水文・水資源学会誌
J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.
Vol. 13, No. 4 (2000) pp. 276-290

熱帯モンスーンアジアの代表的な土地利用上における CO₂交換過程の日・季節変化

Diurnal and Seasonal Variations of CO₂ Exchange Processes over Typical Land Covers in Tropical Monsoon Region.

戸田 求*・大手信人*・谷 誠*・田中広樹* (京都大学農学研究科)

Motomu TODA・Nobuhito OHTE・Makoto TANI・Hiroki TANAKA

Graduate School of Agriculture, Kyoto University

虫明功臣**

(東京大学生産技術研究所)

Katumi MUSLAKE

Institute of Industrial Science, University of Tokyo

青木正敏***

(東京農工大学農学部)

Masatoshi AOKI

Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology

サマッキー ボーンヤワット****

(カセサート大学林学部)

Samakkee BOONYAWAT

Faculty of Forestry, Kasetsart University

Seasonal flux of carbon dioxide was observed over the typical land covers in tropical monsoon environment as a part of GAME (GEWEX Asian Monsoon Experiment) campaign from 1998 to 1999. The land covers of complex area and paddy field region were selected as observation sites. From seasonal observational results over both land covers, the maximum values of daytime and nighttime CO₂ fluxes over both land covers ranged from -1.2 to -1.0 mg CO₂ m⁻² s⁻¹ and from 0.2 to 0.5 mg CO₂ m⁻² s⁻¹ on the hourly basis in growing season, and they were similar to the observational results over same land covers in temperate environment. It also found that photosynthetic activities were seen even in dry season over the both land covers and was suggested that there is the possibility of the carbon sink for them through a year. Evapotranspirated and photosynthetic parameters to environmental factors during rainy seasons were extracted using canopy simple layer model combined with the canopy conductance model and bio-chemical model for each land cover. The effects of canopy conductance on environmental variables such as photosynthetic active radiation (PAR) and vapor pressure deficit (VPD) for paddy region was larger than that of complex area in rainy season. The calculated CO₂ flux of paddy region exceeded that of complex area daytime radiative condition, and it was implied that it was attributed to the differences of the radiative characteristics such as penetration and reflection for each canopy structure.

Key words: Tropical monsoon environment, CO₂ flux, seasonal variation, Atmospheric-land interaction, Canopy single layer model

1998～1999年に行われた、GAME(GEWEX Asian Monsoon Experiment)プロジェクトの枠組みのもと、熱・水収支の解明と併せて熱帯モンスーン気候帯における大気-陸面間のCO₂フラックスの季節変化を明らかにするため、タイ国の典型的な土地被覆(複雑地表面、水田地域)においてCO₂フラックス観測が実施された。観測結果より、雨季での両地表面において、日中のCO₂ fluxは-1.2～-1.0 mg CO₂ m⁻² s⁻¹の範囲の値となり、高い光合成速度が示された。また、夜間におけるCO₂放出量は0.2～0.5 mg CO₂ m⁻² s⁻¹

*京都大学農学研究科地域環境科学専攻 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

Division of Environmental Science and Technology, Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Kitasirakawa Oiwakecho Sakyo-ku Kyoto city, Kyoto, 606-8502, Japan

**東京大学生産技術研究所 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1

Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 4-6-1 Komaba Meguro-ku Tokyo, 153-8505, Japan

***東京農工大学農学部 〒183-8509 東京都府中市幸町 3-5-8

Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, 3-5-8 Saiwai-cho Fuchu city, Tokyo, 183-8509, Japan

****カセサート大学林学部 バンコク10900, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

s^{-1} となった。これらの結果から、植物活動期では暖温気候帯で行われた同様の土地被覆上での観測結果と同程度の値となり大きな違いは見られなかった。一方、乾季においても両観測地において光合成活動が確認され、両地表面は年間を通じた CO_2 吸収源である可能性が示唆された。また、植物活動期の雨季を対象に群落コンダクタンスモデル、生化学モデルを組み込んだ群落単層モデルを用いて各土地被覆における蒸発散特性・光合成特性を示すパラメータを抽出し、比較を行った。雨季での環境要因に対する群落コンダクタンスの応答は複雑地表面に比べて水田地域が大きかった。また、 CO_2 フラックスは、日中の光条件において水田地域における値が複雑地表面のそれを上回り、これは各植生群落の光透過・反射特性の違いに起因するものと考えられた。

キーワード：熱帯モンスーン、 CO_2 フラックス、季節変化、大気―陸面相互作用、群落単層モデル

I. はじめに

GAME(GEWEX Asian Monsoon Experiment, アジアモンスーン実験)の枠組みにおいて、熱帯の比較的広い面積を占める典型的な土地被覆において大気―陸上生態系間の二酸化炭素(以下 CO_2 とする)交換過程の季節変化を明らかにするため、乱流変動法に基づく CO_2 フラックス観測を行った。

従来の研究から陸上生態系は海洋に次ぐ炭素吸収源であると考えられきた。現在の課題は光合成・呼吸を介した植物活動の影響を反映した年間の CO_2 収支量を定量的に評価することであり、気候変動に与える陸上植生の役割を理解することである。

近年では、多様な気候帯や植生上において CO_2 フラックスの季節変化および年々変動を解明するため、多くの野外観測が行われている。これまで長期間の CO_2 フラックスを評価する手法として、モニンオブコフ相似測に基いた傾度法が用いられてきた(例えば、三枝ら, 1995; Toda *et al.*, 2000a)が、近年では乱流変動法を用いた連続観測が主流となってきた(例えば、Baldocchi, 1994; Baldocchi *et al.*, 1997; Valentini *et al.*, 1996; 安田ら, 1998; Anthoni *et al.*, 1999)。

また、近年においてはラージスケールの熱・水循環に及ぼす大気―陸面過程の物質輸送過程が非常に重要であるという認識が高まってきただけでなく、いわゆる地球温暖化に関連して、全球における炭素収支と陸面の炭素収支に果たす役割の解明が重要であることがわかってきた。これらの背景から、陸上生態系の CO_2 や H_2O 交換過程のモデル化が盛んに行われてきた(例えば、Dolman, 1993; Watanabe, 1993; Saigusa *et al.*, 1996)。Maitani *et al.* (1995)はオアシス小麦畑における地表面フラックスと CO_2 フラックスの野外観測をおこない、Goudriaan(1989)に基づく群落単層モデルを用いた数値実験を行った。Dolman(1993)は、HAPEX-Sahelプロジェクトにおける大気―陸面相互作用解明のために実施された数種の土地利用での H_2O 交換過程をそれぞれの群落に対してPenman-Monteithモデルを適用した、‘coupled

model’を提唱した。Saigusa *et al.* (1996)は、暖温帯気候下に生育する C_3 植物と C_4 植物が混在した地表面において、堀江(1981)に基づく植物の光応答過程を考慮した群落多層モデルを用いて、草地群落における CO_2 交換過程について考察した。

