

B-3 アジアフラックスネットワークの確立による東アジア生態系の炭素固定量把握に関する研究

(1) 各種生態系における大気とのCO₂, CH₄, エネルギー交換量の解明に関する研究

独立行政法人産業技術総合研究所

環境管理研究部門 副部門長 山本 晋
環境管理研究部門 大気環境評価研究グループ 近藤裕昭・蒲生 稔・村山昌平・三枝信子
環境管理研究部門 地球環境評価研究グループ 兼保直樹
環境管理研究部門 域間環境評価研究グループ 前田高尚

独立行政法人農業環境技術研究所

地球環境部フラックス変動評価チーム 宮田明・原蘭芳信・永井秀幸・山田智康・吉越恆・
Gwang Hyun Han・Md. A. Baten・小野圭介

独立行政法人森林総合研究所

気象環境研究領域 気象研究室 大谷義一・溝口康子・渡辺 力・安田幸生
学振科学技術特別研究員 戸田 求（現 北海道大学）
森林環境部 樹木生理研究室 石田 厚
森林総合研究所関西支所 森林環境研究グループ 玉井幸治

独立行政法人農業技術研究機構九州沖縄農業研究センター

環境資源研究部気象特性研究室 大場和彦・黒瀬義孝・丸山篤志・中本恭子
山梨県環境科学研究所 植物生態学研究室 中野隆志・大塚俊之（現 茨城大学）・安部良子・
渡辺美紀

筑波大学生物科学系

鞠子 茂

筑波大学大学院地球科学系

田瀬則雄・濱田洋平

千葉大学環境リモートセンシングセンター

西尾文彦

岡山大学環境理工学部

大滝英治・岩田 徹・三浦健志

京都大学農学研究科

谷 誠・小杉緑子

大阪府立大学農学部

文字信貴

九州大学大学院農学研究院

真木太一・杉浦裕義・平田竜一・鈴木義則・柳 博

<研究協力者> 国際林業研究センター 藤間 剛

平成12～14年度合計予算額 1 2 2, 2 6 4 千円
(うち、平成14年度予算額 4 0, 5 2 2 千円)

〔要旨〕

本研究による観測はアジアフラックスネットワークの確立による東アジア生態系の炭素固定量把握を目的として展開されている観測網の一環を成すものである。ここでは東アジアモンスーン気候帯の各種生態系において7種類のフラックス観測サイトを選定して、大気と植生間のCO₂等交換量や気象の連続観測を実施した。各種生態系毎の炭素収支の特徴を把握し、気象条件の差異が各生態系と大気間の交換量に及ぼす影響、さらに、観測データの蓄積を図り、炭素循環過程の

定量的解明を目指した。以下に各サイトにおける代表的な成果を述べる。

(高山落葉広葉樹林サイト) 岐阜県高山市郊外の冷温帯落葉広葉樹林において、渦相関法による二酸化炭素・水蒸気・顕熱フラックス、気象条件などを長期連続測定している。8年間の年間NEPは平均 $224 \pm 82 \text{ gC m}^{-2}$ であること、年によって 100 gC m^{-2} 以上の大きな違いがあることなどが分かった。二酸化炭素フラックスの年による違いの第1の要因は光合成有効放射が梅雨期、夏季の降水状態により年々変動すること、第2に展葉を開始する時期の違いである。葉面積指数(LAI)の観測結果に基づいて春季にLAIが増加を開始した日(LAIが1を超えた日)を比べると、展葉開始日は年によって20日程度変動していること等が分かった。

また、高山サイトでは、夜間および冬季の二酸化炭素フラックスは主に気温の関数、夏季の日中の二酸化炭素フラックスは光合成有効放射と気温の関数で表現できた。一方、二酸化炭素フラックスに対する土壌水分量と飽差の影響は明瞭ではない。このことは、高山サイトは年間降水量が多く(2000 mm以上)湿潤な条件下にあることに関係すると考えられる。

高山サイトの年間のNEPを求める際、現在のところ最大の不確定要因は、夜間安定時の補正をどの程度行うかという事である。また、夜間の補正が年間NEE(Net Ecosystem CO_2 Exchange)に大きな影響を及ぼすという結果は、複雑地形地でのフラックス観測の一つの特徴であり、年間NEEの値は慎重な取り扱いを必要とする点ではないかと考えられる。

(富士吉田アカマツ樹林サイト) 山梨県富士吉田市富士山北麓のアカマツ林サイトにおいて、群落上の CO_2 フラックス、群落のエネルギー収支の評価を目的とした、森林微気象の通年観測を継続実施した。あわせて、森林群落炭素収支を見積もるための、土壌呼吸量の自動連続測定、生態系の成長量調査を行った。タワーフラックス観測で得られた年間のNEEの変動は大きく、変動幅は3年間で28%に達した。気温が高く生態系呼吸量の多い時期にどの程度の日射量が得られるか、冬季の休眠期間の有無と長短が、年間の CO_2 吸収量に大きく影響することが分かった。土壌呼吸量の連続測定から地温と土壌呼吸速度の関係が整理された。土壌呼吸量は夏季に大きく、その月積算値の最大値は $130 \text{ gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$ に達した。近似された指数関数の係数や土壌呼吸量の年積算値が、年によって大きく異なることが測定結果から示された。観測対象である森林群落の種組成が詳細に記述され、生態学的な成長量調査の結果から、積み上げ法による年間の純一次生産量が解析された。純一次生産量の年々変動は大きく、年々の樹木成長量、葉以外のリター量の相違が大きく影響することが分かった。リターフォール量、とりわけリタートラップでは捕捉できない大型のリターによる供給量測定の重要性が示された。

(桐生試験地ヒノキ樹林サイト) 滋賀県南部の桐生水文試験地の観測サイト周辺はヒノキの閉鎖した樹冠をもつ森林で覆われている。京都大学チームが中心となって渦相関法による樹冠上フラックス測定を、大阪府立大学チームが中心となってREA(簡易渦集積)法による CO_2 フラックス観測を行っている。 CO_2 フラックスは、冬から初夏にかけては温度の増大とともに吸収量が増大するが、夏期には正味吸収量は低下した。湿潤な夏期における昼間の吸収速度のピークは初夏と変わらない値を示したが、夜間の呼吸速度が大きくなるために収支としての夏季の日積算炭素吸収量は減少した。また、潜熱フラックスの季節変動特性は概ね飽差の季節変動特性に従うが、乾燥

時に飽差の増大から予測される程度に潜熱が増加しない期間もみられ、個葉の気孔開閉による調節が行われた結果、変動を生み出していると考えられた。

さらに本試験地では、従来から多く行われているように森林樹冠上フラックスを APAR や気温との単相関をみることによって解析するだけではなく、群落構造や個葉のガス交換特性、乱流拡散現象などを考慮した多層モデルを用いた解析を試みた。渦相関法による観測値と土壌呼吸・温度の関係および葉呼吸・温度の関係、および個葉ガス交換モデルを含む多層モデルによる見積りの総合的解析から、乱流フラックス観測値による夜間の CO_2 放出が多層モデル等の値よりかなり小さく、渦相関法による NEE が過大評価である可能性を示唆する結果となっている。

(釧路湿原サイト) 北半球中緯度帯に位置する湿原と大気との間の CO_2 、メタン、エネルギー交換量の特徴を明らかにするため、北海道東部の釧路湿原を対象に観測を実施した。釧路湿原を代表するヨシの優占する湛水した低層湿原と、地表面にミズゴケ層が発達し、スゲが優占する高層湿原に観測点を設置し、渦相関法を用いて CO_2 、顕熱、潜熱の各フラックスを測定した。高層湿原観測点では、傾度法を適用してメタンフラックスも測定した。両観測点の植物成長時期の違いが NEE の季節変化にも顕著に現れ、低層湿原では消雪から 6 月にかけて生態系からの CO_2 放出が観測されたが、高層湿原では 5 月に NEE が放出から吸収に移行し、 CO_2 を吸収する期間も 5 ヶ月間に及んだ。10 月初めには、両観測点とも NEE が生態系からの放出または均衡へと移行した。2002 年の高層湿原の年間積算 NEE は約 -200 g C m^{-2} で、水田（つくば）観測点とほぼ等しいと推定された。また、2002 年の高層湿原からのメタンの年間総放出量は約 13 g C m^{-2} で、炭素換算では年間 NEE の 6.3% に相当した。地球温暖化指数 (GWP, 積算期間 100 年) を考慮して評価すると、高層湿原は温室効果ガスの吸収源として作用してはいるが、メタン放出による温室効果ガス収支への寄与は CO_2 吸収の約 1/2 に相当する。

(水田つくばサイト) 東アジアの代表的な農業生態系である水田の炭素収支を明らかにするため、茨城県つくば市の慣行栽培が行われている水田を対象に、3 年間にわたり、 CO_2 収支、メタン放出量、エネルギー収支の観測を実施し、溶存態炭素の収支や収穫物の搬出に伴う炭素フローを含めて、水田の炭素収支を評価した。NEE は水稻の成長に伴う顕著な季節変化を示し、移植から 2~3 ヶ月後の 6 月下旬から 8 月初めにかけて吸収フラックスが最大となった (約 $10 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)。年間積算 NEE は 2001 年が 201 g C m^{-2} 、2002 年が 91 g C m^{-2} の吸収と年次間差が大きかった、年次間差の主な要因は 2002 年の収穫時期の遅延による生態系呼吸量の増加と、2001 年の収穫後のひこばえの成長と考えられた。水稻単作水田が大気中の CO_2 を吸収するのは約 3 ヶ月間で、残りの 9 ヶ月間は収支が均衡、または CO_2 の放出であった。非耕作期間の生態系呼吸量は耕作期間の 59% から 80% に達した。水田の耕作期間を通じた溶存態炭素のフローは、収支がほぼ均衡していた。耕作期間のメタンの総放出量は $5.4 \sim 6.2 \text{ g C m}^{-2}$ であり、年間の炭素収支を評価する場合には無視できる大きさであった。しかし、地球温暖化指数を用いて CO_2 に換算した場合、メタン放出量は $42 \sim 50 \text{ g C m}^{-2}$ に相当し、NEE に比べて無視できない。不定期に行われる厩肥投入を除外すると、水田の年間炭素収支は $100 \sim 160 \text{ g C m}^{-2}$ の流出と評価された。

(水田岡山サイト) 本研究では、岡山大学農学部附属八浜農場で 1998 年 12 月から実施している渦相関法を用いた長期的観測に基づいて、(1) 耕作地における熱および二酸化炭素フラックスの季節変化の実態解明、(2) 水田での熱収支解析、という 2 つの課題に取り組んだ。顕熱フラックスは、2 月から水稻の播種が行われる 5 月中旬にかけて急増し、水稻の生育期間から 1 月までは小さかった。潜熱フラックスは、水田が耕起される 3 月から 6 月にかけて大きな変動を示したが、

水稻の成長が著しい7月から8月にかけて最大となり、その後は急減した。CO₂フラックスは、播種1ヶ月後の6月下旬から下向き（水田による吸収）を示し、10月下旬の収穫期まで吸収が継続した。収穫後のCO₂フラックスは、地温の変化と対応した変動を示した。4年間平均の年間積算NEEは240gC m⁻²の吸収と推定された。

（暖地牧草地サイト）九州・沖縄地域は、我が国の主要な畜産基地であり、作物別作付割合は水稻の36%に続いて飼料作物が19%と2位である。そこで、農耕地での炭素循環を考える上で重要なトウモロコシ・イタリアンライグラス体系温暖牧草地生態系におけるCO₂、エネルギーフラックスを測定し、その季節変動を解析した。さらにCO₂吸収量積算値と収穫量乾物重の比較を行った。冬作のイタリアンライグラス畑では積算値が乾物重に対してわずかに少ない傾向がみられるが、収穫時期ではほぼ一致した。また、トウモロコシ畑では播種直後からほぼ一致しており、CO₂吸収量と乾物量で一致は比較的良かった。最終的な温暖地畑生態系におけるフラックス法から求めた年間のCO₂吸収量は1941 gCO₂ m⁻²である。収穫法による年間の乾物重は2030 gCO₂ m⁻² (5.54 ton C ha⁻¹)である。両者による違いは欠測及び土壌呼吸量の補正を行っていないことなどによると考えられる。

（熱帯雨林サイト）熱帯多雨林帯にある落葉熱帯季節林と常緑熱帯季節林のサイト、若齢二次林サイトの計3サイトで二酸化炭素収支観測を行なった。観測は渦相関法による二酸化炭素収支、熱収支測定と気象観測からなっている。また土壌呼吸をチャンバー法により測定した。

熱帯季節林の常緑林（タイ中東部サケラート）では、常緑ではあるが、生態系純交換量NEEは5-9月の雨季に大きく、12-4月の乾季に小さいという明瞭な季節変化がみられた。乾季と雨季の遷移期には光合成もそれほど下がらず、呼吸量は小さくなるため、NEEは大きい。年間のNEEは10ton C ha⁻¹ yr⁻¹と大きい結果になった。サケラートでは樹木調査が1985年より行われており、ほぼ成熟林であり、小さいNEEが期待されるが、大きなNEEとなった原因のひとつには、夜間弱風時には蓄積された二酸化炭素が水平移流で流出している可能性がある。NEEの風速の依存性を調べ、夜間のNEEは風速の大きいときの値をとるものとする、NEEは6ton C ha⁻¹ yr⁻¹ほどまでに減少した。熱帯季節林の落葉林での観測はタイ中西部のメクロンで行っている。乾季雨季の季節パターンが葉面積指数LAIやNEEに明確に現れている。ここでは2002年のNEEは3.7ton C ha⁻¹ yr⁻¹であった。インドネシアのカリマンタン島ブキットスハルトの二次林の成長段階サイトで二酸化炭素収支の観測を行っている。このサイトでは1998年のエルニーニョに伴う異常乾燥による火災により二次林が消失し、その後5年にして高度10m近くまで復活してきている。毎木調査から求まる森林バイオマスの増加量から1次の純生産量NPPを求めた。さらに土壌呼吸量も考慮した総生産や生態系呼吸量など、この群落における炭素の分配状態を推定した。それによると、生態系純生産量はバイオマス増加量と似た値となった。

〔キーワード〕 森林・湿原・農耕地生態系、アジアフラックス、渦相関法、炭素収支、生態系正味交換量

1. はじめに

地球温暖化の現象解明と対策において、さまざまな陸域生態系の CO₂ 吸収量の評価が求められている。気候変化が陸上生態系の炭素循環に及ぼす影響については数多くの研究が行われており、特に気温の上昇は呼吸量増加を引き起こすため炭素の放出を導くという報告がある一方、北方林生態系では高温は植物の生育期間を延ばすことから炭素吸収を導くという報告もあり、未だ解明されていない。気候変動下における生態系と気候との相互作用を予測するためには、観測によって森林と大気間のエネルギーや CO₂ の交換過程に関する理解を深め、炭素循環プロセスモデルの構築を行うとともに、陸域生態系モデルの検証に必要なデータを収集・蓄積する必要がある。また、このような観測研究は、陸域生態系の CO₂ 収支を評価しこれを国別排出量に反映させようとする温暖化防止京都会議以降の社会的要請、とりわけフルカーボンアカウンティングが議論されていることを背景にその重要性を増している。

本研究では生態系純生産量 NEP（生態系炭素交換量 NEE に負符号を付けたもの）を直接測定出来る CO₂ フラックス長期観測を東アジアモンスーン気候帯の各種生態系において行った。具体的には、落葉広葉樹林、針葉樹林、熱帯雨林、湿原、水田、暖地牧草地の各種生態系のフラックス観測サイト（下記付表参照）を選定して、大気と植生間の CO₂ 等交換量や気象の連続観測を実施し、NEP をはじめとする炭素収支各項を求めた。NEP は光合成により植物が吸収する総生産 GPP から植物の呼吸量と土壌有機物の分解により生ずる炭素を差し引いた量であり、NEP は群落外からみたときの正味の炭素固定量を示す。それ故、NEP が正ならば、その群落は大気中の炭素を吸収し、負ならば炭素を排出している。このため、NEP は大気圏炭素収支に直接関係する量であると共に、CDM(クリーン開発メカニズム)における炭素固定量算出にも重要な数値である。

さらに本観測の成果・データは、世界に各種生態系での炭素収支観測のネットワークである FLUXNET の一環として、東アジアでの陸域生態系の炭素固定量を野外観測により把握することを目的として展開されているフラックス観測網「アジアフラックスネットワーク」に集結して、国際的に貢献することを目指している。

