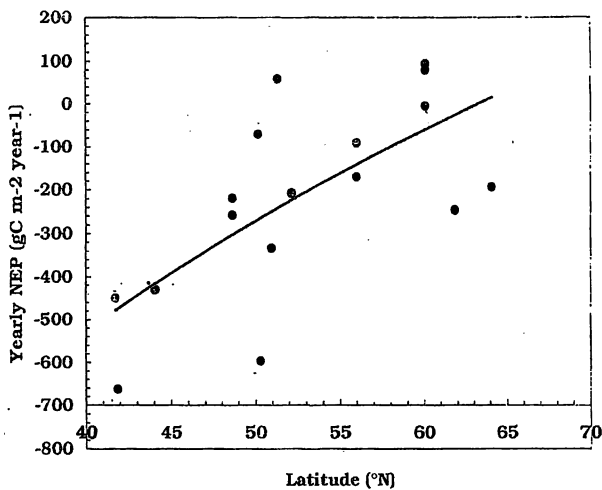


図 9.5.5: ヨーロッパのフラックス長期測定結果による二酸化炭素吸収量（ここで負値は大気から森林生態系への取り込み）の緯度変化 (BAHC NEWS, 1998)。

中緯度では年間 500 gC/m^2 (5 tC/ha) と大きな吸収となっているが，高緯度ではゼロになっていることが分かる。

9.5.5 アジアのフラックス測定ネット構築に向けて

FLUXNET 計画は各国，地域の調査活動さらには個々の研究機関・大学の色々のプロジェクトを集結して行うものである。そのような点から次のような共通の基盤を作る活動が重要となる。

(1) 測定手法や解析手法を検討し，データの質を高めるための技術交流，ワークショップの開催
 全地球的な炭素収支の解明には個々の地点での解析と共に世界的なスケールでのデータの交換と集積（データベース化）が重要になる。さらに，衛星観測による植生活動指数とタワー観測データを比較したり，多地点での炭素吸収・固定量推定値を結合するためにはデータの均質性，測定法や解析方法などの標準化が不可欠となる。また，現在フラックス測定においては渦相関法が広く使用されているが，その問題点も指摘されており，フラックス測定誤差の定量的検討も必要である。技術交流やワークショップの開催を通じて，測定手法や解析手法の高度化や標準化を図る。

(2) 日本/アジアのフラックス測定ネットの確立
日本の研究者による森林でのCO₂フラックス長期測定地点は国内で数カ所、東南アジア・シベリアで数カ所あるが、個別に行われているのが現状である。また、北米、ヨーロッパと異なる人為活動やモンスーン気候条件下にあるシベリアやアジアにおけるフラックス測定網の構築は独自の重要性を持っている。アジアのフラックス測定網(AsiaFlux)の運営委員会が1999年9月に発足したが、これを軸にアジア各国の研究者と共同でAsiaFluxの活動を幅広く展開する。

(3) 世界のフラックス観測ネット：FLUXNETの構築

AsiaFluxの活動を基礎に、世界の各地域のフラックス測定ネットと連携して世界規模のFLUXNETデータベースを構築する。

FLUXNET、AsiaFluxの活動内容についてさらに詳しく知りたい方は下記のホームページを参照あるいは連絡先にお問い合わせください。

[関連ホームページ]

AsiaFlux:

http://www-cger.nies.go.jp/~moni/flux/asia_flux

EUROFLUX: <http://gaia.agraria.unitus.it>

AmeriFlux:

<http://cdiac.esd.ornl.gov/programs/ameriflux>

FLUXNET:

<http://www-eosdis.ornl.gov/FLUXNET/>

資環研:

<http://www.nire.go.jp/~atmosenv/CO2/co2.html>

[AsiaFlux運営委員会連絡先]

山本 晋 経済産業省
資源環境技術総合研究所
〒305-8569
茨城県つくば市小野川16-3
Tel: 0298-61-8360 Fax: 0298-61-8358
E-mail: yamas@nire.go.jp
(山本 晋)

参考文献

- 山本 晋, 村山昌平, 近藤裕昭, 西村 格, 1998: 森林生態系の二酸化炭素吸収・交換量についての一考察, *資源と環境*, **7**, 73-81.
- BAHC (Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle) NEWS, 1998: No. 6 (December, 1998).
- Baldocchi D., Valentini R., Running S., Oechels W. and Dahlen R., 1996: Strategies for measuring and modeling carbon dioxide and water vapor fluxes over terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, **2**, 159-168.
- Black T.A., Hartog G.D., Neumann H.H., Blanken P.D., Yang P.C., Russell C., Nesic Z., Chen S.G., Staebler R. and Novak M.D., 1996: Annual cycles of water vapor and carbon dioxide fluxes in and above a boreal aspen forest. *Global Change Biology*, **2**, 219-229.
- Goulden M.L., Munger J.W., Fan S.-M., Daube B.C. and Wofsy S.C., 1996: Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology*, **2**, 169-182.
- Grace J., Malhi Y., Lloyd J., McIntyre J., Miranda A.C., Meir P. and Miranda H.S., 1996: The use of eddy covariance to infer the net carbon dioxide uptake of Brazilian rain forest. *Global Change Biology*, **2**, 209-217.
- Greco S. and Baldocchi D., 1996: Seasonal variations of CO₂ and water vapor exchange rates over a temperate deciduous forest. *Global Change Biology*, **2**, 183-197.
- IPCC Second Assessment, 1995: A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Malhi Y., Higuchi N., Nobre A.D., Grace J., Pereira M.G.P. and Ribeiro, R.J., 1997: Direct measurement of carbon sink in a area of tropical rain forest. *Proc. Fifth International Carbon Dioxide Conference*, 1979.
- Valentini R., De Angelis P., Matteucci G., Monaco R., Dore S. and Mugnozza G.E.S., 1996: Seasonal net carbon dioxide exchange of a beech forest with the atmosphere. *Global Change Biology*, **2**, 199-207.

Valentini R., Baldocchi D., and Olson R., 1999: Global Change News Letter No. 37 (March, 1999).
Wofsy, S.C., Goulden, B.C., Munger, J.W., Fan, S.-M., Bakwin, P.S., Daube, B.C., Bassow, S.L. and Bazzaz, F.A., 1993. Net exchange of CO₂ in a

mid-latitude forest. *Science*, 260, 1314-1317.
Yamamoto S., Murayama S., Saigusa N. and Kondo H., 1999: Seasonal and inter-annual variation of CO₂ flux between a temperate forest and the atmosphere in Japan. *Tellus*, 51B, 402-413.