また、田中(1999)および田中ら(2000)は、温帯針葉樹林および亜寒帯タイガ林において行った CO_2 および水蒸気フラックス観測と開発した群落単層モデルによって一般気象要素から CO_2 ・ H_2O フラックスを算出し観測値との比較を行った。その際、温帯針葉樹(ヒノキ林)においては森林群落の蒸散・光合成に対する葉面積の季節変化の影響は無視できるとした。一方、田中ら(2000)によると、アカマツ林が卓越するシベリアタイガ林においては樹木の生理特性に関わる季節変化は著しく、その結果パラメータを季節変化させることによって群落単層モデルによって算出される CO_2 ・ H_2O フラックスを評価した。このようにモデルを適用する場合には、異なる気候帯や植物の特性に合わせてモデルのパラメータ決定を行う必要がある。

本研究では上記の点に留意し、熱帯の特徴的な季節(雨季と乾季、その移行期)に着目し、次の2点を研究目的とする。

- ① 熱帯モンスーンアジアにおける代表的な地表面状態である2つの土地利用上(複雑地表面、水田地域)において、気象・水文条件の季節変化と各地表面の植物の季節変化に伴う、 CO_2 フラックスの季節変化を評価する。
- ② 各土地利用における地表面フラックスと環境要因との関係を明らかにし、群落コンダクタンスモデル、生化学モデル中における蒸発散特性、光合成特性を示すパラメータを決定する。

これまで CO_2 フラックスの季節変化に関する観測的研究は、熱帯モンスーンアジアにおいてほとんど行われていない。本研究では定期的な野外観測によって、熱帯モンスーンアジアにおける CO_2 フラックスの季節変化の振舞いを解明するための初めての試みとなる。

II. 観測方法

1. 観測地の特徴

野外観測はタイ国Sukhothai州とTak州近郊に位置する、複数の土地被覆が混在する地域(以下、複雑地表面と記述する)(99° 25' 78" E, 16° 56' 38" N, 海拔121m)と水田地域(17° 03' 54" N, 99° 42' 19" E, 海拔50m)で実施された(Toda and Ohte, 1999). 両者の直線距離は約80kmであり、その区間内には100m程度の小高い丘陵地が存在するが全体として平坦な地表面である。現地の気候は、主に降水量が少なく乾燥した期間(乾季, 12月~3, 4月), 降水量が多く湿潤な期間(雨季, 5月~11月), その移行期に分類される。集中観測が行われた期間はこれらの各季節に焦点を当て、それぞれの気象条件で異なる地表面状態における地表面熱収支とCO₂フラックスの特徴を把握することを試みた。表-1 および表-2に

は各観測地ごとの観測概要と観測期間を示す。複雑地表面上においては1998年3, 5, 8~9月, 1999年2~3月の計4回行われた。また、水田地域においては1998年3月, 9月, 1999年3月の計3回が実施された。

複雑地表面観測地ではタイ発電局(Electricity Generating Authority of Thailand, EGAT)所有の高さ120m通信タワーを用いて気象観測が行われた。図-1はタワーを中心とした半径20×20kmの土地利用分布を表している。地表面の多くは、粗な常緑・落葉樹林、水田、農耕地その他、集落、貯水池などが見られるが、乱流測定器は年間を通じたおおよその卓越風向を考慮して南東向きに取り付けられている。そのため、測定される観測値は森林、水田、耕作地を主に反映していることになる。タワー周辺には常緑樹が林立し、風上側の多くを占める落葉樹林は竹林が混じり、乾季にはほぼ落葉する。しかし、降水量

表-1 CO₂フラックス集中観測が行われた観測地の概要

Table 1 Summary of CO₂ flux observation sites during intensive observation period

観測地	地表面状態	観測地点	タワー高度(m)	測定高度	平均群落高(m) ^{*1}	観測期間 ^{*2}	葉面積指数 ^{*3}
複雑地表面	常緑・落葉樹林	99° 25' 78" E	120	29.9	20.5	1998. 3/3-5 (3)	0.5-0.75
	農耕地, 水田など	16° 56' 38" N			20.5	1998. 5/22-23 (2)	-
					20.5	1998. 8/23-9/9 (18)	1.2-1.5
					20.5	1999. 2/16-3/3 (17)	0.5-0.75
水田地域	水田, 常緑林	99° 42' 19" E	12	5.9	-	1998. 3/8-9 (2)	-
		17° 03' 38" N			1.8 (水稲のみ)	1998. 9/19-26 (8)	-
					-	1999. 3/8-9 (4)	-

*1 ここで示した複雑地表面の平均群落高はタワー周辺の常緑林のみを表す。また、水田地域については雨季の水田における値を示す。

*2 ()内は全観測日数を示す。

*3 複雑地表面の葉面積指数は、LANDSAT-TMデータからNDVIを決定し、Nemani et al. (1989)で示されたNDVI-LAIの関係式 $LAI=1.71NDVI+0.48$ を用いて決定された。(詳細はToda et al. (2000b)参照)

表-2 複雑地表面・水田地域両観測地における一般気象・水文観測項目(1999年3月現在)

Table 2 Observation components of complex area and paddy region, respectively

観測地	測定項目	測定器	モデル・業者	高度(m)
複雑地表面	短波・長波放射(4成分)	放射収支計	CNR1, Kipp & Zonen	5
	正味放射	正味放射計	Q7, REBS Inc.	5
	光合成有効放射	光量子計	LI-190SZ, LiCOR	5
	放射温度計	放射温度計	4000-4GL, Everest	29.9
	温度・湿度	静電容量式温度湿度計	HMP35A, Vaisala	29.9
	風向・風速	風向・風速計	CS800-L, Campbell Sci.	29.9
	雨量	転倒マス型雨量計	TE525M, Texas Electronics	ground
	地中熱流量	熱流版	107-L, 英弘精機	0.01
	地温	白金抵抗温度計	107-L, Campbell Sci.	0.05, 0.1
	体積含水率	TDRセンサー	CS615, Campbell Sci.	0.05, 0.15
水田地域	短波放射(全日射量)	短波放射計	PMC-3, Kipp & Zonen	3.5
	正味放射	正味放射計	MF-40, 英弘精機	3.5
	温度・湿度	温度・湿度・風速成分		
	10対式差温型温度計		メテオ電子	2, 9.5
	風向・風速	風向・風速計	05103, R. M. Young	10.5
	雨量・地中熱流量	転送マス式雨量計熱流版	KDC-S13, コーナシステム MS-81, 英弘精機	0.60, 0.01
	地温(または水温)	サーミスタ温度センサー	KDC-S1, コーナシステム	0.01
	水深	水位計	MIZU1mset, コーナシステム	0.25

図-1 複雑地表面周辺の土地利用図(1999年)地図中心が観測タワー(120m) (西田顕郎博士作成)
Fig. 1 A scheme of land cover around the complex area as the center of the observation tower

がほとんど見られない乾燥した期間においても植生活動による水蒸気交換が確認されている(Toda *et al.*, 2000b)。周辺地域の水田は灌漑されない天水田で、主に川沿いに分布している。水田は一期作であり、例年雨季の始まる5月～7月にかけて田植えが行われ11月に収穫が行われる。