以下に本研究で得られた各観測サイトでのフラックス、気象条件の長期観測、植生活動の季節変化、年々変化のデータに基づいて解明されたフラックスと気象条件の関係、各種生態系での炭素収支プロセス、気候変化に伴う炭素収支の変化予測などに関する研究成果を詳細に報告する。

付表：B3 フラックス観測サイト情報（2003年2月）

観測サイト	植生タイプ	所在地の緯度・経度・標高・立地条件	観測・測定項目
本州（高山）	冷温帯落葉広葉樹林 上層：カンバ類、ミズナラ 下層：笹群落	36° 08'N, 137° 25'E 1420m、複雑地形 年降水量：1247mm 年平均気温：7.7℃	CO ₂ フラックス、気象・放射・地温観測 バイオマス量、リタ-フォール量 土壌呼吸量・光合成量
本州（富士吉田）	冷温帯常緑針葉樹林 上層：アカマツ 下層：ソヨゴなど	35° 27'N, 138° 46'E 1030m、緩傾斜地 年降水量：1506mm 年平均気温：10.1℃	CO ₂ 等フラックス、気象・放射・地温観測 バイオマス量、リタ-フォール量 土壌呼吸量、光合成量

本州（桐生）	ヒノキ アカマツ	34° 58'N, 135° 59'E 250m、傾斜地 年降水量：1500 mm 年平均気温：14℃	CO ₂ 等フラックス、気象・放射・地 温観測 土壌呼吸量 光合成量
水田（筑波）	水田（単作）	36° 03'N, 140° 01'E 15m 年降水量：1400 mm 年平均気温：14℃	CO ₂ 等フラックス、気象観測 CH ₄ 傾度法 乾物生産量 水収支
水田（岡山）	水田（単作）	34° 32'N, 133° 56'E 2m 年降水量：1160 mm 年平均気温：15.8℃	CO ₂ 等フラックス、気象観測 収穫量
牧草地 （熊本・九州 沖縄農研）	牧草地 トウモロコシータ リアンライグラス体 系	31° 44'N, 131° 01'E ～100m 年降水量：2000 mm 年平均気温：16℃	CO ₂ 等フラックス、気象観測 乾物生産量
湿原（釧路・ 赤沼）	高層湿原 ミズゴケ・スゲ群落	43° 06'N, 144° 22'E 8m 年降水量：1040 mm 年平均気温：5.7℃	CO ₂ 等フラックス、気象観測 CH ₄ 傾度法
湿原（釧路・ 温根内）	低層湿原 ヨシ群落	43° 06'N, 144° 20'E 6m 年降水量：1040 mm 年平均気温：5.7℃	CO ₂ 等フラックス、気象観測 CH ₄ 傾度法
タイ（クロン）	熱帯季節林（落葉） フタバガキ	14° 35'N, 98° 51'E 160m、傾斜地 年降水量：1500 mm 年平均気温：25℃	CO ₂ 等フラックス、気象・放射・地 温観測 土壌呼吸量
タイ（サラート）	熱帯雨季節林（常緑）	14° 30'N, 101° 55'E 535m 年降水量：1500-2000 mm 年平均気温：24℃	CO ₂ 等フラックス、気象・放射・地 温観測 土壌呼吸量 生態調査
インドネシア （ブキツスハルト）	熱帯多雨林（常緑）	0° 50'S, 117° 03'E 60m、ほぼ平坦地 年降水量：3300 mm 年平均気温：27℃	CO ₂ 等フラックス、気象・放射・地 温観測 土壌呼吸量

2. 各サイトにおける研究の成果

(1) 高山落葉広葉樹林サイト

① 研究の方法

岐阜県高山市郊外の冷温帯落葉広葉樹林において、渦相関法により二酸化炭素・水蒸気・顕熱フラックスを連続測定している。フラックス観測には超音波風向風速温度計(Kaijo, DAT-600)と赤外分析計(LI-COR, LI-6262)を用い、風速と気温の変動、および二酸化炭素濃度と水蒸気量の測定を行っている。測定高度は 25 m であり、赤外分析計は林床に設置されている。分析計には、チューブとポンプを使ってタワー上から空気を引いて連続的に流している。各種フラックスのほかに、短波・長波放射量、光合成有効放射量、気温と湿度、風向風速、地温、土壌水分量、地中熱流量なども連続測定している。葉面積指数は、林冠における光合成有効放射量の透過率を用いて1日ごとに求めている。

ア. 観測サイトの位置図、植生状況の概要

高山サイトは高山市と乗鞍岳の中間付近に位置し、観測タワーは北緯 36 度 08 分 46 秒、東経 137 度 25 分 23 秒（世界標準測地系）、標高は 1,420 m にある。年平均気温と年降水量はそれぞれ 7.3℃と 2,382 mm（1980～1994 年）である。積雪期は通常 12 月から 4 月中旬の間であり、最大積雪深は 1-2 m である。植生は、ミズナラ、ダケカンバ、シラカンバを主体とする樹齢 50 年程度の落葉広葉樹の二次林で、林床はクマイザサにほぼ一面覆われている。平均的な樹高は 15-20 m である。

サイト周囲の地形は複雑である。水平距離 30 km のスケールで見ると（図 1 b）、サイトは東方向にある乗鞍岳（標高 3,026 m）から西方向の高山市街（標高約 600 m）へ下る途中の尾根上地形の上にある。水平距離 1 km のスケールで見ると（図 1 c）、タワーは鞍部上の地形の上であり、周囲 1 km の範囲内に 100-150 m の起伏が存在する。

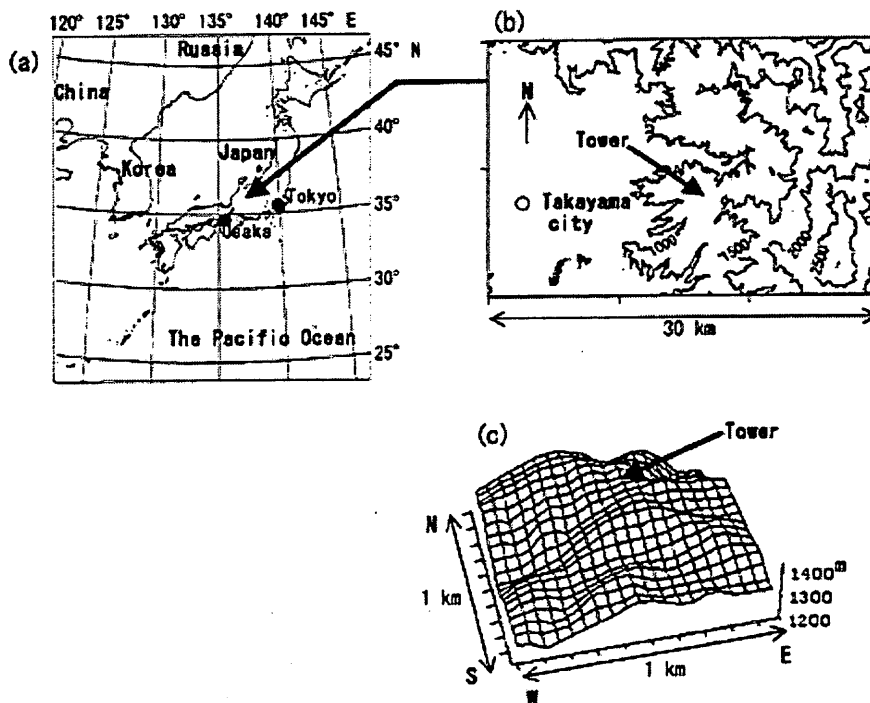


図 1 高山サイトの位置図。

イ. 測定項目・測定手法の概要

1993年9月以降、空気力学的方法による二酸化炭素フラックス観測と一般気象の長期観測を開始した。1998年には渦相関法による二酸化炭素・水蒸気・顕熱フラックスの連続観測を開始した。渦相関法には、観測タワーの高度25 mに設置した超音波風速計(Kaijo, DAT-600)と、クローズドパス方式の赤外分析計(LI-COR, LI-6262)を用いている。分析計には、チューブとポンプを使ってタワー上から空気を引いて連続的に流している。5 Hzの生データを使って、超音波風速計の角度補正、リニアトレンド除去、WPL補正、チューブによる遅延補正、高周波欠落の補正を施し、30分平均のフラックスを求めている。各種フラックスのほかに、短波・長波放射の収支、光合成有効放射量、気温と湿度、風向風速、地温、土壤水分量、地中熱流量などを連続測定している。葉面積指数は、林冠における光合成有効放射量の透過率を用いて1日ごとに求めている。

ウ. 解析項目・解析手法の概要

30分平均の二酸化炭素フラックス FCO_2 に群落内 CO_2 貯留項を加えた量を NEE 、 NEE の符号を変えた量を生態系純生産量 NEP ($=-NEE$) とした。夜間安定時の NEE は、中立に近い場合の結果を使って補正した。欠測値の補完は、(1)短時間の欠測はその前後の値で内挿、(2)長時間の欠測は夜間には FCO_2 と気温の関係を表す実験式を用い、日中には FCO_2 と気温および光合成有効放射量の関係を表す実験式を用いて補完するとした。なお、このサイトの熱収支を調べると、渦相関法で測定した顕熱と潜熱の和は有効放射エネルギー（正味放射から貯熱を引いた値）に比べて日積算で約24%小さい（熱収支の残差が約24%）。このことから渦相関法で測定している二酸化炭素フラックスも過小評価されている可能性があるが、ここでは熱収支の残差分を使った二酸化炭素フラックスの補正は行っていない。

なお現在のノイズデータの除去方法は以下の通りである。

(ア)生データの中で、測定レンジを越えたデータを無効とする

(イ)30分間の中で、無効のデータが基準の数（例えば1000個）以上ある場合は欠測とする。

(ウ)フラックスの値が「正常」と考えられる範囲を設定し（例： CO_2 flux では $\pm 50 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ など）、その範囲を越えた値は欠測とする。

② 解析結果報告

図2に、1995年から2000年に観測された葉面積指数(LAI)を示す。LAIは、樹冠による光合成有効放射の透過率（観測値）を用い、樹冠による光の減衰係数 K ($=0.83$) を仮定することによって求めた。図2に示すLAIには林床植物（クマイザサ）の葉面積は含まれていない。また、冬季のLAIの値（およそ0.6）は主に樹木の幹や枝による光の減衰を反映したものである。6年間に観測されたLAIの季節変化と年々変化を見ると、例年5月下旬から6月下旬のおよそ1ヶ月が展葉期間、10月のおよそ1ヶ月が落葉期間である。落葉開始と終了の時期は6年間で大きく変動することはなかった（1998年9月中旬に見られたLAIの急激な減少は、高山サイトを台風が直撃したことによる）。一方、展葉開始時期は年々大きく変動した。例えば1998年は4月30日(DOY120)頃からLAIの増加が始まったのに対して、2000年は5月25日(DOY145)頃から開始するなど、年により最大およそ20日を越える違いがあったことが分かった。展葉終了から落葉開始までのLAIが高い期間は例年100~120日間程度であることから、20日を越える生育期間の長さの変動は、NEPの年々変動に無視できない影響を及ぼすことと予想される。

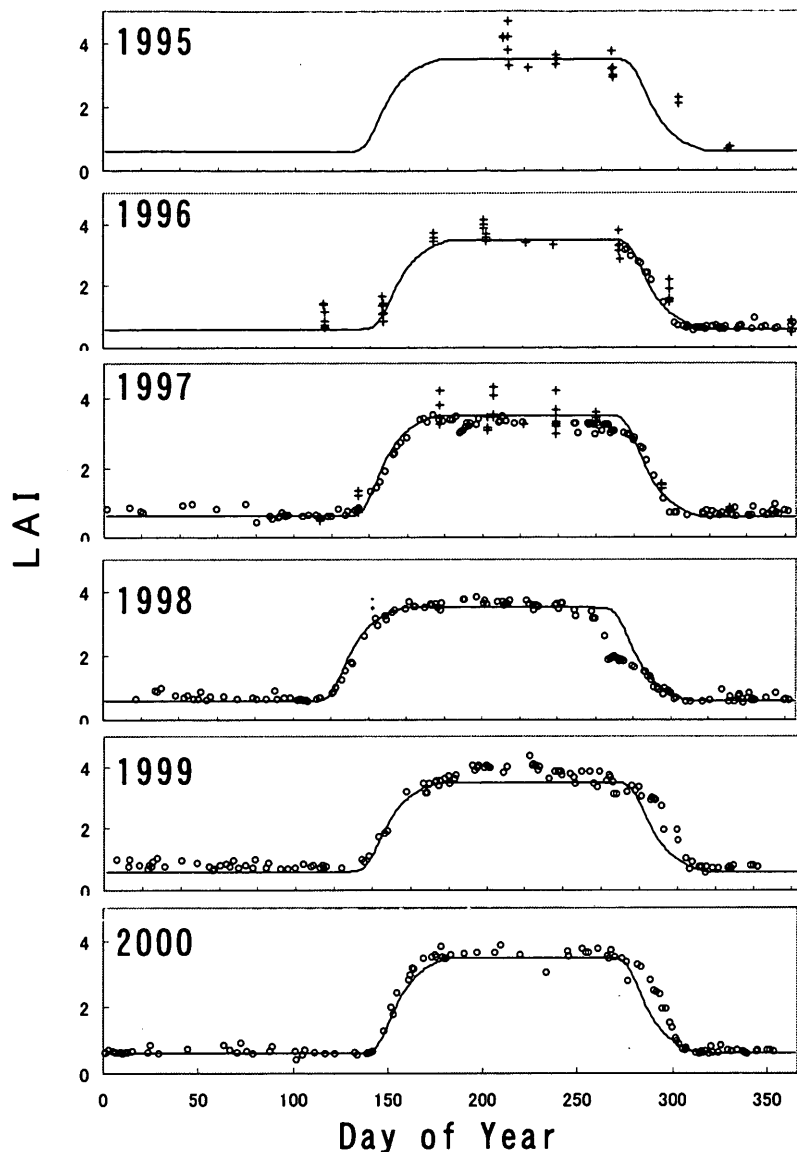


図2 1995年から2000年の間に観測された葉面積指数の季節変化と年々変化。記号は観測されたLAIで、+はプラントキャノピーアナライザ(LI-COR, LI-6262)による観測値、○は樹冠による光合成有効放射の減衰率から求めた値である。実線は、観測に合うようにあてはめたLAIの実験式で、展葉開始日を1月1日からの積算温度から推定した結果である。

図3に1999年から2001年に観測された気温、光量子密度(PPFD)、およびNEEの5日間平均値を示す。毎年6月末(梅雨期)に、PPFDが著しく減少すると同時にNEP(-NEE)の減少する時期がある。また、2000年夏季のNEPはその他の年に比べて高い値を維持したが、これは特に8月のPPFDが高かったことが直接の原因と考えられる。高山サイトは標高が1,420mと高く平地に比べて植物生育期間が短いため、夏季の天候の年々変動は年間炭素収支に対して直接的に大きな影響を及ぼしていることが予想される。

図4に、1998年8月8日～10日に観測された夏季の典型的な晴天日の熱収支各項と二酸化炭素フラックスを示す。(ただし図4の二酸化炭素フラックス F_c は下向きを正としている点に注意)。特に夜間の二酸化炭素フラックスを見ると、8日から9日にかけての夜間には二酸化炭素放出が