もう一つの観測対象地である水田地域では青木ら

(1998)によれば、微気象観測システムによって乾湿球温度計、正味放射計、風向風速計などの一般気象要素が30分平均値で記録されている。地表面は天水田が十分広い吹走距離を持って広がっており、ところどころ樹高5～10m程度の立木が散在している。そこで、南側の卓越風向側の木々は、5mに切木されている(Aoki *et al.*, 1998)。

本研究において以下の熱収支式が考慮された。

$$R_n = LE + H + G \quad (1)$$

ここで、 R_n は正味放射量(W m^{-2})、 G は地中熱流量(W m^{-2})、 L は蒸発の潜熱(J kg^{-1})、 E は水蒸気フラックス($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)を表す。また、 H は顕熱フラックス(W m^{-2})で、

$$H = c_p \rho w' T' \quad (2)$$

である。ここで、 c_p は定圧比熱($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)、 ρ は空気密度(kg m^{-3})、 w' は鉛直風速変動成分(ms^{-1})、 T' は気温の変動成分($^{\circ}\text{C}$)である。雨季の水田の場合には、水体が存在するため次式となる。

$$R_n = LE + H + G + S_T \quad (3)$$

ここで、 S_T は水体熱貯流量(W m^{-2})を示し、

$$S_T = 166.68 K_w h_w \frac{dT_w}{dt} \quad (4)$$

とした。ここで、 K_w は水の定圧比熱容量($\text{J K}^{-1} \text{g}^{-1}$)で4.18とした。また h_w は水深(m)、 T_w は水温(K)を示す。

2. CO_2 フラックス算出方法

CO_2 フラックス F_c は、超音波風速計(DA-600, カイジョー社製)と非分散型赤外線ガス分析計(LI6262, LI-COR社製)を用いて、Closed-path法によって算出された。超音波風速計では3成分の風速変動と仮温度が測定された。ここで使用された超音波風速計のスパン長は10cmである。また、赤外線ガス分析計では CO_2 濃度と水蒸気量が測定され、超音波風速計で測定される風速変動成分と同時に測定することにより、渦相関法による F_c 、 LE の評価が可能となる。測定間隔は10Hz、平均化時間は15分とした。複雑地表面での観測データを用いた周波数解析から鉛直風速 w' (ms^{-1})と CO_2 密度変動 ρ_c' (kg m^{-3})とのコスペクトルを調べた結果(1998年8月27日8:00~8:15(日本時間)の例)、そのピーク値を示す周波数はおよそ0.014Hzとなり、また0.1Hz以上の高周波域の $w' \rho_c'$ の F_c への寄与は小さかった。この結果はマレーシア熱帯雨林で行なわれた数日間の乱流観測データで解析された結果とほぼ一致(環境庁地球環境研究総合推進費終了報告書, 1998)、Closed-path型の赤外線ガス分析計による測定の優位性が示された。また、低周波領域における $w' \rho_c'$ の CO_2 フラックスへの寄与は0.002Hzまでであり、15分の平均化時間によって F_c の評価が可能であることも確認された。

空気取り込み口から分析計までは、外径6mm、内径4mmの測定チューブを用い(長さは各観測時期に

よって若干異なるが3~3.5mの範囲とした)、エアーポンプで毎分1リットルに設定して一定量の空気を取りこんだ。

F_c は、超音波風速計の観測値から計算される、ある瞬間の鉛直風速と CO_2 濃度の測定値から次式のようになれる。

$$F_c = \overline{w' \rho_c'} \quad (5)$$

Leuning and Moncrieff *et al.* (1990)によると、Closed-path型の CO_2 分析計で測定される CO_2 密度と大気中の CO_2 密度には次式の関係がある。

$$\rho_c = \left(\frac{p T_i}{p_i T} \right) \rho_a \quad (6)$$

ここで、 p は気圧(hPa)、 T は温度(K)、添え字 i はClosed-path型 CO_2 分析計の出力値である。この式とWebb *et al.* (1980)によって導出された補正式を用いて F_c は

$$F_c = \left(\frac{p T_i}{p_i T} \right) \overline{w' \rho_c'} + \mu \left(\frac{\rho_c}{\rho_a} \right) \left(\overline{w' \rho_c'} + \left(\frac{\bar{p} v}{T} \right) \overline{w' T'} \right) \quad (7)$$

となる。ここで、 T_i 、 p_i を一定とし、測定セル内の水蒸気密度変動を用いてまとめると、

$$F_c = \left(\frac{p T_i}{p_i T} \right) \left(\overline{w' \rho_c'} + \mu \left(\frac{\bar{p} v}{T} \right) \overline{w' \rho_c'} \right) \quad (8)$$

と表せる。ここで μ は水蒸気分子量に対する乾燥空気の分子量の割合を表す。また、 F_c の測定と同時にガス分析計で測定された、水蒸気量から算出される潜熱フラックス LE は、

$$LE = L \left(\frac{p T_i}{p_i T} \right) \left(1 + \mu \frac{\bar{p} v}{\rho_a} \sigma \right) \overline{w' \rho_c'} \quad (9)$$

とした。ここで、 $\bar{p} v$ 、 ρ_a は水蒸気密度(kg m^{-3})、乾燥空気密度(kg m^{-3})を表す。

Open-pathのガス変動計と比べて、Closed-pathの CO_2 分析計は CO_2 濃度変化に対する応答性が遅く、ある瞬間の鉛直風速と濃度変動の間には、濃度変動が風速変動に比べて時間的な遅れ(タイムラグ)を持つ。このためタイムラグを補う必要がある。タイムラグの決定は以下のように行った。観測生データ取得後、鉛直風速と濃度変動との間の位相を0.1秒ごとにずらし、相関係数の最大値が得られた場合にその測定時のタイムラグとした。数回の観測期間中、得られたタイムラグはチューブ長(観測期間中、3.5~4mで用いた)やポンプ流量によって変化し、およそ4.5~7.4sの範囲にあった。 CO_2 ガス分析計の校正は、現地で校正ガス入手することが困難

であったため、観測前と観測終了後に行った。測定時のサンプルデータはA/D変換ボードを通して、パーソナルコンピュータに記録された。鉛直風速には従来の研究(例えば、Webb *et al.*, 1980)に従い、 $\bar{w} = 0$ となるように座標変換を行い算出した。

長期観測を行う場合には測定器の様々なメンテナンスを必要とする。また、測定器を気象観測タワー上よりむしろ、より安定な場所に確保する必要があるため、CO₂取り込みチューブを長くしなければならないことが多い。その結果上述した鉛直風速と分析計との間に生じるタイムラグを補うためにポンプ流量を大きくする処置をすることもある。また、森林立地調査法(1999)では、サンプリング空氣がチューブ内を通過する過程でCO₂が減衰し、F_cを過小評価してしまう可能性があることを指摘している。本論文では長期観測には不向きであるが、チューブを短くすることによってタイムラグを小さくする観測体制を取った。