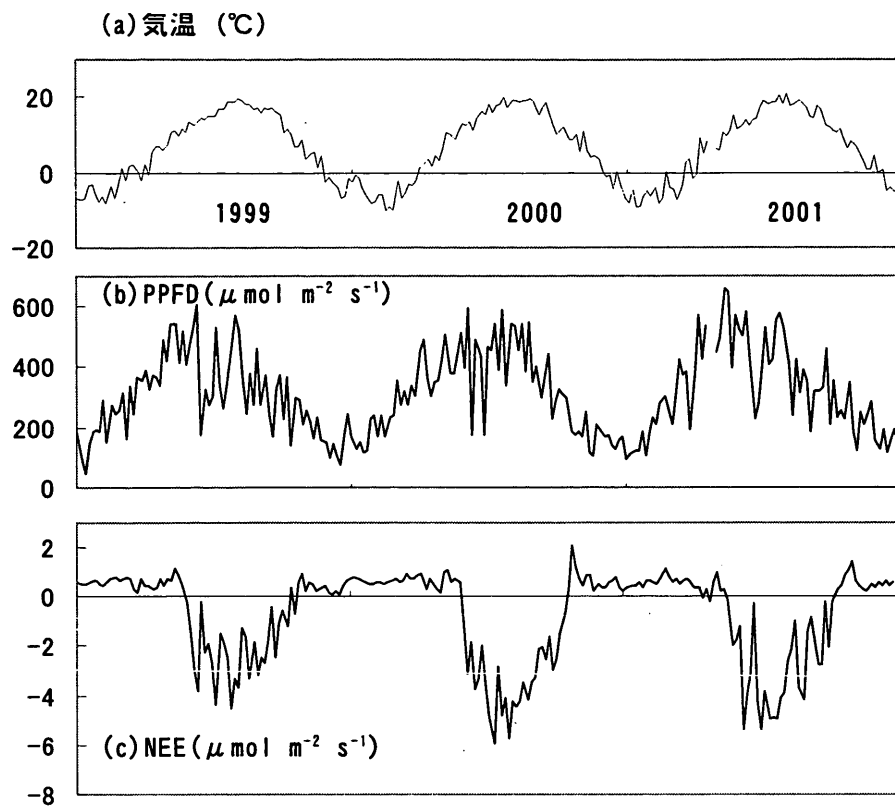


図3 1999～2001年の(a)気温、(b)光量子密度、(c)NEE (5日平均値)。

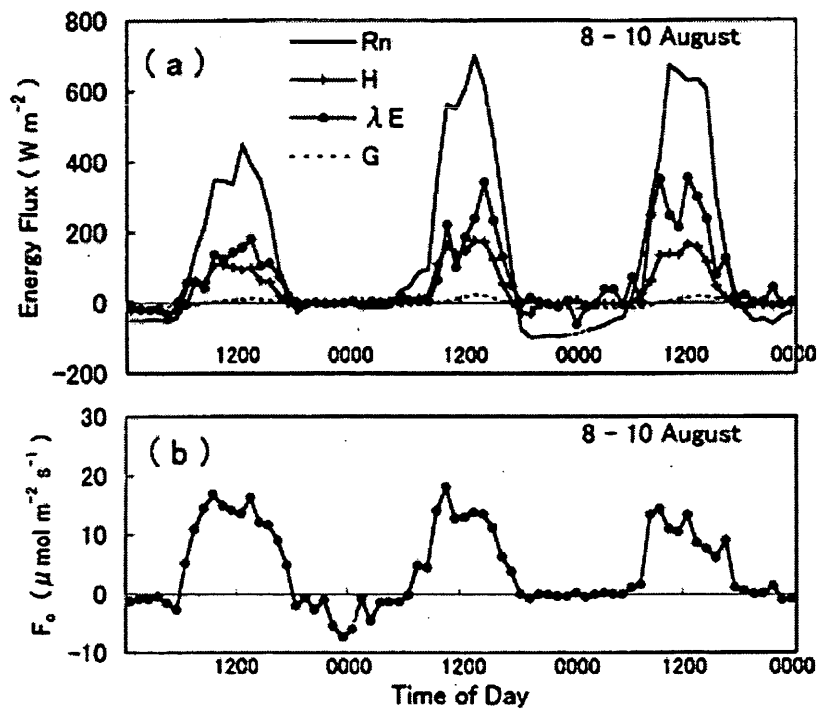


図4 1998年8月8日～10日に観測された(a)熱収支各項と(b)二酸化炭素フラックス (ただしこの図では下向フラックスを正にしている点に注意)。

観測されているが、9日から10日にかけての夜間は、ほぼ一晩中二酸化炭素フラックスが0に近い値で推移した。この結果は、ある条件の夜間に二酸化炭素放出量が過小評価されている可能性が大きいことを表している。

夜間の二酸化炭素放出量を温度の関数として表すと図5のようになる。ここで、 ΔT (=高度25mの気温-高度18mの気温)は大気安定度の指標として用いているパラメータで、 ΔT が0に近い(図5a)場合に中立、 ΔT の値が大きい(図5c)ほど安定であることを表す。なお、図5(a)の実線は、大気が中立に近い場合に夜間二酸化炭素放出量と気温の関係を表す実験式であり、点線は土壌呼吸量の実験式(Nishimura, 1996)¹⁾である。図5(a)-(c)の結果から、高山サイトでは大気安定の条件下では、二酸化炭素放出量が中立に比べて低いのみならず、土壌呼吸量に比べても明らかに低いことがわかった。この原因としては、(1)高山サイトが複雑地形にあることから、安定の条件下で二酸化炭素濃度の高い空気が地形に沿って標高の低い場所へ流出しているのではないか、(2)安定時の乱流輸送を現在の渦相関法の測定手法で正しく測定していないのではないか、などの点が予想されている。このうち(1)については、タワー周辺の群落内の斜面上で(高度3m)風向風速と二酸化炭素濃度を観測したところ、安定な夜間に冷気流に伴って現実に二酸化炭素が流出している現象が確認された。したがって、本研究では、夜間安定時の放出量は大気中立の条件下で作成した実験式を用いて補正している。

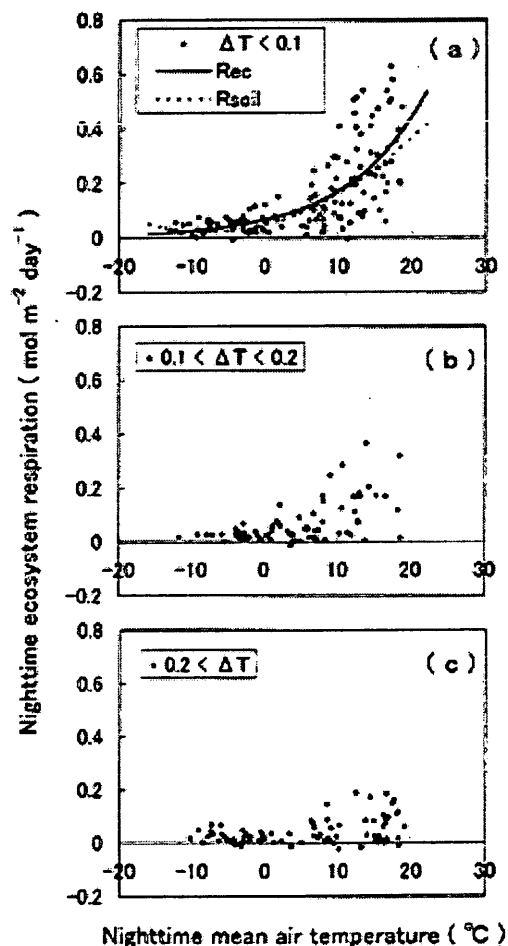


図5 夜間の二酸化炭素放出量と夜間温度の関係

生態系純生産量 $NEP (= -NEE)$ の日積算値に、夜間の二酸化炭素フラックスから見積もった生態系呼吸量 (Rec) を加えると、生態系の総生産量 $GPP (= NEP + Rec)$ を求めることができる。1998 年から 1999 年にかけて得られた GPP と樹冠で吸収された光合成有効放射 $APAR$ の関係を図 6 に示す。この結果、 GPP - $APAR$ の関係は飽和型の関数形で良好に表すことができること、 GPP - $APAR$ 曲線の最大値は 7 月ころに現れること、 GPP - $APAR$ 曲線の最大値と初期勾配は共に明瞭な季節変化を示すことなどが分かった。

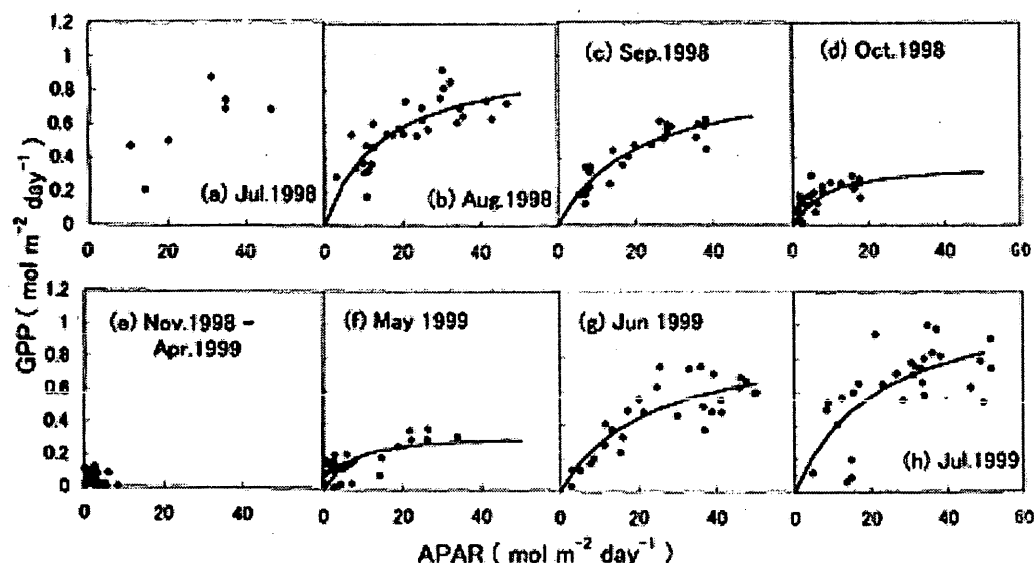


図 6 日積算の光合成総生産量 GPP と樹冠で吸収された光合成有効放射 $APAR$ の関係

高山サイトの年間の NEP を求める際、現在のところ最大の不確定要因は、夜間安定時の補正をどの程度行うかという事である。補正条件を変えて年間 NEP を求めた結果を表 1 に示す。補正の有無で $50\text{--}60 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ の差があり、補正の程度によって約 $40 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ の差が生じている。現時点ではどの程度の補正が正しいのか明らかではない。このためサイト間の結果の比較等を行う際には、補正方法を明示することが必須である。また、夜間の補正が年間 NEP に大きな影響を及ぼすという結果は、複雑地形地でのフラックス観測の一つの特徴であり、慎重な取り扱いを必要とする点ではないかと考えられる。

表 1. 渦相関法で求めた年間 NEP . (1) 夜間安定時のデータを補正しない場合, (2) 摩擦速度 0.2 m s^{-1} 以下の NEE を補正した場合, (3) 0.5 m s^{-1} 以下を補正した場合. (単位 $\text{gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$)

Year	1999	2000	2001
$NEP_{(1)}$	251	376	342
$NEP_{(2)}$	198	309	290
$NEP_{(3)}$	159	272	248

最後に、1993 年以降行っている空気力学的方法 (2 点傾度法; Yamamoto et al., 1999)²⁾ による二酸化炭素フラックスの測定結果と 1998 年以降行われている渦相関法の結果を用いて、1994～2001 年の NEP を求めることを試みた。傾度法による NEP を渦相関法と比べると、日変化・季節変化ともに振幅が系統的に小さいという差があったため、両者の相関関係を調べて補正係数を決

め、傾度法の結果が渦相関法に合うよう補正した。傾度法と渦相関法で求めた NEP の季節変化・年々変化を図 7 に示す。8 年間の年間 NEP は平均 $224 \pm 82 \text{ gC m}^{-2}$ であること(表 1 の NEP_2 の計算方法)、年によって 100 gC m^{-2} 以上の大きな違いがあることなどが分かった。

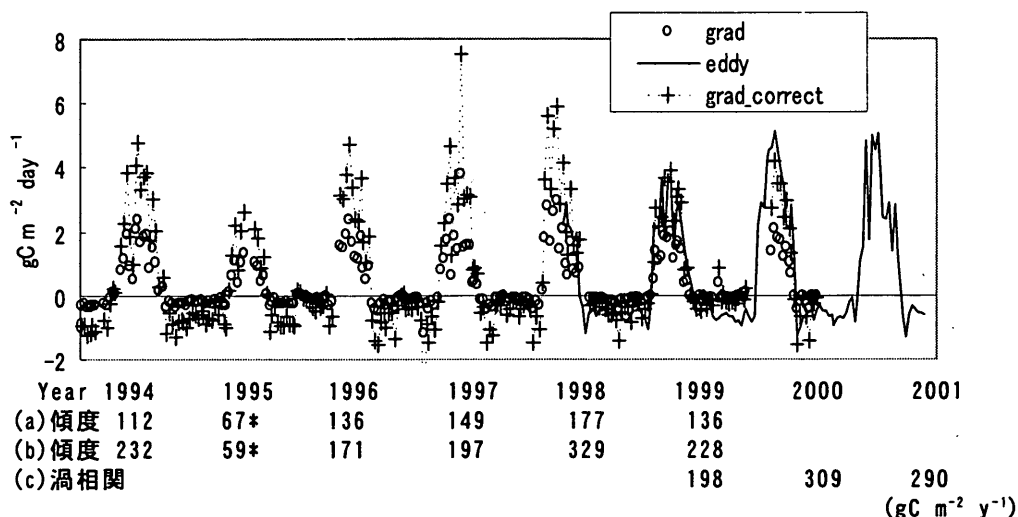


図 7 1994～2001 年における NEP の長期変化。図は 30 日間の移動平均をかけた値。図の下に示す数値(a)～(c)は年間値で、(a)2 点傾度法、(b)渦相関法に合うよう傾度法を補正した結果、(c)渦相関法である。(* 1 ヶ月以上の欠測を含む結果)

③ 成果

二酸化炭素フラックスの年による違いの第 1 の要因は光合成有効放射が梅雨期、夏季の降水状態が年々変動すること、第 2 に展葉を開始する時期の違いである。葉面積指数(LAI)の観測結果に基づいて春季に LAI が増加を開始した日(LAI が 1 を超えた日)の比較から、展葉開始日は年によって 20 日程度変動していることが分かった。また、高山サイトでは、夜間および冬季の二酸化炭素フラックスは主に気温の関数、夏季の日中の二酸化炭素フラックスは光合成有効放射と気温の関数であることが分かった。一方、高山サイトでは、二酸化炭素フラックスに対する土壌水分量と飽差の影響は明瞭ではない。このことは、高山サイトは年間降水量が多く(2000 mm 以上)湿潤な条件下にあることに関係すると考えられる。

④ データ解析状況、データセット提供の可能時期について

ア. 二酸化炭素濃度以外の一般気象データと土壌関係(温度、水分、熱流量)データについては、Eco-DB で順次公開中。

イ. 渦相関法による NEE, 気温, PPFD については 1999～2001 年の 3 年間の日平均値を提供可能。

ウ. 各種フラックスの 30 分値については整理中。要請があれば個別に提供可能。

⑤ 引用文献

- 1) Nishimura, N., 1996: Estimation of carbon cycling in the Sasa type floor vegetation of cool-temperate forest ecosystem. Annual report of the Global Environmental Research Fund of the Japan Environment Agency (in Japanese). pp. 73-85.
- 2) 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, 50B, 402-413.