III. 植生モデルの概要

1. 植生モデル

大気-植生群落間における水蒸気交換過程をモデル化する上で、群落コンダクタンスの環境要因に対する応答過程を明らかにすることは重要である(Granier *et al.*, 1995, Gash *et al.*, 1991)。また、水収支、炭素収支を予測するモデルの精度を向上するためには、各地表面植生の成長過程を考慮する必要がある(Moncrieff *et al.*, 1997)ことが指摘されている。本研究では、群落単層モデルに群落コンダクタンスモデル(Jarvis, 1976)、光合成速度を規定する生化学モデル(Farquhar, 1984)を組み込み、群落の蒸発散特性、光合成特性を表すパラメータの抽出を行った。

群落単層モデル内で顕熱フラックス、潜熱フラックス、CO₂フラックスは以下のように表される。

$$H = c_p \rho \frac{(T - T_a)}{R_a} \quad (10)$$

$$LE = \frac{c_p \rho}{\gamma} \frac{(e_s(T) - e_a)}{R_a + R_c} \quad (11)$$

$$F_c = \frac{m_c P (C_c - C_a)}{R (T + 273) (1.6^{2/3} R_a + R_c)} + E \frac{C_c + C_a}{2} \times 10^{-3} \quad (12)$$

ここで、 c_p は定圧比熱(J kg⁻¹ K⁻¹)、 ρ は空氣密度(kg m⁻³)、 T は仮想葉温(°C)、 T_a は気温(°C)、 γ は乾湿

計定数(K⁻¹)、 $e_s(T)$ は T に対する飽和蒸気圧(hPa)、 e_a は大気圧(hPa)、 R_a は空氣力学的抵抗(s m⁻¹)、 R_c は群落抵抗(s m⁻¹)、 m_c はCO₂分子量(g mol⁻¹)、 R は氣體定数(J mol⁻¹ K⁻¹)、 C_c 、 C_a はそれぞれ仮想葉内のCO₂濃度、大気CO₂濃度(μmol mol⁻¹)である。 R_a の算出においては

$$R_a = \frac{\rho U}{\tau} \quad (13)$$

を用いた。ここで U は風速(m s⁻¹)、 τ は運動量フラックス(m s⁻¹)である。

2. 群落コンダクタンスモデル

ここで用いる群落コンダクタンスモデルの使用に際し、対象とする領域が一枚の仮想葉によって覆われていることを仮定する。群落コンダクタンスは、Jarvis(1976)による個葉レベルの研究によって評価された氣孔コンダクタンスモデルを、田中ら(2000)に従いそのまま群落へ適用する。従って群落コンダクタンス g_s は、

$$g_s = g_{s,max} f_1(PAR) f_2(VPD) f_3(T) f_4(\Psi) f_5(C_c) \quad (14)$$

で与えられる。ここで、 $g_{s,max}$ は最大群落コンダクタンス、 PAR は光合成有効放射(μmol m⁻² s⁻¹)、 VPD は大気飽差(hPa)、 Ψ は葉内水分ポテンシャル(cm)である。田中ら(2000)によると、 T と VPD の関係が線形である場合、 T と VPD の g_s へ与える影響を分離することが難しいことが報告された。本研究においてもこれらの関係が成り立つため、ここでは T の影響が VPD に含まれるものと仮定した。また土壌水分の効果については年変化は大きい各観測期間中における変動は小さいため、その影響は小さいと仮定した。よって、ここでは g_s を PAR と VPD でのみ表現することとした。

$$g_s = g_{s,max} f_1(PAR) f_2(VPD) \quad (15)$$

ここで、

$$f_1(PAR) = \frac{PAR}{PAR + \frac{1}{a g_{s,max}}} \quad (16)$$

$$f_2(VPD) = 1 - b VPD \quad (17)$$

ここで、 a は $PAR = 0$ における PAR に対する g_s の初期勾配、 b は飽差に対する g_s 依存性を示すパラメータである(表-4参照)。これらのモデルによって使用された関数 $f_1(PAR)$ 、 $f_2(VPD)$ は $0 < f_i(x) < 1$ ($i = 1, 2$)の範囲の値を取り、1に近づくほど、各々の環境変数に対する依存性が大きいことを意味する。

PAR は、複雑地表面では光量子センサー(model

LI-190SZ, LI-COR)で測定された。一方、水田地域ではPARは直接に測定されなかったため、水田地域におけるPARの算出は複雑地表面で行なわれた全天日射量 S (W m^{-2})とPARとの関係式、

$$PAR = 2.352S \quad (18)$$

を用いて水田地域で測定されている全天日射量のデータから算出した。

3. 生化学モデル

生化学モデルによって、植物生理特性を表すパラメータの変化に対する CO_2 フラックス(正味光合成速度)応答特性を記述する。このモデルも群落コンダクタンス同様、個葉レベルで完成された概念を群落レベルへ拡張して用いることとなる。

図-2には生化学モデルの概念図を示す。田中(1999)によれば、生化学モデルにおいて、 CO_2 フラックス F_c は以下のように記述される。

$$F_c = -m_c [V_c (1 - 0.5\phi) - R_d] \quad (19)$$

また、

$$\phi = \frac{V_0}{V_c} = \frac{V_{0\max}}{V_{c\max}} \frac{K_0}{p(C_c)} = \frac{V_{0\max}}{V_{c\max}} \frac{P(O)K_c}{P(C_c)K_0} \quad (20)$$

$$p(\Gamma_*) = \frac{K_c P(O) V_{0\max}}{2 K_0 V_{c\max}} \quad (21)$$

ここで、 V_c はPCR回路(Photosynthetic Carbon Reduction cycle)におけるリブローズ二リン酸(RuP_2)同化速度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 V_0 は酸素同化反応速度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 $V_{c\max}$ 、 $V_{0\max}$ はそれぞれの最大値となる。 ϕ は CO_2 同化反応に対する酸素同化反応の割合を示す。

図-2 Bio-Chemicalモデルの概念図(Kosugi (1996)より引用)

Fig. 2 A scheme of the Bio-Chemical model showing the reactions of photosynthesis

R_d は暗呼吸速度($\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)である。また、 $p(O)$ 、 $p(C_c)$ 、 $p(\Gamma_*)$ はそれぞれ酸素、 CO_2 の分圧(hPa)、およびミトコンドリアの暗呼吸を考慮しない場合の CO_2 補償点(hPa)である。さらに、 K_0 、 K_c は CO_2 、 O_2 に関するMicaelis-Menten定数(Pa)である。

式(20)、(21)を用いると ϕ は

$$\phi = \frac{2p(\Gamma_*)}{p(C_c)} \quad (22)$$

となるため、これを用いて式(19)は

$$F_c = -m_c \left[V_c \left(1 - \frac{p(\Gamma_*)}{p(C_c)} \right) - R_d \right] \quad (23)$$