(2) 富士吉田アカマツ樹林サイト

① 研究の目的

本課題では、東アジアモンスーン気候帯に属する陸域生態系の中で、冷温帯常緑針葉樹林における観測研究を分担する。本観測研究により、大気－森林生態系間のCO₂フラックス（交換量）が見積もられる。また、これらの交換量がどのような気象条件によって影響を受けるか、またその程度が把握され、森林生態系の炭素循環を特徴づけるパラメータが明らかとなる。また、生態系炭素収支要素のフラックス、生態系生長量のデータが蓄積され、森林群落の炭素収支を見積もることが可能となる。得られた観測データは、生態系炭素収支、およびその変動予測モデルの検証データとして活用されることが期待される。

なお本観測研究において、タワーフラックス観測および森林微気象の観測は森林総合研究所が、森林生態系およびその成長量調査は山梨県環境科学研究所が、また、土壌呼吸量測定は筑波大学と山梨県環境科学研究所が共同で実施した。

② 研究方法

ア. 観測サイトの概要

フラックス観測を行ったアカマツ林は山梨県富士吉田市の35°27'N、138°46'Eに位置し（図8）、標高（観測タワー位置）は約1,030mである。富士山北麓に広がる剣丸尾溶岩流上に成立する面積約36km²の常緑針葉樹林内にあり、周囲は傾斜約3.5度の比較的一様な地形である。土壌の発達が悪く、基岩上にA₀層がのっているほかはA層、B層を欠き、場所によっては基岩が露出する。常緑針葉樹林を構成する樹種はアカマツを主体とし、中層以下にソヨゴ、コナラ、ネジキ、ダンコウバイなどが混交する（図9）。上部樹冠を構成するアカマツの平均樹高は約20m、胸高直径は約30 cmで、樹齢は約90年と推定されている。調査対象のアカマツ林を含む富士北麓の森林は、江戸時代から柴刈りなどに利用されてきた入会地であった。明治維新後の所有権の混乱から濫伐・盗伐が行われ、一時的に森林が荒廃した。その後、恩賜林保護組合により適切な植林や保護・管理が行われるようになったが、植林が難しかった剣丸尾溶岩流上は天然更新にまかされた。本観測サイトの森林は、このような経緯で明治後期以降に天然更新して成立したアカマツ二次林である（大塚ら、2003）³⁾。

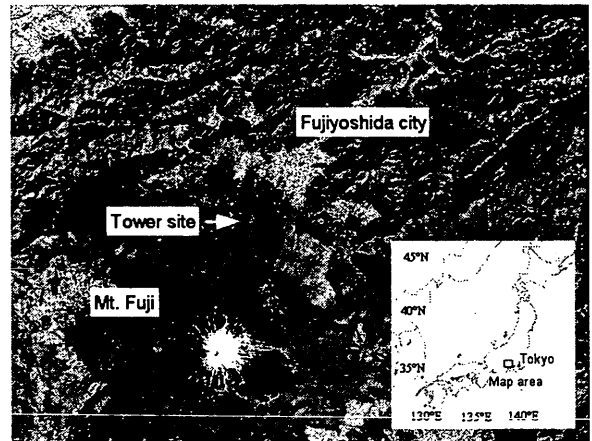


図8 観測サイトの位置



図9 アカマツ林の断面

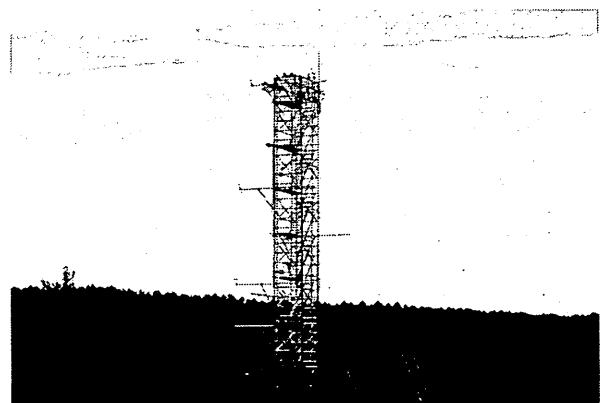


図10 微気象観測タワーとアカマツ林樹冠の状態

試験地付近の年平均気温は9.7℃
(1998～2000年の平均値、山梨県環境
科学研究所)、また試験地から北に
5kmに位置する河口湖測候所（標高
860m）の年平均降水量は1484mm
(1995～1999の平均)である。11月
から3月までは降雪があり、積雪深
の年変動は大きい。プラント・キャ
ノピー・アナライザ(LAI-2000/Li-
Cor)で測定した群落の葉面積指数は、
寒候季に約3.5、暖候季に約5であっ
た。

イ.測定項目と測定・解析方法の概要 (ア)タワーフラックス、微気象観測

アカマツ林内に高さ32mのアルミ足場製微気象観測タワーを設置した（図10）。観測項目は、ク
ローズドパス型赤外線ガス分析計を使用した、渦相関法による森林群落上のCO₂、顕熱、潜熱フラ
ックスを主体に、長波・短波放射量、光合成有効放射量(PPFD)、気温、湿度、風速の鉛直分布、

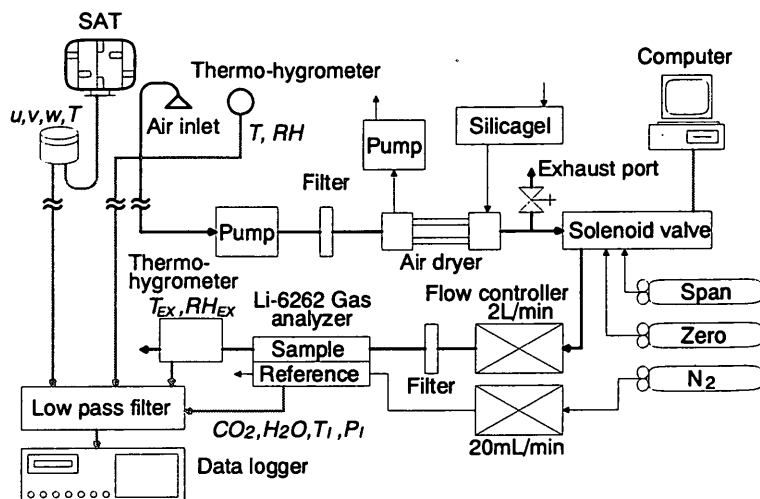


図11クローズドパス型赤外線CO₂分析計を使用したCO₂フ
ラックス測定システム

表 2 微気象観測に用いた測器の一覧と設置高度

Elements	Instruments	Height (m)
Eddy correlation flux measurements		
Wind velocity and sonic air temperature	SAT (DA600-3T / KAIJO)	24, 31.5
CO ₂ concentration	IRGA (Li6262 / LiCor)	24 (air-intake) 24 (air intake)
Air temperature and humidity	Thermo-hygrometer (HMP45A / Vaisala)	24
Micrometeorological measurements		
Short wave radiation	Pyranometer (CM6 / Kipp&Zonen)	31.5 / 28
(Downward/Upward)	Pyranometer (CM6B/Kipp&Zonen)	26
Long wave radiation(Downward/Upward)	Long wave radiometer (PIR/EPLab)	31.5 / 28
Long wave radiation (Upward)	Long wave radiometer (PIR/EPLab)	26
PAR (Downward/Upward / Lower canopy)	PAR sensor (Li190SA / LiCor)	31.5 / 28 / 2.5 26
PAR (Upward)		2.5 (three points)
PAR (Lower canopy)		
Net radiation (Lower canopy)	Net radiometer (Q*7 / REBS)	2.5 (above forest floor)
Air temperature and humidity	Thermo-hygrometer (HMP45D / Vaisala)	31.5, 27, 22.8, 21, 19, 13.3, 9.4, 3.5
CO ₂ concentration	IRGA (Li6262 / LiCor)	22.8, 19, 13.3, 9.4, 3.5 (air-intake height)
Wind velocity	Cup anemometer (WM30P / Ikeda Keiki)	31.5, 27, 22.8, 21, 19, 13.3, 9.4, 3.5
Wind direction	Wind vane (A802 / Yokogawa)	32
Soil temperature	Thermo-couple	0, 2, 5, 10, 25, 50 cm depth
Soil heat flux	Heat flux plate (MF81 / EKO)	2 cm depth (four points)
Atmospheric pressure	Barometer (PTB100 / Vaisala)	2 (in the shack)
Precipitation	Tipping bucket rain gauge (Yokogawa)	1 (at an open-space)

地温、土壌水分、群落内のCO₂濃度鉛直分布などである。これらを測定するために、超音波風速温度計(DAT600-3T/KAIJO)、赤外線ガス分析計(LI-6262/LiCor)、長波放射計(PIR/EPLAB)、短波放射計(CM6F/Kipp&Zonen)、光合成有効放射計(LI190SA/LiCor)、温度・湿度計(HMP45D/Vaisala)、風速計(WM30P/Ikeda Keiki)、地中熱流計(MF81/EKO)、地温計などの測器を、観測タワーとその周辺に配置した(表2。クローズドパス型赤外線ガス分析計を使用した、CO₂フラックス測定システムを図11示す。)

超音波風速温度計などの乱流変動観測センサは、観測タワーの高さ26mに設置した。ここから内径6mmのテフロンチューブ(長さ約40m)で大気を吸引し、観測小屋に設置した赤外線ガス分析計でCO₂濃度変化を測定した。また、CO₂貯留変化量を測定するため、高さ26m以下の5高度から大気を吸引し、別の赤外線ガス分析計でCO₂濃度を測定した。2台の赤外線ガス分析計は、CO₂濃度がそれぞれ0ppm、400~450ppmの2種類の標準ガスを用いて、1日1回キャリブレーションを行った。

変動値を測定するための乱流観測系のデータは、カットオフ周波数が24Hzの低域フィルタを通した信号を、光磁気ディスクを搭載したデータロガー(DR-M3b/TEAC)を使用して5Hzで記録した。また、CO₂貯留変化量の測定は、パーソナルコンピュータ(PC)で測定高度切り替えのための電磁弁と吸引ポンプを制御しながら、赤外線ガスアナライザの出力を収録した。1高度当たり2minの所要時間で、CO₂フラックス測定高度以下林床に至る間の5高度を、計10minで測定した。その他の微気象等要素は、データロガー(CADAC-2/ ETO Denki)を用いて20s間隔でサンプリングし、5minの平均値または積算値をPCのハードディスクに記録した。

(イ)土壌呼吸量観測

土壌呼吸量の測定は、自動開閉型チャンバ(AOCC)を用いた連続自動測定システムを使用して行った。システムの概要を図12に示す。このシステムはPCによって自動的に開閉する4個のチャンバがあり、チャンバの底面積は1,200cm²、土壌表面からの高さは約5cmである。これを永久コドレート内に3m間隔で設置した。PCにセットされた測定スケジュールに従い、チャンバを閉じてから閉鎖系内を一定流量で循環する空気を10minごとに15mlサンプルした後、ガスクロマトグラフによって空気中のCO₂濃度を測定し、これを4回繰り返して濃度変化から1台のチャンバあたりの土壌呼吸量を求めた。測定時以外は、チャンバのふたを開けることで、チャンバ内をチャンバ外の環境に近づけることができる点にこの方法の特徴がある。このような測定を4台のチャンバについて順に行い、平均的な土壌呼吸量を求めた。同時に、チャンバ付近の気温、土壌表面と深さ5cmの地温を測定し、データを収録した。

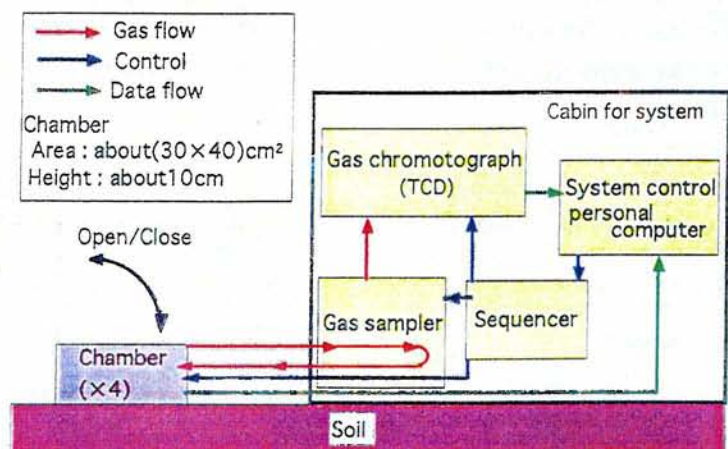


図12 自動開閉型チャンバー法(AOCC-method)による土壌呼吸連続測定システムの概要

(ウ)森林の純一次生産量

純一次生産量(NPP)は植物によるCO₂取り込み量の森林全体での総量で、一定期間内に植物の組織、貯蔵物質の形で具現化された有機物量である。本研究では、

積み上げ法と呼ばれる、森林全体で蓄積された有機物量を測定する手法を用いた。森林の純一次生産量は被食量が無視できる場合、「 $NPP = \text{森林全体での成長量} - \text{枯死・脱落量}$ 」で求められる(JIBP Synthesis, 1977)⁴⁾。

森林全体での枯死量を測定するため、0.89haの永久コドラートを設定し、種組成の調査を実施した。また、林冠から落ちてくる葉や小枝の量を測定する面積 1m^2 のリタートラップ20個を、2000年4月にランダムに設置した。リタートラップ内のリターは毎月1度回収し、葉・枝・樹皮・果実・花などに分けた後、乾燥重量を測定した。また、風や雪によって落下する大型の枝はリタートラップで測定することが難しいため、永久コドラート内に9個のサブコドラート(各面積 100m^2)を設定し、枝トラップとして利用した。枝トラップに落下した枝を毎月1回採取し、乾燥重量を測定した。

一方、森林の成長量を調査するため、各個体の直径の年成長を測定し、これからバイオマス成長量を推定した。精確な直径年成長量を測定するために、永久コドラート周辺にサンプル木18本(アカマツ10本、ソヨゴ6本、リョウブ、ネジキ各1本)を選定し、ペイントでマーキングした胸高直径測定位置を月1回以上の頻度で測定し、各樹木個体の直径の季節変動パターンを調査した。ウ。タワーフラックス観測における詳細な解析方法

フラックス計算の計算時間(平均化時間)は30minとした。風速場の3次元座標変換(McMillen, 1988)を行って風速鉛直成分(w')の分離を行い、また、気温、水蒸気量、 CO_2 などのスカラ量はリニアトレンドを除去して変動値を分離した。

(ア)運動量、顕熱、潜熱フラックス

運動量、顕熱フラックスは、超音波風速温度計の測定値から計算した。水蒸気変動は通風筒に格納したセラミック・白金抵抗を用いた温度湿度計(HMP-45A/Vaisala)を使用して求めた。これから計算される生の潜熱スペクトルを、超音波風速温度計から求めた顕熱スペクトルの形で補正し、潜熱フラックスを計算した(Aubinet *et al.*, 2000)⁵⁾。この補正に使用する周波数領域での応答関数は、日中の顕熱フラックス・コスペクトルとの比を、30分を単位として20以上のサンプルについてアンサンブル平均して求めた。

(イ) CO_2 フラックス

クローズドパス型 CO_2 分析計を用いての CO_2 フラックス測定では、大気吸引に伴う遅れ時間を見積もる必要がある。この遅れ時間は、計算の中で w' との CO_2 変動成分(c')の相互相関から30分毎に計算した。遅れ時間の変化は日変化を伴い、また主に測定系内に挿入されたフィルタの汚れと関係して長期的に変化した。フラックス計算には、30分ごとの遅れ時間を集計して日変化を除去し、14日~21日を期間として直線近似した値を使用した。大気吸引の流量 10Lmin^{-1} で約 $10\text{s} \pm 2\text{s}$ の遅れ時間となり、この状態で安定して CO_2 フラックスを測定できた。また、 CO_2 フラックスと顕熱フラックスそれぞれのコスペクトルを周波数領域で比較する

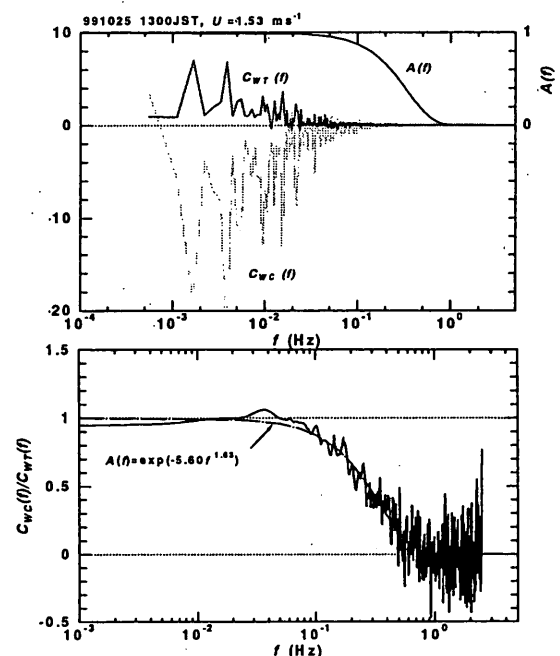


図13 顕熱、 CO_2 フラックスのコスペクトルの比較(上)とクローズドパス系内での、 CO_2 フラックスの高域減衰(下)

ことで、チューブ、ガス分析計カラムなどの測定系内で生じるCO₂フラックスの高域減衰の影響を総合的に評価し、高域減衰関数を遅れ時間に関係づけて決定し、周波数領域でCO₂フラックスの補正を行った。高域減衰を示す関数の一例を図13に示す。

なお、観測システムでは吸引された空気中の水蒸気をCO₂濃度測定前に除去しているが、クロードパスに対するWPLの補正項を毎回計算し、CO₂フラックスに対する水蒸気の影響が無視できることを確認した。生態系の正味CO₂交換量(NEE)は、CO₂フラックス(F_c)と、CO₂貯留変化量(Sc)から、

$$NEE = F_c + Sc \quad (1)$$

で求めた。NEEの符号は F_c の符号と同じで、CO₂が群落から大気へ放出された場合を正とした。

フラックス計算処理において、生データのレンジチェック、スパイクノイズの検出を行い、データの除去と補間を実施した。データの分散、共分散に関する定常性のチェックに用いる統計量の計算ルーティンを解析ソフトウェアに追加したが、データの良否を判別する閾値の選定には至らなかったため、この解析では定常性に関するデータの品質管理(Quality control)は行っていない。

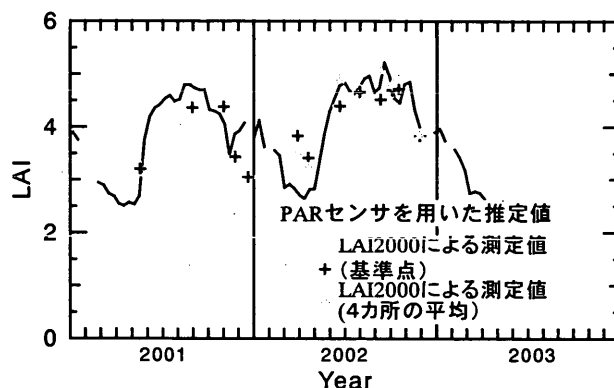


図14 葉面積指数の季節変化

③ 解析結果と考察

ア. タワーフラックスと微気象

(ア) 群落葉面積の変化

アカマツの葉の寿命は2~3年であるため、アカマツ林の樹冠には1年を通じて緑の葉が存在するが、最大葉量の1/2~1/3が1年間に入れ替わる。1999年秋から2000年春にかけて、試験地では11月頃にアカマツの落葉が見られ、5月上旬に新葉の展開が始まった。また、群落内に混交する落葉広葉樹は、10月下旬~11月上旬に落葉し、概ね5月中旬に開葉する(図14)。葉面積指数およびアルベドの季節変化は、このような葉の落葉や展開とよく対応した。

(イ) タワー周辺の風速場

タワーで観測された風向の頻度分布を図15に示す。フラックス観測サイトのほぼ真南には富士山があるため、その方向から風が吹く頻度は低い。このサイトでは、最も風向頻度の高い南西~西風で、最も状態の良いフェッチが確保される。風向 ϕ (°)別の水平平均風速 $\bar{U}$ と平均鉛直

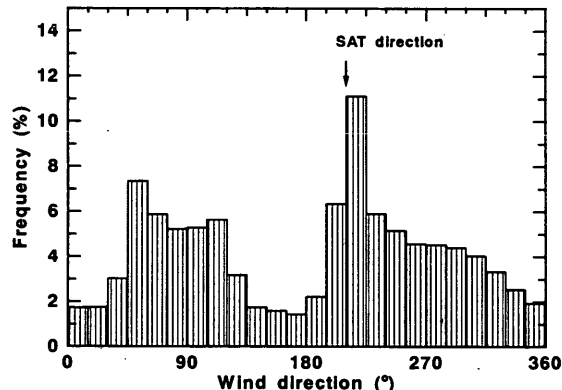


図15 風向の頻度分布

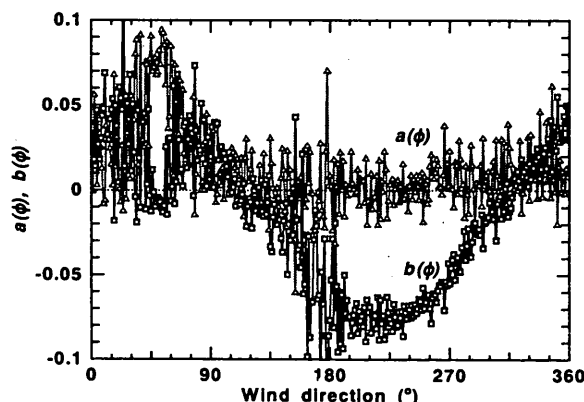


図16 風向(ϕ)別の水平風速に対する鉛直風速平均値の関係。 $W(\phi) = a(\phi) + \bar{U}(\phi) \times b(\phi)$

風速 $\overline{W}$ の関係を、

$$\overline{W}(\phi) = a(\phi) + \overline{U}(\phi) \times b(\phi) \quad (2)$$

の形で整理すると図16のようになった。このサイトは傾斜が約3.5°の緩斜面上にあり、高さ32mの観測タワーの26m位置に、標高の高い側（ほぼ南側）に向けて超音波風速温度計(SAT)が取り付けられている。もし斜面の傾斜が一様で、風が斜面に沿って吹けば、 $a(\phi)=0$ 、 $b(\phi)$ は方位に対してsinカーブを描く。タワーを通過して裏側から風がSATに吹き込む、風向が20°~90°の範囲では、風速場がタワーの影響を強く受けていることが分かった。それ以外の風向では、概ね斜面に沿って風が吹いている様子がうかがえる。

(ウ)生態系呼吸量のパラメタリゼーション

欠測値の補完と、生態系の呼吸・光合成を特徴づける要因を抽出する目的で、比較的古典的な方法ではあるがこれまでに研究蓄積が多く、さまざまな森林生態系間での比較に便利なsemi-empirical method と呼ばれる方法を用いて、生態系の呼吸量と総光合成量のパラメタリゼーションを実施した。

$$N_e = -A_g + R_e \quad (3)$$

$$R_e = R_0 Q_{10}^{[(T-T_0)/10]} \quad (4)$$

$$A_g = \frac{A_{g \max} \cdot Q_p}{(A_{g \max} / \alpha) + Q_p} \quad (5)$$

ここに、 N_e : 生態系の正味CO₂交換量(NEE)、 A_g : 総光合成量、 R_e : 生態系呼吸量、 Q_p : 放射量を表す。放射量は群落で吸収された光合成有効放射量(APAR)を用いた。生態系呼吸量は温度の増加にともない指数関数的に増加することが知られており、(4)式を適用して係数 R_0 、 Q_{10} を決定した。森林群落上の気温と、夜間のNEE観測値との関係を図17に示す。群落呼吸量のパラメタリゼーションには、地温を用いることも多いが、ここでは群落上の気温を用いて関係式の係数を決定した。この例では年間のデータを使用して係数を決めたため、 R_0 、 Q_{10} の季節変化は反映されていない。

(エ)生態系総生産量のパラメタリゼーション

森林群落で吸収された日中の光合成有効放射量(APAR; Q_p)と、生態系正味CO₂交換量(NEE; N_e)の関係を示す例として、2000年の8月1ヶ月間に得られた観測値を図18に示す。図には、y 切片を残したまま最小二乗法による直角双曲線近似で得られた曲線も一緒に示している。前節で得られた生態系呼吸量のパラメータを用いて気温から群落呼吸量を計算し、これをNEEから差し引くと群落総生産量(A_g)が得られる。APARと A_g の関係は図19のようになり、近似した曲線はほぼ原点を

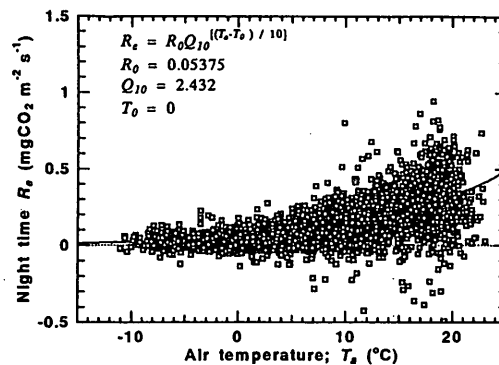


図17 気温と生態系呼吸量の関係

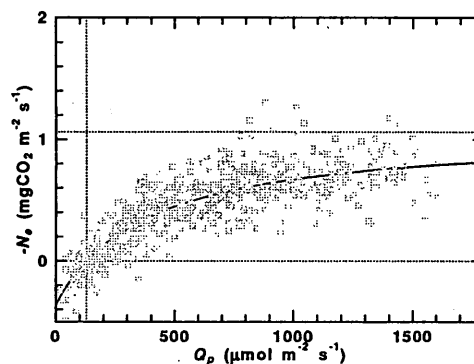


図18 放射量(APAR)とNEEの関係

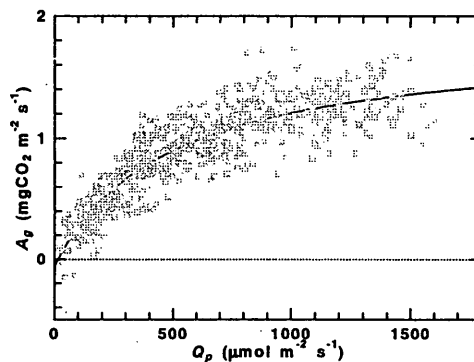


図19 放射量(APAR)と群落総生産量 A_g の関係

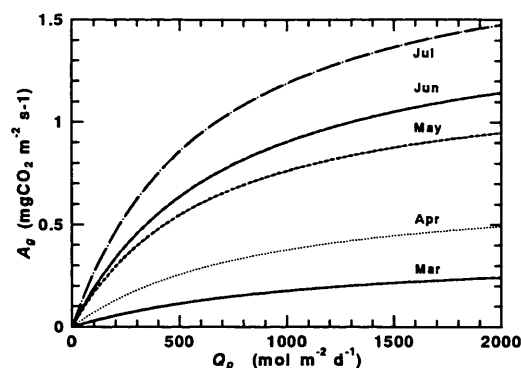
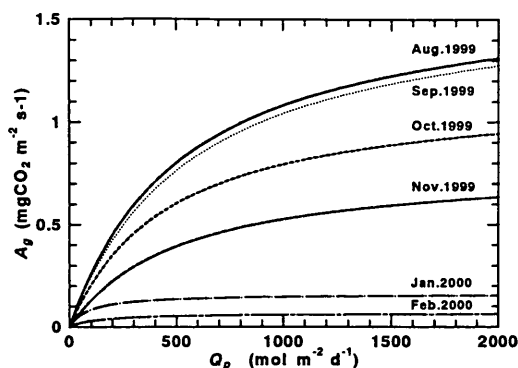


図20 月別の放射量(Q_p : ここではAPAR)と群落総生産量 A_g の関係

通ることが確認された。(5)式の係数 $A_{g\max}$ は、温度や光合成に關与する群落の葉の状態などにより変化するので、その季節変化を考慮する必要がある。このような処理を月単位で行った結果、図20が得られた。本サイトでは、観測された温度範囲(気温が $0^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$)において、気温と $A_{g\max}$ の間には図21のような直線関係が見られたので、 $A_{g\max}$ をさらに気温でパラメータ化することができた。これらから夜間の生態系呼吸量、日中のNEEを推定することが可能となり、欠測値の補間に使用された。

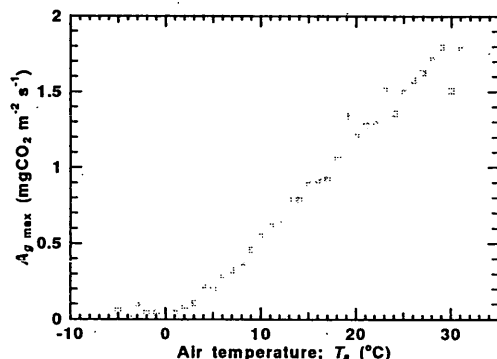


図21 気温と $A_{g\max}$ の関係

(オ)熱収支、生態系正味 CO_2 交換量の特徴とNEEの季節変化、年々変動

休眠期(2月)と成長期(7月)の代表的な微気象要素とNEEの日変化を図22に示す。2月の林床には50cm程度の積雪があるため、融雪エネルギーを加味しないとエネルギー収支は閉じない。一方、7月の日変化でも、日中の (R_n-G) に対する $(H+IE)$ は80%程度にとどまる。富士吉田サイトでのエネルギー収支インバランスは50%~90%の範囲にあり、風向などによって変化した。

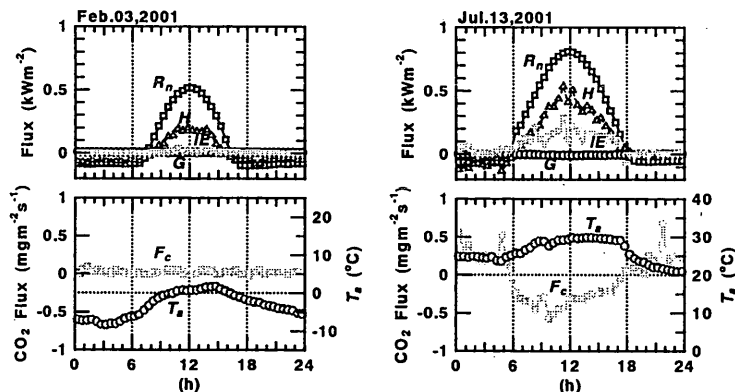


図22 アカマツ林における、休眠期(冬季)と成長期(夏季)のエネルギー収支、 CO_2 フラックスの日変化の例。

研究期間に観測によって得られた、富士吉田アカマツ林サイトにおける日全天日射量(S_d)、日平均気温(T_a)と、顕熱(H)・潜熱(IE)フラックス、およびNEEの日平均值(10日間の移動平均)を、日降水量とともに図23に、主な気象要素の年々変動を表3に、さらに年別、月別の生態系純生産量を図24にそれぞれ示す。2000年~2002年の年間のNEEは、それぞれ $371\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$ 、 $391\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$ 、 $475\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$ となった。(Quality control と夜間の呼吸量パラメタリゼーションの見直し作業が進行中のため暫定値)。

表3 主な気象要素と生態系純生産量(NEP)の年々変動

	2000年	2001年	2002年	単位
降水量	1268	2414	1858	mm y^{-1}
全天日射量	5317	5277	5162	$\text{MJm}^{-2}\text{y}^{-1}$
年平均気温	9.84	9.40	9.74	$^{\circ}\text{C}$
純生産量(NEP)	371	391	475	$\text{gC m}^{-2}\text{y}^{-1}$ (暫定値)

2000年を基準に2001年を比較すると、降水量は約1100mmの増加、年全天日射量はほぼ等しく、年平均気温は約0.4℃低下した。NEEは約5%の増加となったが、その季節変化パターンは両年で大きく異なった。2001年は、

梅雨季(6月)のCO₂吸収量の減少が2000年ほど顕著ではないのに対して、夏季の吸収量は逆に2000年よりかなり少なく、とりわけ2001年は9月のCO₂吸収量の減少が顕著であった。冬季の休眠期間は2001年が2000年より約1か月長かった。2002年は、暖冬につづき春の訪れも早かったため、2000年、2001年には呼吸による放出が吸収量を上回っていた1月、2月でも、2002年は逆にCO₂の吸収が見られた。3月は、まだ気温が低く生態系呼吸量が小さいこととも相まって、盛夏の8月よりも大きな吸収を示した。これにより、2002年のNEPは3年間で最も大きく、2000年に対して28%の増加となった。このような年間のNEPの大きな違いは、年単位の気象要素の違いでは説明出来ず、NEPの季節変化の年による違いが大きく影響していると考えられた。