と変形できる。

V_c は RuP_2 の再生成に要する時間を示しており、下記のように記述される。

$$V_c = \min[W_j, W_e, W_p] \quad (24)$$

ここで、 W_j はカルボキシル化の電子伝達限界速度、 W_e は同化の飽和速度、そして W_p はリン酸塩利用に関わる限界速度であり、 V_c はこれらの要因のうちの最小値をあらわす。それぞれは下記のように記述される。

$$W_j = \frac{\epsilon(1-f)PAR}{2 \left[4 + 8 \frac{p(\Gamma_*)}{p(C_c)} \right]} = \frac{\epsilon(1-f)PAR}{2 \left[4 + 8 \frac{p(\Gamma_*)}{p(C_c)} \right]} \quad (25)$$

$$W_e = V_{c\max} \frac{p(C_c)}{p(C_c) + K_c \left[1 + \frac{21000}{K_0} \right]} \quad (26)$$

$$W_p = \frac{V_{c\max}}{2} \quad (27)$$

ϵ は葉緑体の光量子吸収率を表す。また、 f は葉緑体による光量子を吸収する割合を示しており、 f は葉の厚さに影響される。ここで、各式中に使用されるパラメータは葉面温度に依存しており、下記のように記述される。

$$K_c = K_{c25} \exp \left[\frac{(T-25) \times 59356}{(25+273)R(T+273)} \right] \quad (28)$$

$$K_0 = K_{025} \exp \left[\frac{(T-25) \times 35948}{(25+273)R(T+273)} \right] \quad (29)$$

$$R_d = R_{d25} \frac{\exp \left(\frac{(T-25) \times 66405}{(25+273)R(T+273)} \right)}{1 + \exp[1.3(T-55)]} \quad (30)$$

$$V_{c \max} = V_{c \max 25} \frac{\exp\left(\frac{(T-25) \times 58520}{(25+273)R(T+273)}\right)}{1 + \exp\left[\frac{703(T+273) - 220000}{R(T+273)}\right]} \quad (31)$$

ここで、 K_{c25} 、 K_{o25} 、 R_{d25} 、 $V_{c \max 25}$ は25℃における K_c 、 K_o 、 R_d 、 $V_{c \max}$ である。本研究においてこれらは、Kosugi(1996)、田中(1999)と同様な値

$$K_{c25} = 46 (Pa),$$

$$K_{o25} = 33000 (Pa),$$

$$V_{c \max 25} = \rho_d k_c E_c$$

(Farquhar and Wong, 1984)

を用いた。ここで、 ρ_d は葉内のクロロフィル密度、 k_c は単位時間あたりのPCR cycle回転数で $k_c = 2.5s^{-1}$ とした(Kosugi, 1996)。 E_c は全酵素濃度を表し、

$$E_c = \frac{8c_g \times 10^6}{550000} (\mu \text{ mol gChl}^{-1}) \quad (32)$$

である。ここでもKosugi(1996)に従い、 $E_c = 87.3 \mu \text{ mol gChl}^{-1}$ とした。

これらのモデルを用いて蒸発散・光合成特性を表す6つのパラメータを抽出した(表-3参照)。まず群落コンダクタンスモデルで、式(10)および式(13)を用いて、観測された運動量フラックス、顕熱フラックスデータから R_d と T を算出し、式(11)に代入し LE を計算した。計算された LE と観測データの LE が一致するように、群落コンダクタンスモデル中の蒸発散特性パラメータをMarquardt(1963)に従って最適化した。次に、生化学モデルにおいて、 E と F_c の観測値から式(12)によって、 C_c を計算し、この C_c と T を用いて F_c を算出し、観測された F_c の値と一致するように、生化学モデル中の光合成特性パラメータを同様に最適化した。

表-3 群落コンダクタンスモデルおよび生化学モデル中のパラメータ

Table 3 Extracted parameters in the canopy conductance model and biochemical model

(a) 群落コンダクタンスモデル・(b) 生化学モデル中の各パラメータ		
(a)	$g_{\max}$	最大気孔コンダクタンス
	$a = \lim_{PAR \rightarrow 0} \frac{\partial g_s}{\partial PAR}$ $b = \frac{d g_s}{d VPD}$	PAR=0におけるPARに対する g_s の初期勾配 VPDに対する g_s の変化
(b)	$\epsilon (1-f)$ ρ $R_{\max}$	光量子捕足率 クロロフィル密度 25℃における暗呼吸速度

IV. 結果と考察

1. 複雑地表面における熱収支・CO₂フラックスの日・季節変化

1) 気象要素と熱収支

図-3(a)~(d)には、複雑地表面における表-1で示された各観測期間中の典型的な(a)日射・正味放射量、(b)気温・大気飽差(c)風速、(d)顕熱・潜熱フラックスおよび地中熱流量の日変化を示した(降雨時のデータは除く)。選択された日時は、1998年3月(DOY63, 3月4日)と5月(DOY143, 5月23日)、9月(DOY251, 9月8日)そして1999年2月(DOY56, 2月25日)である。

複雑地表面上における日射量と正味放射量の日変化から1998年、1999年の2月は快晴で、雲の影響は見られていない。一方、1998年5月、9月のデータを見ると、日中の天候は不安定であることがわかる。これは同地域のモンスーンの発達過程に対応した天候の変化である。モンスーンのon/off setは一般に降水量と風向の観測データより判別される。図-4には、複雑地表面観測地から約10km離れたタイ国気象局(Thailand Meteorological Department, TMD)管轄の1998年における一般気象データの日降水量を示した。同図より、1998年は3月に一時的に降水が見られるが、まとまった降雨が見られ始めるのは、5月初旬(DOY125, 5月5日)からとなる。気温および大気飽差の季節変化は乾季から雨季にかけて減少し、明瞭な季節変化を示した。高度29.9mで測定された風速は、全期間を通して、おおよそ1~5 ms⁻¹の範囲にあり、午前から午後にかけて増加する傾向が見られた。

1998年3月には、正味放射量に対して顕熱フラックスの配分される割合が大きく(約5割)、次に地中熱流量であった。一方、潜熱フラックスはその他の項に比べて小さいが、日中に地面からの蒸発および植物による蒸散過程がわずかに見られた。一方、5月では、顕熱フラックスの量が依然として大きな割合を占めているが、潜熱フラックスが徐々に増加し、地中熱流量と同程度かそれ以上の値に増加した。後で記述するが、1998年3月と5月のCO₂フラックスの日変化を見ると(図-3(e)参照)、午前から午後にかけて負の増加を示しており、光合成活動が見られることが確認されるが、その値には大きな違いが見られない。このことから、5月における潜熱フラックスの増加は、降水量の増加(雨季)に伴い地表面の

湿潤度が増し地表面蒸発が大きくなったためと考えられる。1998年9月では、ボーエン比が大きく減少(0.2~0.4)し、潜熱フラックスに配分される割合が増加した。1999年2月になると、1998年3月と同様、顕熱フラックスへ配分される割合が再び増加するが、1998年と比べると、顕熱フラックスへの配分比が大きいことがわかる。

2) CO₂フラックス

図-3(e)には1)で示した観測期間と同様の期間でCO₂フラックスの日変化を示した。ここでCO₂フラックスは大気から地表面にCO₂が輸送される場合を負とし、その逆を正とした。つまり、植生の光合成活動が植生自身と土壌からの呼吸を上回る場合CO₂フラックスは負となることを表している。

1998年3月における日中のCO₂フラックスは下向きに約-0.3~-0.5mgCO₂m⁻²s⁻¹の範囲で観測された。一方、夜間には、最大0.1mgCO₂m⁻²s⁻¹程度の上向きフラックスを生じ、これは地表面植生と土壌の

呼吸の総量を表している。5月におけるCO₂フラックスの日変化は3月と比べると、日中、夜間ともに大きな違いは見られなかった。このことから地表面の植生状態は3月から大きく変化していないことが示唆される。8~9月は葉面積指数(Leaf Area Index, LAI, 表-1参照)が今回の全観測期間中最も大きく、同期間におけるCO₂フラックスは-1~-1.1mgCO₂m⁻²s⁻¹に達し、3月、5月と比べて群落への吸収が大きく得られた。また、夜間におけるCO₂の放出もまた0.2~0.5mgCO₂m⁻²s⁻¹まで増加した。同期間は晴天で日射量は大きいものの、日中にかけて断続的に微量な降雨が常に生じていたため、植生からの蒸発散、土壌面蒸発が生じやすい環境下であった。

1999年2月ではCO₂フラックスもまた、1998年と同様に乾季においても日中にはCO₂の吸収が、また夜間には呼吸がなされ、その結果、植生によるガス交換が同程度に行われていることがわかった。

2. 水田地域における熱収支・CO₂フラックスの日・季節変化

1) 気象要素と熱収支

図-5(a)~(d)には、水田地域における表-1で示

図-3 複雑地表面における気象要素、地表面フラックスおよびCO₂フラックスの季節変化(1998年3月4日(DOY63), 5月23日(DOY143), 9月8日(DOY251), 1999年2月25日(DOY56)) (横軸はUniversal Timeである。現地時間は7時間加える)(a)日射量(—), 正味放射量(◆), (b)気温(●), 大気飽差(△), (c)風速, (d)地表面フラックス(顕熱フラックス(○), 潜熱フラックス(●), 地中熱流量(—)), (e)CO₂フラックスを示す。

Fig. 3 The seasonal variation of meteorological variables, surface fluxes and CO₂ flux over complex area during 1998 to 1999. (a)solar radiation(—)and net radiation(◆), (b)air temperature(●)and vapor pressure deficit(△), (c)wind speed, (d)surface fluxes(sensible heat flux(○), latent heat flux(●)and ground heat flux(—)), (e)CO₂ flux.

図一4 タイ気象局(Thailand Meteorological Department, TMD)による、Tak州における降水量の季節変化(1998)

Fig. 4 The seasonal variation of precipitation in Tak province in 1998. The use was made of data which was obtained by Thailand Meteorological Department

された各観測期間中の典型的な(a)日射量・正味放射量, (b)気温・大気飽差(c)風速, (d)顕熱・潜熱フラックスおよび地中熱流量(雨季には水体貯熱流量)の日変化を示した(降雨時のデータは除く)。選択された日時は, 1998年3月(DOY68, 3月7日), 9月(DOY266, 9月23日), 1999年3月(DOY68, 3月7日)である。乾季にあたる1998年および1999年3月では, 複雑地表面と同様に好天であり, 一方9月は日中にかけて不安定な天候であることがわかる。また, 気温・大気飽差の日・季節変化も複雑地表面と同様に乾季に高く, 雨季に従って減少する振る舞いが見られた。

水管理がなされた水田では, 一年を通して水稻栽培が可能であるが, 本観測地のような天水田では乾季になると干上がり, 栽培は行なわれない。3月における水田の正味放射量の7~8割は, 顕熱と地中熱流量へ配分される。図一5(d)に見られる乾季の潜熱フラックスは最大 50 Wm^{-2} 程度見られているが, これは水田周辺の樹木による影響であると考えられる。9月になると, 正味放射量の多くは潜熱フラッ

クスに配分され, その割合はおおよそ5割に達した。雨季の水田地域の熱収支は水体貯熱流量に配分される量が無視できない(Aoki *et al.*, 1998)。本観測においてもその割合は潜熱フラックスと同程度に大きく, (最大 324.3 Wm^{-2}), 午前中に大きくなることがわかる。また, 顕熱フラックスに配分される割合は非常に小さく, 大気を加熱する割合が小さかったことがわかる。

2) CO_2 フラックス

図一5(e)には, CO_2 フラックスの日変化を表す。同期間における CO_2 フラックスはわずかながら日中に大気から群落へ輸送され, 負の値をとっており, 図一5(d)と同様, 同時期の CO_2 フラックスは, 水田周辺の樹木による光合成活動の影響が樹木自身の呼吸量と水田地域周辺の土壌呼吸量の総和を上回っていると結果であると考えられる。9月になると, 同期間における CO_2 フラックスの日変化(図一5(e))より, 日中の CO_2 フラックスは $-1.2 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ で複雑地表面とはほぼ同程度の値であった。一方, 夜間における CO_2 放出量は, $0.2 \sim 0.4 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であっ

た。また、観測された全期間を通して、両地表面での最大光合成速度は、これまでその他の気候帯で行なわれた植生活動期の野外観測の研究結果と比較すると、同程度の値であり顕著な違いは見られなかった。

3. 生化学モデルによる蒸発散・光合成特性を示すパラメータの算出

Ⅲ. によって記された群落単層モデルを用い、植生活動の盛んな雨季のみを対象として、各土地被覆でのモデル中のパラメータ抽出を試みた。

図一6(a), (b)には各土地被覆における環境要因(PAR, VPD)に対するモデルで算出された g_s の応答特性を示した。同図より、水田地域の g_s は複雑地表面に比べて大きく、成長期間において活発なガス交換を行ったと考えられる。また水田地域は、 $PAR < 200 (\mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})$ の光条件におけるコンダクタン

スの増加率が高く、表一4より水田地域でのPARに対する g_s の初期増加率(表一4のaに対応する)の値は複雑地表面のその2.5倍となった。また、 $PAR > 400 (\mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})$ では、PARの増加とともにそれぞれ一定値に収束傾向にあった(水田地域 $g_s \approx 0.027 \text{ ms}^{-1}$, 複雑地表面 $g_s \approx 0.013 \text{ ms}^{-1}$)。さらに、表一4には最大群落コンダクタンス $g_{s \max}$ を示した。また同時に他の文献との比較を容易にするため $g_{s \max}$ の逆数に相当する最小群落抵抗 $R_{c \min}$ も示した。 $R_{c \min}$ の水田地域、複雑地表面のそれぞれの値は 17.1127 sm^{-1} , 35.1638 sm^{-1} となった。これらの数値はこれまで報告された値と比べると小さい傾向にある(例えば、Jones1983, 近藤ら, 1994)。しかし、同様の気候帯で行われた、Dolman(1993)による結果は $R_{c \min} = 25 \sim 80 \text{ sm}^{-1}$ の範囲であり、本観測データに基づいたモデル結果はそれと同程度であり矛盾はない。