常緑針葉樹林サイトの富士吉田試験地では、葉量は季節変化するも

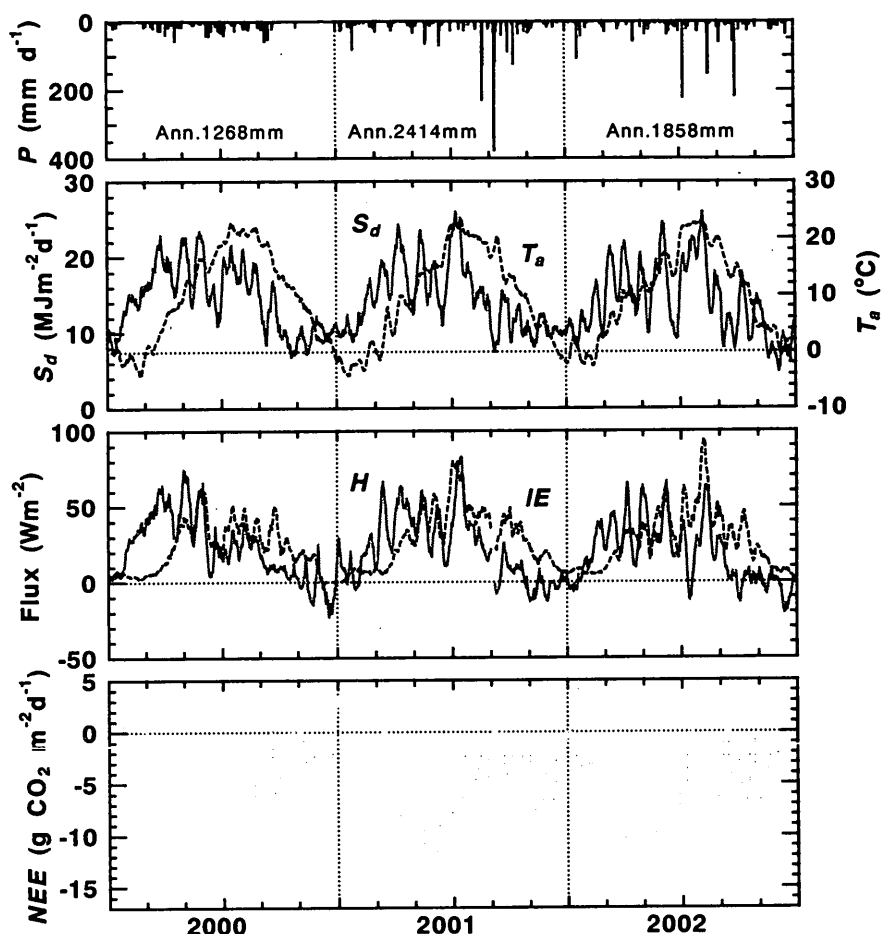


図23 降水量、全天日射量、気温、顕熱・潜熱フラックス、NEEの季節変化と年々変動

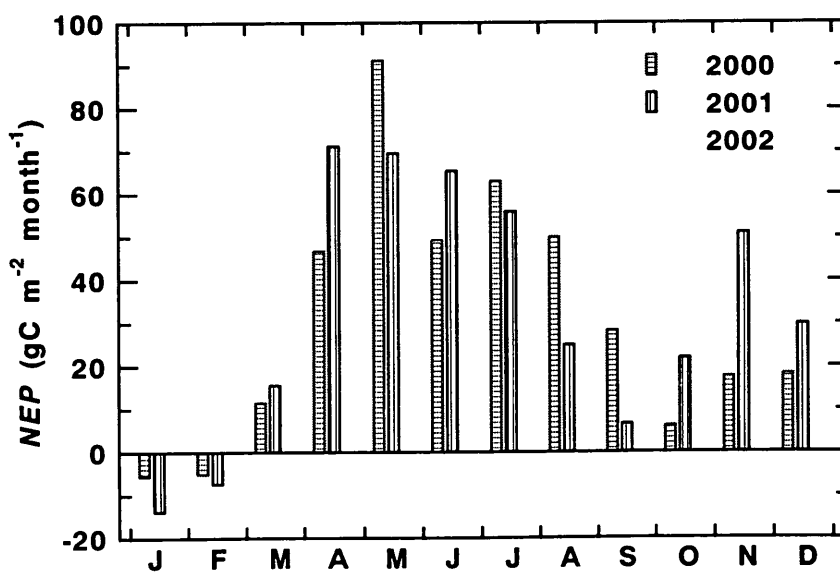


図24 年別、月別の生態系純生産量(NEP=-NEE)

の、樹冠は1年を通じて葉をつけており、NEEは気温や日射量など、気象要因の変動を直に反映する。気温が高い時期（生態系呼吸量の多い時期）にどの程度の日射量が得られるか、冬季の気温がどの程度で推移し、休眠期間がどの程度の長さになるか、これらが年間のCO₂吸収量に大きく影響することが分かった。また、常緑針葉樹のアカツ林は、同様な環境条件下の落葉広葉樹林より休眠期間が短いことが推察され、月単位で見た場合、気象条件によっては冬季でもCO₂を吸収することが分かった。CO₂吸収量のピークは4月～5月に現れ、気温が低く呼吸量が少ない4月上旬から6月上旬に大きなCO₂吸収量(負のNEE)が観測された。CO₂吸収量は5月中・下旬に約15gCO₂ m⁻²d⁻¹に達し、それ以降、気温の上昇による生態系呼吸量の増加に影響され、変動を伴いながら秋に向かって減少した。この間、気温は比較的緩やかに変化しているのに対して日射量の変動は大きく、NEEの大きな変動は主に日射量の変化によるものと考えられた。

顕熱、潜熱フラックスは、量、変化パターンとも両年で大きく異なった。原因の一つに両年の降水量と降水パターンの違いが有ると思われるが、詳細は今後検討を加えたい。

イ. 土壌呼吸量

測定された深さ5cmの地温と土壌呼吸速度（フラックス）との関係を、2000年～2002年について示すと図25のようになった。深さ5cmの地温と土壌呼吸速度（フラックス）の間には明確な相関関係があり、温度の増加に伴って指数関数的に土壌呼吸速度は上昇した。ただし、年によって相関関係は変化しており、特に2001年は温度に対して呼吸量の増加速度が大きかった。図25の関係から月毎に積算した結果が図26である。測定を行った3年間はいずれも夏に土壌呼吸量は最大となり、特に2001年の夏は土壌呼吸量が大きく、最大のフラックスは8月で1.3tonC ha⁻¹ month⁻¹に達した。12～3月の冬の間は0.1tonC ha⁻¹ month⁻¹以下であった。2000年と2001年における年間のフラックス積算値はそれぞれ4.03tonC ha⁻¹、4.66 tonC ha⁻¹と推定された。

ウ. 生態系調査結果と森林の成長量

種組成調査の結果、永久コドラート内には2000

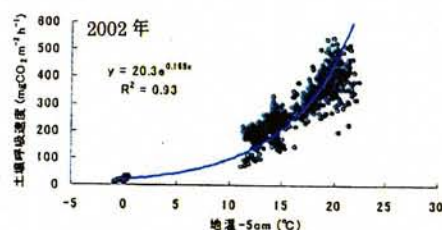
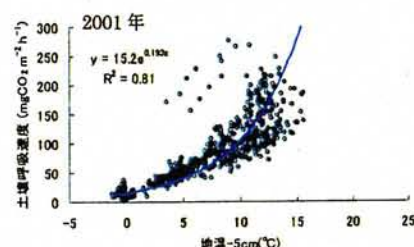
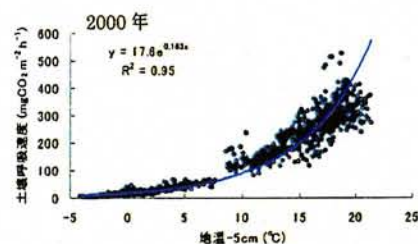


図25 地温(深さ5cm)とAOCC法により測定された土壌呼吸速度

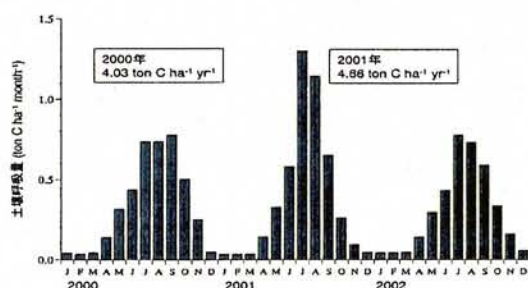


図26 月別に積算した土壌呼吸量の変化

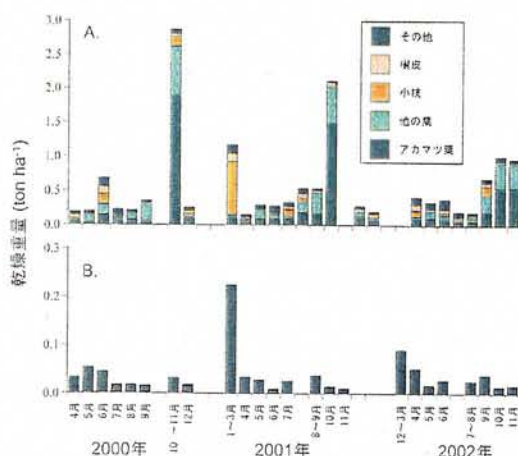


図27 剣丸尾アカマツ林におけるリタートラップ(A)と枝トラップ(B)の年変動

年4月の時点で51種の樹木が存在し、樹高1.3m以上の幹数密度は7595本 ha^{-1} であった（表4）。全個体の胸高断面積合計（樹高1.3mの位置での幹の断面積の合計値）は53.89 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ で、最大直径はアカマツの47.9cmであった。常緑高木の樹種はすべて針葉樹で、アカマツ・ツガ・モミ・ウラジロモミの4種が存在した。また、常緑亜高木のソヨゴ・ネズの2種をのぞく亜高木・低木種はすべて落葉樹であった。優占種はアカマツ1種で、RBA（胸高断面積合計の相対値）が79.71%と、圧倒的な量であった。幹数が最も多いのは、RBAがアカマツについて大きいソヨゴで、1536本（0.89 ha^{-1} ）が存在した。

図27に2000年から2002年までの3年間の剣丸尾アカマツ林でのリタートラップと枝トラップによる枯死・脱落量の季節変化を示した。アカマツ・ソヨゴを中心とする常緑針広混交林であるが、落葉季は秋で、リターフォールのほとんどが10、11月に集中した。枝トラップによる太い枝の枯死・脱落量は明確な季節変化を持たず、リター量に比べて通常はわずかな量であった。

しかし、2001年1～3月までの冬

季に多量の枝が落ちた。この冬は記録的な大雪で、雪による重みで多くの枝が落下したと考えられる。1年間での林冠からの枯死・脱落量は、2000年4月から2001年3月の期間で6.58 ton d.w. ha^{-1} 、2001年4月から2002年3月までの期間で4.94 ton d.w. ha^{-1} であった。この差は主に枝の脱落量の差であった。リターフォールは年変動が大きく、5年以上継続して調査しないと正確な値は把握できない。特に、枝トラップによる大型の枝は、降雪や台風などの攪乱によって間欠的に生じ、大幅に増減することが考えられ、今後も継続した調査が必要となる。

2000年4月から2002年4月までの2年間における永久コドラート内の群落変化を表4にまとめた。2000年4月の段階では直径5cm以上の幹数は2236本であった。このうち、アカマツは819本であった

表4 剣丸尾アカマツ林の永久コドラート内における種組成と優占度

種	胸高断面積合計		胸高直径(DBH)		幹数				
	($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)	(%)	平均	最大	(0.89 ha^{-1})	(%)	DBH<5	DBH≥5	(ha^{-1})
高木種									
常緑高木									
1 アカマツ	42.96	79.71	23.5	47.9	819	12.01	0	819	912.4
2 ツガ	0.12	0.23	10.0	27.3	6	0.09	4	2	6.7
3 モミ	0.07	0.13	10.0	28.0	3	0.04	2	1	3.4
4 ウラジロモミ	0.01	0.01	3.8	8.9	3	0.04	2	1	3.4
落葉高木									
5 コナラ	1.01	1.87	8.6	24.2	122	1.80	30	92	137.1
6 ミズナラ	0.57	1.06	6.4	20.2	122	1.80	46	76	137.1
7 クマシデ	0.42	0.79	4.9	22.4	146	2.16	79	67	164.0
8 ミヤマザクラ	0.39	0.73	9.6	23.9	39	0.58	2	37	43.8
9 ミズメ	0.24	0.44	18.3	38.9	6	0.09	0	6	6.7
10 シナノキ	0.12	0.22	6.0	16.1	28	0.41	10	18	31.5
11 シラカンバ	0.10	0.19	14.2	21.8	5	0.07	0	5	5.6
12 カヤマツ	0.10	0.18	23.0	27.3	2	0.03	0	2	2.2
13 クヌギ	0.06	0.12	11.5	17.2	5	0.07	0	5	5.6
14 ケヤマハンノキ	0.02	0.05	16.8	16.8	1	0.01	0	1	1.1
15 コハクチョウカエデ	0.02	0.04	14.6	14.6	1	0.01	0	1	1.1
16 ミズナラ	0.02	0.03	6.8	9.0	4	0.06	1	3	4.5
17 シンアブラ	0.01	0.02	11.1	11.1	1	0.01	0	1	1.1
18 イロハモミジ	0.01	0.02	10.3	10.3	1	0.01	0	1	1.1
19 ヤマナラシ	0.01	0.01	9.3	9.3	1	0.01	0	1	1.1
20 イヌエンジュ	0.01	0.01	6.3	8.0	2	0.03	1	1	2.2
21 イタヤカエデ	0.01	0.01	4.4	8.3	2	0.03	1	1	2.2
小計	46.26	85.84	17.3	47.9	1319	19.41	178	1141	1473.9
亜高木種									
常緑亜高木									
22 ソヨゴ	3.70	6.87	4.8	16.7	1536	22.71	922	614	1724.7
23 ネズ	0.25	0.47	9.7	18.1	27	0.38	3	24	29.2
落葉亜高木									
24 ケシキ	0.91	1.70	3.1	10.4	876	12.96	779	97	984.3
25 リウウブ	0.62	1.16	4.6	9.4	306	4.53	198	108	343.8
26 マルハアオダモ	0.40	0.74	3.4	8.5	334	4.94	289	45	375.3
27 ヒロハツリハナ	0.26	0.48	2.9	9.1	221	3.27	175	46	248.3
28 ウリカエデ	0.26	0.48	6.5	13.4	60	0.89	15	45	67.4
29 アズキナシ	0.14	0.26	5.6	11.4	42	0.62	15	27	47.2
30 アオダモ	0.11	0.21	5.2	10.0	39	0.58	16	23	43.8
31 シンツバキ	0.08	0.15	3.0	6.4	82	1.21	70	12	92.1
32 ヤマウルシ	0.07	0.13	3.9	6.8	46	0.68	37	9	51.7
33 マダガウラ	0.05	0.09	3.6	12.9	28	0.41	23	5	31.5
34 スミ	0.01	0.01	5.4	6.0	2	0.03	1	1	2.2
35 ヤマトアオダモ	0.00	0.01	5.6	5.6	1	0.01	0	1	1.1
小計	6.89	12.79	4.1	18.1	3600	53.22	2543	1057	4042.6
低木種									
落葉低木									
36 ミツバツツジ	0.26	0.48	1.8	4.3	788	11.66	788	0	885.4
37 ナツハゼ	0.18	0.32	1.8	4.6	512	7.57	512	0	575.3
38 リウウキ	0.16	0.29	3.8	7.4	103	1.52	76	27	115.7
39 アセビ	0.05	0.10	3.3	8.1	39	0.58	31	8	43.8
40 ツバキ	0.04	0.08	1.4	2.8	203	3.00	203	0	228.1
41 ミヤマモミ	0.02	0.04	1.8	3.7	64	0.95	64	0	71.9
42 ツリハナ	0.01	0.02	1.8	5.1	27	0.40	26	1	30.3
43 ナンキンナナカマド	0.01	0.01	1.5	3.8	24	0.36	24	0	27.0
44 ウツギ	0.00	0.01	1.4	2.4	22	0.33	22	0	24.7
45 ツバハミ	0.00	0.01	1.6	2.9	15	0.22	15	0	16.9
46 スズキ	0.00	0.01	1.3	2.4	21	0.31	21	0	23.6
47 オトコウゾメ	0.00	0.00	1.2	2.0	15	0.22	15	0	16.9
48 コマユシ	0.00	0.00	2.3	2.5	3	0.04	3	0	3.4
49 ハナイカダ	0.00	0.00	1.0	1.0	11	0.16	11	0	12.4
50 バイカウツギ	0.00	0.00	3.2	3.2	1	0.01	1	0	1.1
51 ヤブムラサキ	0.00	0.00	1.3	1.8	2	0.03	2	0	2.2
小計	0.74	1.37	1.9	8.1	1850	27.37	1814	36	2078.7
合計	53.89	100.00	6.1	47.9	6769	100.00	4535	2234	7595.2

が、1年後には806本、さらに1年後の2002年4月には799本となった。アカマツは直径5cm以下の個体は全く存在せず、毎年10本程度の個体が枯れて、個体数は減少傾向にある。アカマツ以外の高木種は、立ち枯れと5cm以下からの新規加入個体がほぼ同数で、個体数はほとんど変化していない。直径5cm以上の亜高木・低木種は個体数が多く、立ち枯れ木の本数より5cm以下からの新規加入個体数が多く、2000年4月の1095本から2002年4月には1149本に増加した。

森林全体の現存量の85%以上をアカマツが占めていた。森林の現存量はアカマツおよびその他の樹種ともに増加傾向にある。2000年4月からの1年間で3.06 ton d.w. ha⁻¹、次の1年間で2.40 ton d.w. ha⁻¹増加し、2002年4月には253.12 ton d.w. ha⁻¹となった。また、立ち枯れ木は2000年は24本、2001年は15本あり、その重量は1.18 ton d.w. ha⁻¹、0.77 ton d.w. ha⁻¹と換算された。