また、図一5(b)はVPDに対する g_s 依存性を示している。ここで、表一4中のbは飽差に対する敏感度を表す指標であり、この値が大きいほど飽差に対する g_s の応答性が高いことを示している。この結果より、両地表面における g_s のVPDに対する応答性は見られたが、水田地域の g_s は複雑地表面に比べてVPD

図一5 水田地域における気象要素、地表面フラックスおよび CO_2 フラックスの季節変化(1998年3月9日(DOY68), 9月23日(DOY266), 1999年3月9日(DOY68)) (横軸はUniversal Timeである。現地時間は7時間加える)(a)日射量(—), 正味放射量(◆), (b)気温(●), 大気飽差(△), (c)風速, (d)地表面フラックス(顕熱フラックス(○), 潜熱フラックス(●), 地中熱流量(—)), (e) CO_2 フラックスを示す。

Fig. 5 The seasonal variation of meteorological variables, surface fluxes and CO_2 flux over paddy region during 1998 to 1999. (a)solar radiation(—)and net radiation(◆), (b)air temperature(●)and vapor pressure deficit(△), (c)wind speed, (d)surface fluxes(sensible heat flux(○), latent heat flux(●)and ground heat flux(—)), (e) CO_2 flux.

に対してより敏感に反応した。また、図-7(a), (b)には各土地被覆における環境要因(PAR, VPD)に対するモデルで算出された F_c の応答特性を示した。図-7(a)よりPARの増加とともに F_c の増加が見られた。また、 $PAR > 600 (\mu \text{ mol}^{-2} \text{ s}^{-1})$ では水田地域における F_c は複雑地表面に比べて大きかった。この期間の F_c の増加はLAIなどの植生指標による影響も十分考えられる(例えば, Toda *et al.*, 2000a)。今回の観測期間中における水田での葉面積指数(LAI)は直接に測定されていないが、表-4に示された ρ_d の値はLAIを裏付ける指標値であるが、実際に群落での ρ_d の値は水田地域に比べて複雑地表面の値が上回っていた。一方、群落の光量子透過・反射特性を示す $\epsilon(1-f)$ の値を参照すると、水田地域における値は複雑地表面よりも大きい。田中ら(2000)では ρ_d を一定とした場合、 $\epsilon(1-f)$ を変数として、PARと F_c との関係を示した。その結果、 $\epsilon(1-f)$ が増加するにつれて、同一のPAR条件での F_c 増加していることが示されている。今回の観測結果に基いたモデルパラメータの抽出結果より、植物成長期における F_c は ρ_d の変化よりもむしろによって影響されていると考えられる。一方、図-6(b)に関して複雑地表面、水田地域双方ともに F_c のVPD依存性は明瞭に見られなかった。

V. 結 論

熱帯モンスーン地域の代表的な二つの土地被覆である複雑地表面と水田地域を対象とし、熱帯の特徴的な季節において集中観測を実施し、CO₂フラックスの季節変化をとらえることができた。観測結果よ

表-4 群落コンダクタンスモデルおよび生化学モデルによって各季節ごとに決定されたモデル中のパラメータ(1998年雨季を対象とする)

Table 4 A summary of the model parameters determined over each of complex area and paddy region for rainy season in 1998

パラメータ	複雑地表面	水田地域
$\epsilon_{\text{max}} (R_{\text{amin}})$	0.0284 (35.1638)	0.0584 (17.1127)
a	0.00008549	0.00022776
b	0.02336094	0.03483470
ϵ	0.2556	0.4204
ρ_d	0.4518	0.3630
R_{d25}	0.0001	0.0001

り以下のことが明らかとなった。
① 両土地被覆における雨季での光合成速度、また夜間におけるCO₂放出量はともに高い値をとり、同程度の大きさとなった。これらの結果は異なる気候帯の様々な陸上植物を対象として行われてき

図-6 環境要因と群落コンダクタンス(g_s)の関係(1998年8~9月(雨季)を対象とする)(a)光合成有効放射(PAR), (b)大気飽差(VPD)との関係を示す。(○)複雑地表面, (●)水田地域における関係を表す。

Fig. 6 The influence on environmental variables on the canopy conductance (g_s) during rainy season in 1998. The opened and closed circles denote complex area and paddy region, respectively. (a) g_s versus photosynthesis active radiation (PAR), (b) g_s versus vapor pressure deficit (VPD).

た、従来の研究で報告された値と同程度の大きさであり、大きな違いは見られなかった。

- ② 乾季における複雑地表面上における F_c は、乾季においても植物による CO_2 および H_2O 交換が確認された。また、乾季の水田地域においても水田付

図一7 環境要因と CO_2 フラックス(F_c)の関係(1998年8～9月(雨季)を対象とする)(a)光合成有効放射(PAR), (b)大気飽差(VPD)との関係を示す。(○)複雑地表面, (●)水田地域における関係を表す。

Fig. 7 The influence on environmental variables on CO_2 flux (F_c) during rainy season in 1998. The opened and closed circles denote complex area and paddy region, respectively. (a) F_c versus photosynthesis active radiation (PAR), (b), F_c versus vapor pressure deficit (VPD).

近に存在する樹木の光合成活動によって CO_2 収支が日中に観測された。これらの結果より、両地表面においては年間を通じた CO_2 吸収源である可能性が示唆された。

また、各土地被覆の植物活動期における蒸発散特性、光合成特性を示すパラメータの抽出を、群落コンダクタンスモデルおよび生化学モデルを取り入れた群落単層モデルを用いて算出し、比較を行った。その結果、以下のことがわかった。

- ③ 雨季での水田地域における群落コンダクタンスの環境応答特性は複雑地表面に比べて大きかった。また、 CO_2 フラックスについて、日中の光条件では水田地域における値が複雑地表面のそれを上回っているが、これは各植生群落の光透過・反射特性の違いに起因するものと考えられた。

本モデルは C_3 植物を対象としたモデルであるが、水稻のような C_4 植物を対象とした CO_2 および H_2O 交換過程を議論する場合には、 C_4 植物の炭酸同化過程を考慮する必要がある。今後は雨季以外の季節におけるモデル中のパラメータの算出を行い、一般気象データより長期間の CO_2 および H_2O 交換過程の推定について検討する。モデルによる再現結果をより向上させるためには、各季節ごとにより長期間のデータを蓄積する必要があるだろう。

謝辞：本論文作成にあたり、タイ王立灌漑局(RID), Panya Polsan氏およびRIDのスタッフには多大な協力をいただきました。また、筑波大学農林工学系西田顕郎博士の御尽力によりタイ観測地の土地利用図を作成することができました。東京農工大学農学部大学院生、永吉信二郎さん、小森大輔さんには水田地域のデータ解析にあたりお世話になりました。本研究は文部省科学研究費特定領域研究B-2：熱帯エネルギー・水循環過程の援助を受けました(11201202)。また、平成11年度文部省科学研究費補助金(特別研究員奨励費)の援助を受けました。最後に、本論文作成の際に、編集委員および査読者の先生方には適切なコメントをいただきました。謹んで厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 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, T. Yasunari (1998) : Evaluation of surface fluxes over a paddy field in tropical environment: Some findings from a preliminary observation of GAME, *J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.*, 39-60.
- 青木正敏・千村隆宏・永吉信二郎・広田知良・虫明功臣・沖大幹・中江川敏之・Samakkee・Boonyawat・Somnimit Pukngam・Panya Polsan(1998) : タイ国における水田の微気象及び熱・水蒸気フラックス長期観測(1), -GAME-Tropicsプロジェクト水田基地観測システム, 1998年日本農業気象学会全国大会講演要旨集, 408-409.
- Anthoni, P.M., B.E. Law, M.H. Unsworth (1999) : Carbon and water vapor exchange of an open-canopied ponderosa pine ecosystem, *Agric. For. Meteorol.*, 95, 151-168.
- Baldocchi, D.D. (1994) : A comparative study of mass and energy exchange rates over a closed C₃ (wheat) and an open C₄ (corn) crop: II. CO₂ exchange and water use efficiency, *Agric. For. Meteorol.*, 67, 291-321.
- Baldocchi, D.D., C.A. Vogel and B. Hall (1997) : Seasonal variation of carbon dioxide exchange rates above and below a boreal jack pine forest, *Agric. For. Meteorol.*, 83, 147-170.
- Dolman, A.D. (1993) : A multiple-source land surface energy balance model for use in general circulation models, *Agric. For. Meteorol.*, 65, 21-45.
- Farquhar, G.D. and Wong, S.C. (1984) : An empirical model of stomatal conductance. *Aust. J. Plant Physiol.*, 11, 191-210.
- 堀江 武(1981) : 気象と作物の光合成, 蒸散そして生長に関するシステム生態学的研究, 農業技術研究所報告A第28号, 1-181.
- Granier, A., P. Biron, N. Breda, J. -Y., Pontailler and B. Saugier (1996) : Transpiration of trees and forest stands: Short and long-term monitoring using sapflow methods, *Global Change Biology*, 2, 265-274.
- Gash, H.C. J.S. Wallace, C.R. Lloyd, A.J. Dolman, M. V.K. Sivakumar and C. Renard (1991) : Measurements of evaporation from fallow Sahelian savannah at the start of the dry season, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 117, 749-760.
- Jarvis, P.G. (1976) : The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopy in a field, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 273, 593-610.
- Jones, H.G. (1983) : Plants and microclimate., *Cambridge Univ. Press*, 323pp.
- 環境庁地球環境研究総合推進費終了報告書, (1998) : 平成8~10年度, 熱帯林の環境保全機能の評価に関する研究, 76pp.
- 近藤純正(1994) : 水環境の気象学, 朝倉書店, 350pp.
- Kosugi, Y. (1996) : Leaf-scale analysis of the CO₂ and H₂O exchange processes between trees and the atmosphere, Ph. D of Kyoto University, 128pp.
- Leuning, R., and J. Moncrieff (1990) : Eddy-covariance CO₂ flux measurement using open- and Closed-path CO₂ analysers: Corrections for analyser water vapour sensitivity and damping of fluctuations in air sampling tubes, *Boundary-Layer Meteorol.*, 53, 63-76.
- Maitani, T., K. Sahashi, E. Ohtaki, O. Tsukamoto, Y. Mitsuta and J. Wang (1995) : Measurements of turbulent fluxes and model simulation of micrometeorology in a wheat field at Zhangye oasis, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 73, 5, 959-965.
- Marquardt, D.W. (1963) : An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters, *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, 11, 431-441.
- Moncrieff, J. B., B. Monteny, A. Verhoef, Th. Friborg, J. Elbers, P. Kabat, H. de Bruin, H. Soegaard, P.G. Jarvis, J.D. Taupin (1997) : Spatial and temporal variations in net carbon flux during HAPEX-Sahel, *J. Hydrology*, 188-189, 563-588.
- 三枝信子・及川武久(1995) : 炭素動態モデルを用いたC₃・C₄植物群落の環境応答の解析, 平成7年度文部省国際共同研究経費「大学などにおける地球圏-生物圏国際共同研究計画」成果報告書, 123-149.
- Saigusa, N., S. Liu, T. Oikawa, T. Watanabe (1996) : Seasonal change in CO₂ and H₂O exchange between grassland and atmosphere, *Ann. Geophysicae*, 14, 342-350.

- 森林立地調査法編集委員会編(1999): 森林立地調査法—森の環境を測る, 博友社, 284pp.
- Tanaka, H., K. Tanaka and N. Ohte (1997): Continuous estimation of CO₂ flux above a temperate conifer forest, *Proceedings of International workshop in Hiroshima (CO₂ workshop Hiroshima), Comparative studies on CO₂ fluxes observed by towers at several forests in the world*, 13-20.
- 田中広樹(1999): 森林におけるCO₂およびH₂O移動現象に関する研究, 1999年京都大学学位論文, 81 p.
- 田中広樹・太田岳史・檜山哲哉・M. TrofimC (2000): 北方落葉樹林における光合成・蒸散特性の季節変化: 樹冠単層モデルを用いた解析. (受理)
- Toda, M and N. Ohte (1999): The seasonal priorities of CO₂ and H₂O fluxes with environmental variables over typical land uses in tropical monsoon zones, *Proceedings of third International scientific conference on the global energy and water cycle*, 236-237.
- Toda, M, N. Saigusa, T. Oikawa, F. Kimura (2000 a): Seasonal changes of the CO₂ and H₂O exchanges over a temperate grassland. *J. Agr. Meteorol. Japan*. (in press)
- Toda, M and N. Ohte, K. Musiake (2000b): The Annual estimations of evapotranspiration and canopy surface conductance of terrestrial complex land covers in the tropical monsoon region, *J. Meteor. Soc. Jpn.* (Submitted)
- Valentini, R., P. De Angelis, G. Matteucci, R. Monaco, S. Dore and G. E. Scarascia Mugnozza (1996): Seasonal net carbon dioxide exchange of a beech forest with the atmosphere, *Global Change Biology*, 2, 199-207.
- 安田幸生・渡辺 力・大谷義一・岡野通明・中山敬一(1998): 落葉広葉樹林上におけるCO₂フラックスの季節変化, 水文・水資源学会誌, 11, 6, 575-585.
- Webb, E.K, G.I. Pearman and R. Leuning (1980): Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 85-100.
- Watanabe, T. (1993): The bulk transfer coefficients over a vegetated surface based on K theory and a 2nd-order closure model, *J. Meteor. Soc. Jpn.*, 71, 33-42.

(受付: 2000年4月3日, 受理2000年6月26日)