エ. 積み上げ法によるANPPの推定およびNEPの推定

表5に示した一年間の森林の現存量変化量と立ち枯れ木の年間量、図27に示したリターフォールによる枯死・脱落量の1年間での集計量から、本調査地の2年間のNPPを計算することができる(表6)。

ANPP (純一次生産量)

= 森林全体での成長量 + 枯死・脱落量

= 3.06 + (1.18 + 6.58)

= 10.82 ton d.w. ha⁻¹ yr⁻¹ : (2000年);

= 2.40 + (0.77 + 4.94)

= 8.11 ton d.w. ha⁻¹ yr⁻¹ : (2001年)

2000年と2001年の純一次生産量を比較すると、2000年の方が2トン以上大きくなった。これは、現存増加量が2000年の方が0.66トンほど大きく、樹木成長が2000年の方が大きかったこと、また、枯死・脱落量については葉の量は両年であまり変わらないが、それ以外の枝・樹皮の量が2000年

表5 剣丸尾アカマツ林・永久コドラート内の3年間の群落動態

	2000年4月		2001年4月		2002年4月	
	枯死	新規加入	枯死	新規加入	枯死	新規加入
幹数密度 (0.89 ha ⁻¹ , DBH ≥ 5cm)						
アカマツ	819	13	0	806	7	0
その他の高木種	322	2	3	323	4	2
亜高木・低木種	1095	9	41	1127	4	26
合計	2236	24	44	2256	15	28
現存量 (ton ha ⁻¹ , DBH ≥ 5cm, 新規加入個体は除く)						
アカマツ						
葉	2.75	-	2.75	-	2.75	-
枝	9.77	0.06	9.82	0.04	9.86	0.04
幹	152.82	0.73	154.52	0.47	155.77	0.47
根	50.90	0.23	51.52	0.15	51.97	0.15
小計	216.25	1.02	218.61	0.67	220.36	0.67
その他の高木種	17.66	0.06	17.96	0.08	18.21	0.08
亜高木・低木種	13.76	0.09	14.15	0.03	14.55	0.03
合計	247.66	1.18	250.72	0.77	253.12	0.77

表6 剣丸尾アカマツ林における樹木の一次生産量の年変動

	2000年	2001年
現存量増加量 (t d.w. ha ⁻¹ yr ⁻¹)	3.06	2.40
立枯れ木 (t d.w. ha ⁻¹ yr ⁻¹)	1.18	0.77
枯死・脱落量 (t d.w. ha ⁻¹ yr ⁻¹)		
アカマツ葉	2.52	2.35
その他の葉	1.39	1.28
細枝	1.18	0.30
樹皮他	1.04	0.77
太枝(枝トラップ量)	0.45	0.24
枯死量合計	6.58	4.94
純一次生産量 (t d.w. ha ⁻¹ yr ⁻¹)	10.82	8.11

表7 2年間の剣丸尾アカマツ林の生態系純生産

	2000年	2001年
純一次生産量 (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)	5.41	4.06
年間土壌呼吸量 (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)	4.03	4.66
根の呼吸量 (土壌呼吸の46%)	1.85	2.14
土壌微生物の呼吸量	2.18	2.52
年間の生態系純生産量	3.23	1.54

の方が大きかったことの両方に起因している。このように純一次生産量は同じ森林でも年によりかなり変動することが明らかになった。

森林生態系の実質的な二酸化炭素吸収能力を示す生態系純生産量（NEP）は、以下の式によって表せる。

$$\text{NEP} = \text{森林の純一次生産量 (NPP)} - (\text{土壌呼吸量} - \text{根の呼吸量})$$

$$\text{土壌呼吸量} - \text{根の呼吸量} = \text{微生物の呼吸量}$$

現在までの剣丸尾アカマツ林において2000年と2001年の樹木による純一次生産量とAOCC法による年間の土壌呼吸量の推定を行った（表7）。表7に示した純一次生産量は乾燥重量ベースで計算した。植物体中の炭素含有量を仮に50%とすると、炭素ベースでは2000年、2001年それぞれ 5.41tonC ha^{-1} 、 4.06tonC ha^{-1} となった。年間の土壌呼吸量は2000年、2001年それぞれ 4.03tonC ha^{-1} 、 4.66tonC ha^{-1} となった。根の呼吸量については、過去の文献の単純な平均値である土壌呼吸量の46%を採用すると、2000年、2001年それぞれ 1.85tonC ha^{-1} 、 2.14tonC ha^{-1} と計算された。この結果から、1年間の生態系純生産量を計算すると、2000年、2001年それぞれ 3.23tonC ha^{-1} 、 1.54tonC ha^{-1} と推定された。

ANPPの推定で問題になるのは、一つは枝の枯死・脱落量である。枝の枯死する時期と脱落する時期が異なり、枝の脱落は降雪や風雨といった偶然的な要因に左右されるため、長期的な継続調査によって年間の平均値を推定する必要がある。分解能の高いタワーフラックスデータとの比較には、従来の積み上げ法によるANPPの推定ではなく、実質的な1年間の炭素蓄積量の推定方法を検討する必要がある。ANPP推定時のもう一つの問題点は、地下部の生産量推定における細根の推定である。掘り取り調査によって推定できる地下部は主に主根となる太い根だけである。細根のバイオマスは主根に比べて非常に少ないが、ターンオーバーは主根の10倍以上になる場合もあり、1年間の値の生産量としては細根の成長量は重要であり、測定法を含めて今後検討していく必要がある。

2000年は2001年よりANPPが大きく土壌呼吸量は小さかったため、NEPはそれぞれ 3.23tonC ha^{-1} 、 1.54tonC ha^{-1} と、両者の間には大きな差がみられた。2001年には夏季の土壌呼吸量が非常に大きかった。2001年は2000年に比べて温度上昇に対する土壌呼吸速度の増加率が高かった。また、2001年の夏季地温は2000年よりもわずかに高かったことが原因と考えられる。ただし、2001年はAOCC法のトラブルによって夏の最盛期の土壌呼吸のデータを測定していないので、データ回帰上の問題を考慮する必要がある。植物の純一次生産量は、2000年より2001年の方がかなり小さかった。降雪量の多かった2000年に枝の脱落量が大きくなったことと、樹木成長量が大きかったことによる。2000年の方が光合成の最盛期である8月と9月の日射時間および日射量がやや多くなったことは樹木成長量に影響を与えている可能性があり、NEP変動要因の解明にはアカマツの光合成速度などの生理的なデータが必要である。

④ 本研究により得られた成果

タワーフラックスの通年観測を継続実施し、土壌呼吸量の自動連続測定、生態系の成長量調査を行った。タワーフラックス観測からは、2000年～2002年のデータについて、年間のNEEの値とその季節内変動が解析され、森林微気象、各種フラックスデータがデータベース化された。森林群落内の炭素収支要素のうち、土壌呼吸量に関するデータが整理された。また、生態学的な成長

量調査結果から、積み上げ法による年間の純一次生産量が解析された。生態系の炭素収支パーティショニングのために使用可能なデータが蓄積された。これらから、森林群落（あるいはその構成要素）の炭素収支量、および季節変動、年々変動の大きさが示され、その要因が明らかとなった。さらに、モニタリングサイトとして必要な、森林生態系に関する基礎情報が記述された。観測で蓄積されたデータは、生態系炭素収支に関するモデルの構築や、モデル検証のためのデータとして活用可能で、次期プロジェクト「S1統合的炭素収支」にも提供される。

⑤ 引用文献

- 3) 大塚俊之・後藤徹寛・杉田幹夫・中島崇文・池田仁 (2003): 富士北麓剣丸尾溶岩流上のアカマツ林の起源, 植生学会誌 (投稿中)
- 4) JIBP Synthesis Vol.16 (1977): Primary productivity of Japanese forests –productivity of terrestrial communities-, Shidei T. and Kira, T. Ed., University of Tokyo Press
- 5) Aubinet, M., Grelle, A., Ibrom, A., Rannik, U., Moncrieff, J., Foken, T., Kowalski, A. S., Martin, P. H., Berbigier, P., Bernhofer, Ch., Clement, R., Elbers, J., Granier, A., Grunwald, T., Morgenstern, K., Pilegaard, K., Rebmann, C., Snijders, W., Valentini, R., and Vesala, T. (2000): Estimation of the annual net carbon and water exchange of European forests: the EUROFLUX methodology, Adv. Ecol. Res., 30, 113-175

(3) 桐生試験地ヒノキ樹林サイト

① 研究の目的

滋賀県南部に位置する桐生水文試験地(34.96°N、135.99°E)に設けられた微気象観測塔においてフラックス観測を行っている(図28)。観測塔周辺はヒノキ(*Chamaecyparis Obtusa*)の閉鎖した樹冠をもつ森林で覆われている。本研究の目的は針葉樹林において、CO₂、熱、水蒸気がいかに大気と植生の間で交換されるかを微気象的な手法を用いて量的に把握することである。そこで比較的保守が容易で長期観測に適しているREA法を用いて、CO₂フラックス測定を行い、季節変化などの特性を評価する。

② 観測サイトの測定状況

ア. 観測サイトの位置図、植生状況の概要

観測は滋賀県南部に位置する桐生水文試験地(34.96°N、135.99°E)に設けられた微気象観測塔において行っている。桐生水文試験地の1997年から2001年までの年間平均気温、年間平均降水量、年間流出量はそれぞれ14.0℃、1633.4mm、850.6mmである。微気象観測塔周辺はヒノキ(*Chamaecyparis Obtusa*)の閉鎖した樹冠をもつ森林で覆われている。タワー周辺のヒノキの葉面積指数は4.91(2000.10)程度、樹高は約18mである。傾斜は北に向かって約10度である。

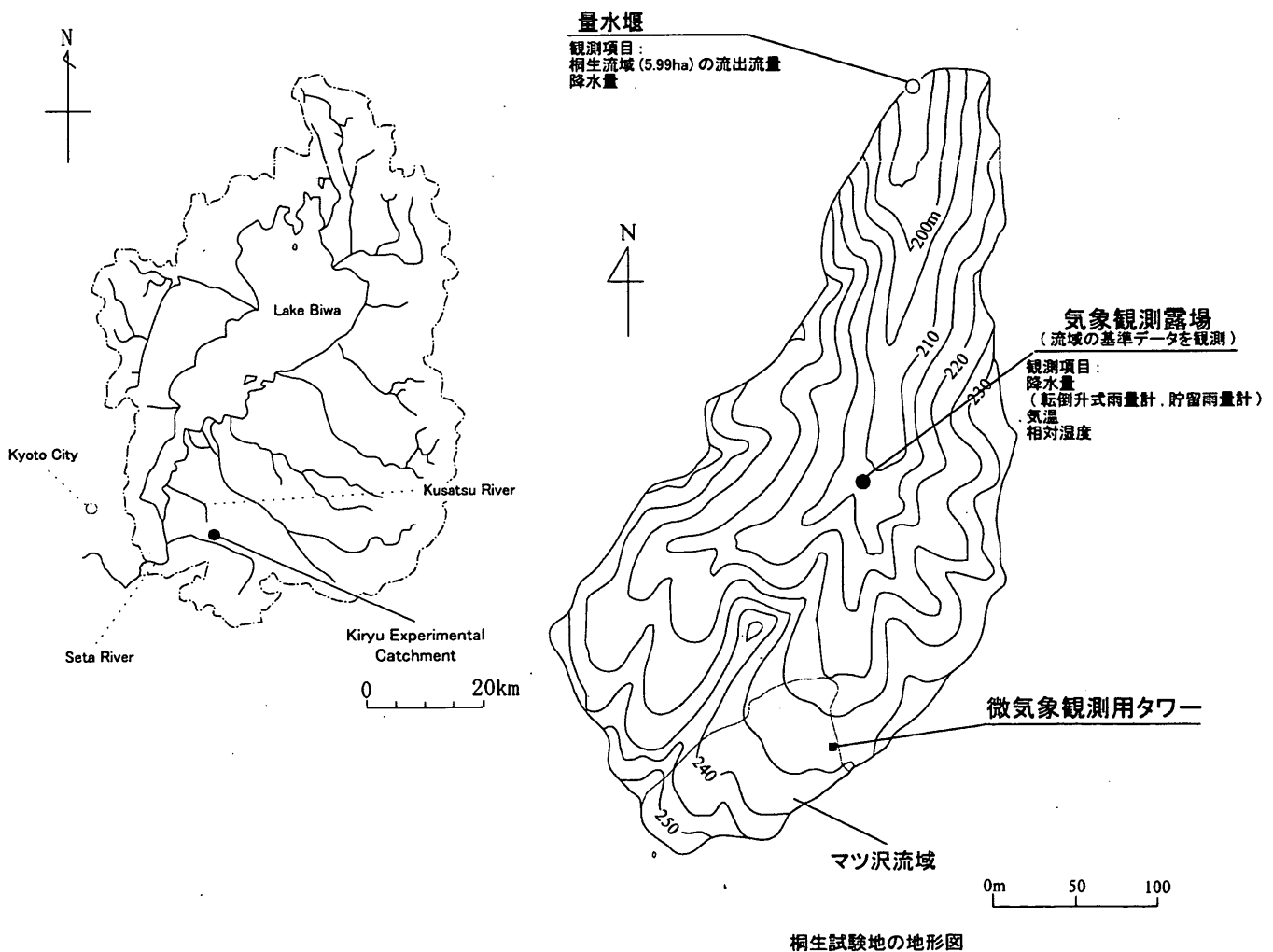
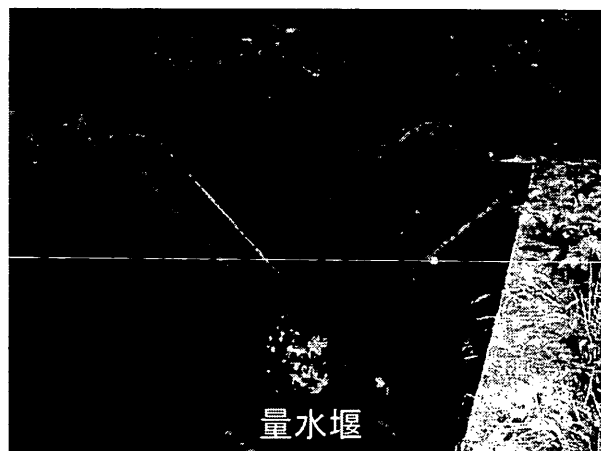
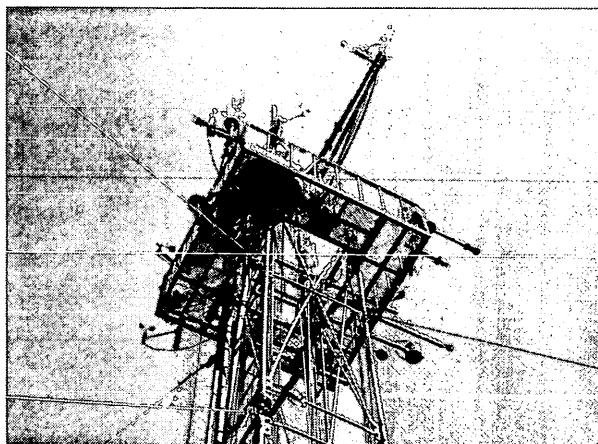


図 28 観測地の概要

イ. 測定項目・測定手法の概要

樹冠上フラックス測定は、微気象観測塔上の高度 28.0m において行っている。

渦相関法によるフラックス算定のための測定には、三次元超音波風速温度計 (KAIJO, DAT-310 ないし DAT-600) と、クローズドパス式の赤外線ガスアナライザー (LI-COR, LI-6262 ないし LI-7000) を用いている。また 2002 年 5 月からオープンパス式ガスアナライザー (LI-COR, LI-7500) による測定を追加している。変動成分の測定は 10Hz で行っている。また、同時に樹冠内外において雨量、気温、湿度、放射各成分、風速、地中貯熱変化量、二酸化炭素濃度、土壌水分などの環境条件の連続観測、個葉ガス交換特性、遮断過程および葉の濡れの分布、群落構造、土壌呼吸速度などの集中観測を行っている。



また、本試験地では REA 法（渦集積法）による CO_2 フラックス観測を併行しており、同手法による NEE 長期見積もりや、渦相関法による測定結果との比較解析を行っている（図 29）。長期フラックス測定用の 1 次元超音波風速計と REA サンプリング装置への空気を取り込み口は観測塔の高さ 29m に設置した。1 次元超音波風速計の直ぐ近くには温度変動測定用の直径 $50\mu\text{m}$ の細線熱電対を設置し、各フラックスの値を 1 時間に 1 回の頻度で記録している。

ウ. 解析項目・解析手法の概要

乱流変動法によるフラックス算出のための平均化時間は 15 分および 30 分の両方を用いている。クローズドパス方式で測定した水蒸気および二酸化炭素の濃度変動についてはタイムラグの補正を行い、風向については風速の水平成分と鉛直成分からなる平面において座標系を回転し時間平均の吹き上げ角が 0 になるよう補正を施した。また、実際の地形を考慮した座標回転を施した場合の計算も行っているが、NEE 等の値にはほとんど違いはみられないので、ここでは上述の回転による計算結果のみを示す。クローズドパスのスペクトル減衰補正済みデータは現在解析中のため下記の図は補正前のデータを掲載している。オープンパス方式については WPL 補正を行っている。

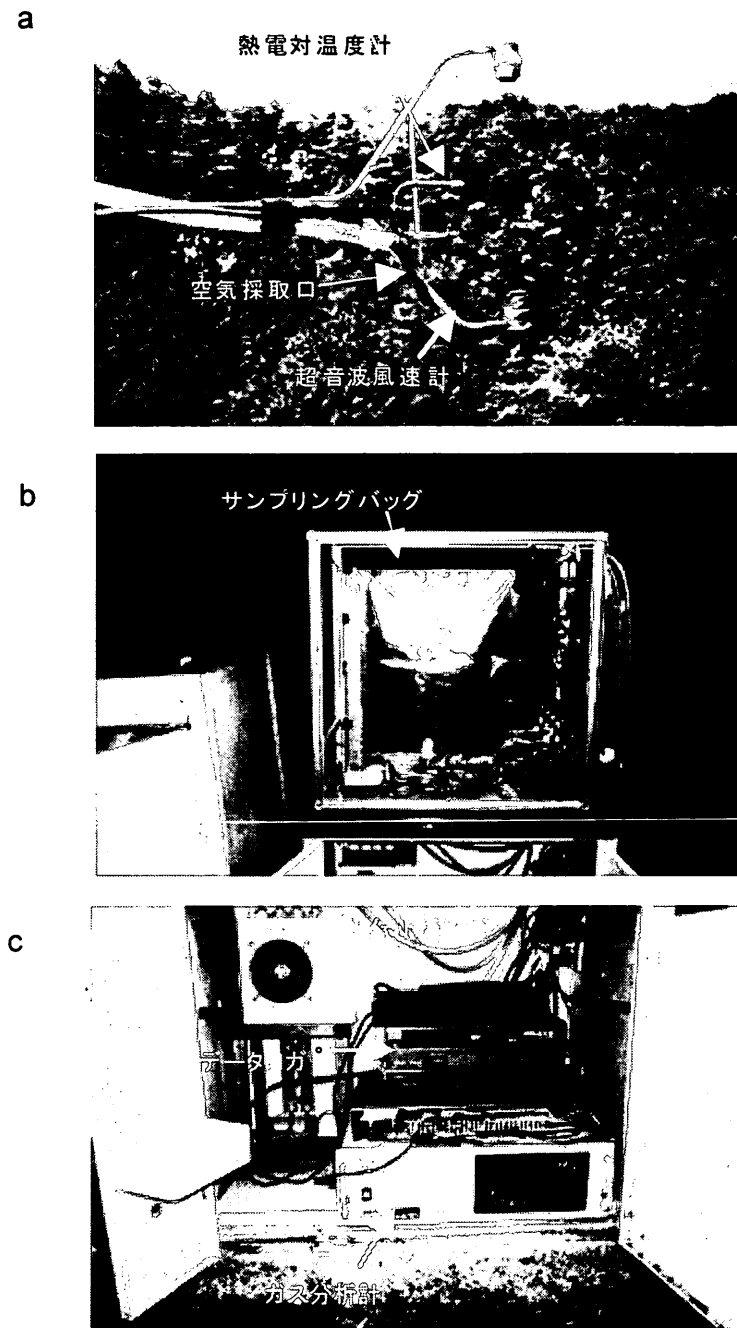


図 29 REA法のセンサー部(a), サンプリング部(b), 記録部(c)
 REA 法によるフラックス算出のための平均化時間は1時間とした。REA 法においては、フラックスは $F_c = b\sigma_w(C^+ - C^-)$ の様に表わされる。ここで、 σ_w は風速鉛直成分の標準偏差、また C^+ 、 C^- は気流が上を向いているときと下を向いているときのそれぞれの濃度の平均である。なお、REA 法においても密度変動補正が必要になる可能性があり、今後検討していかねばならない課題となっている。

③ 解析結果

ここでは、①NEE、H、IE 等の日平均値の季節・年内変動、②NEE、呼吸一気温、APAR の関係、③年間積算 NEE 計算値についての解析結果、④植生活動期晴天日の時間変化（日内変化）の代表的観測事例を中心に示す。

図 30 は 2001 年 1 月 1 日～12 月 31 日における、渦相関法による H, IE, NEE の日平均値の季節変動を示している。また、図 31 は REA 法と渦相関法との同時測定による比較結果の一例、図 32 は REA 法による H, IE, NEE の日平均値の季節変動を示している。潜熱フラックスの季節変動は飽差の変動と連動して夏期にピークを持ち、また顕熱フラックスはエネルギー収支を補完するかたちで春にピークを持つ季節変動となった。二酸化炭素吸収のピークは 6 月の晴天日にみられ、晩夏には吸収量は低下した。渦相関法による年間積算 NEE 計算値は、2001 年 1 月 1 日～12 月 31 日の期間で $6.67\text{tC ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ （夜間の放出量等補正なし）と算定された。また REA 法による年間積算 NEE 計算値は、2002 年 3 月 1 日～2003 年 2 月 28 日の一年間で $5.13\text{tC ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ と算出された。渦相関法による年間積算 NEE 積算に際しては、欠測時を年間の平均値で補完する手法（Falge et al. 2001）⁶⁾を用いている。また REA 法での年間積算 NEE 算出に際しては、欠測時、雨量データが降水を示すとき、および REA の ΔC （上向きと下向きの差）が旬平均の 10 倍を越えるときは異常値として除外し、日射量と気温による補完を行っている。補間に用いた式と係数を表 8 に示す。本試験地では、従来から多く行われているように森林樹冠上フラックスを APAR や気温との単相関をみることによって解析するのではなく、群落構造や個葉のガス交換特性、乱流拡散現象などを考慮した多層モデルを用いた解析を試みている。

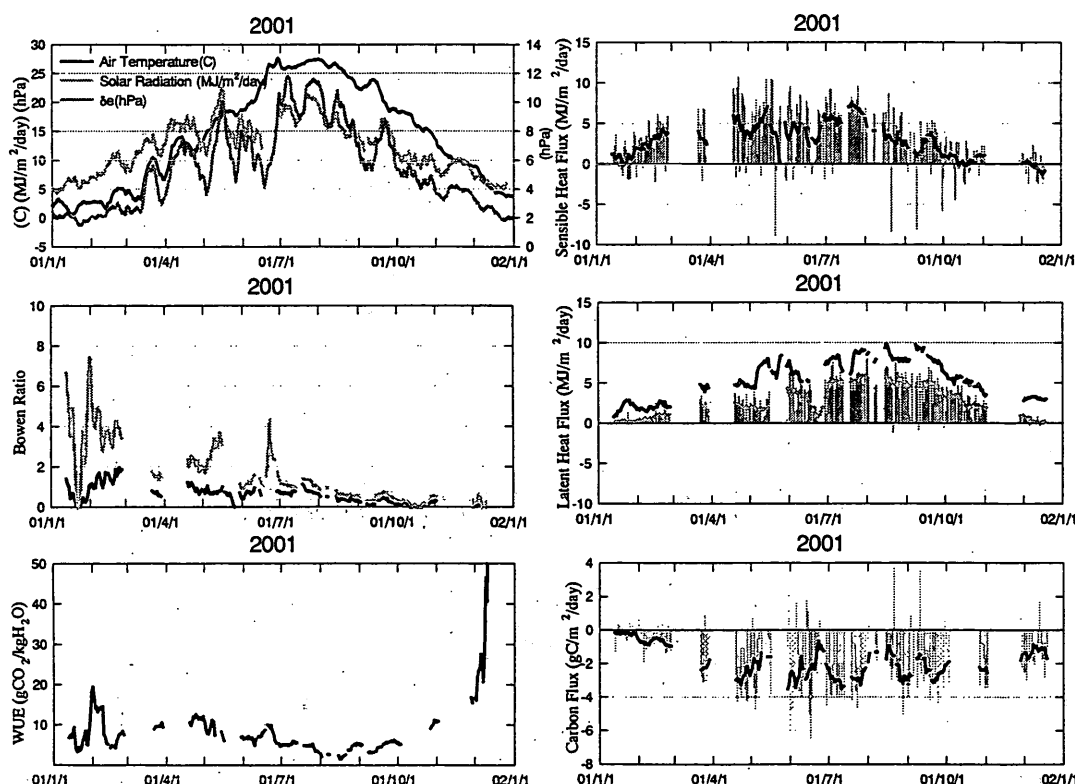


図 30 タワー上 29m における気温、日射、大気水蒸気圧および渦相関法による顕熱、潜熱、 CO_2 フラックス、ボーエン比、水利用効率の日平均値の季節変化（2001 年 1 月 1 日～12 月 31 日）

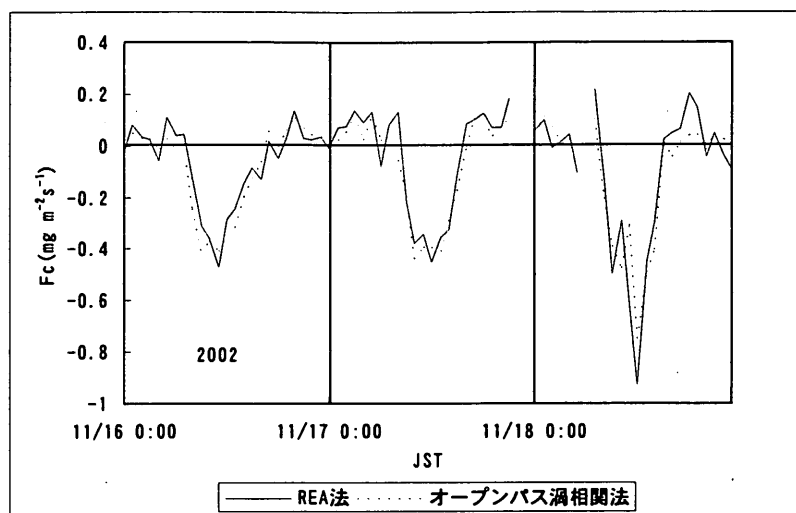


図 31 オープンパス渦相関法と REA 法による CO₂ フラックスの比較例

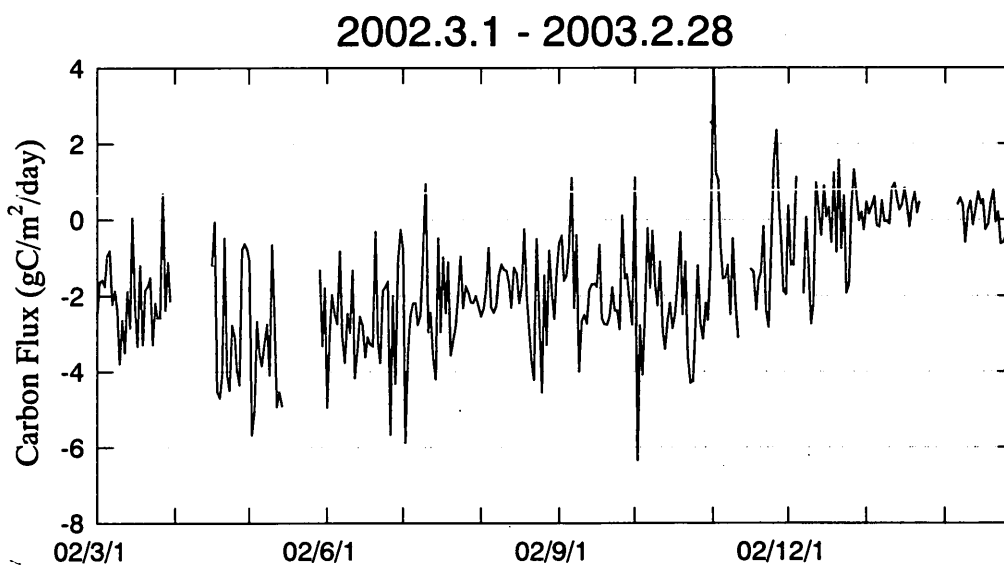


図 32 REA 法による CO₂ フラックス日積算値の季節変動(2001/3/1～2002/2/28)

図 33 は多層モデルの概要、図 34 は渦相関法による観測値と多層モデルによる推定値との比較である。土壌呼吸・温度の関係および葉呼吸・温度の関係、および個葉ガス交換モデルを含む多層モデルによる見積もりと較べると、乱流フラックス観測値は夜間の放出がかなり小さく、渦相関法による NEE が過大評価である可能性を示唆する結果となっている(図 34 の計算結果では 2001 年 1 月 1 日～12 月 31 日で $3.82\text{tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)。この点を明らかにするため、土壌呼吸や葉呼吸、個葉ガス交換特性の空間・時間的分布をより詳しく把握するための観測を継続中である。図 35 は夏期の各フラックスの日変化の事例であるが、高温による夜間放出量の増大、土壌乾燥による日中の光合成・蒸散抑制等が観測されている。

補間に用いた式

$$F_c = \frac{-F_{c_m}S}{S + F_{c_m}/a} + Re$$

F_c CO2フラックス (mg m⁻²s⁻¹)
 F_{cm} 最大純光合成量 (mg m⁻²s⁻¹)
 S 日射量 (W m⁻²)
 a 原点での傾き
 Re 呼吸量 (mg m⁻²s⁻¹)

$$R_e = R_0 Q_{10}^{[T/10]}$$

R₀ 0°Cでの呼吸量 (mg m⁻²s⁻¹)
 Q₁₀ 10°C気温が変化した時の変化率
 T 気温 (°C)

補間に用いた係数表

年・月	R ₀	Q ₁₀	F _{cm}	a
Mar-02	0.0194	2.175	0.443	0.00101
Apr-02	0.0194	2.183	0.775	0.00264
May-02	0.0178	2.337	1.039	0.00234
Jun-02	0.0359	1.320	0.852	0.00147
Jul-02	0.0787	1.286	0.862	0.00211
Aug-02	0.0404	1.503	0.895	0.00192
Sep-02	0.0071	3.727	0.756	0.00476
Oct-02	0.0507	1.343	0.827	0.00189
Nov-02	0.0924	1.098	0.414	0.00095
Dec-02	0.0615	1.069	0.287	0.00079
Jan-03	0.0328	1.310	0.210	0.00174
Feb-03	0.0265	1.127	0.276	0.00183

*注意事項

- ・REA法のデータは毎時0分から30分までのデータである。
- ・TまたはSが得られない時は補完は行わず欠測としている。
- ・呼吸量の推定曲線はU>2m/sについてのデータ

表 8 REA 法による年間積算 NEE 算出の際の、欠測データ補間方法

多層モデルの概要(サブモデルの相関と主な入力・出力項目)

入力環境変数:

植生面上の風速・気温・湿度・日射↓・長波放射↓・二酸化炭素濃度・雨量および暦データ

○群落構造モデル(出力)各層の葉面積密度、葉の傾斜角分布

↓

○放射伝達モデル(日射・PAR)(出力)各層の日射・PAR(直達散乱↓散乱↑)、日向日陰の葉の割合
 樹冠上散乱・直達日射推定モデル
 放射減衰モデル

↓

○乱流輸送クロージャーモデル(出力)各層の風速・温度・湿度・二酸化炭素

↓↑

○各層の顕熱・潜熱・二酸化炭素フラックス推定モデル(出力)顕熱・潜熱・二酸化炭素フラックス
 (=拡散方程式+熱収支式+長波放射伝達モデル) 各層の表面温度・長波放射(↓↑)

(乾いた葉)

(濡れた葉)

光合成モデル

樹冠遮断モデル

気孔コンダクタンスモデル

(地表面)

土壌呼吸モデル

土壌面蒸発モデル

図 33 多層モデルの概要

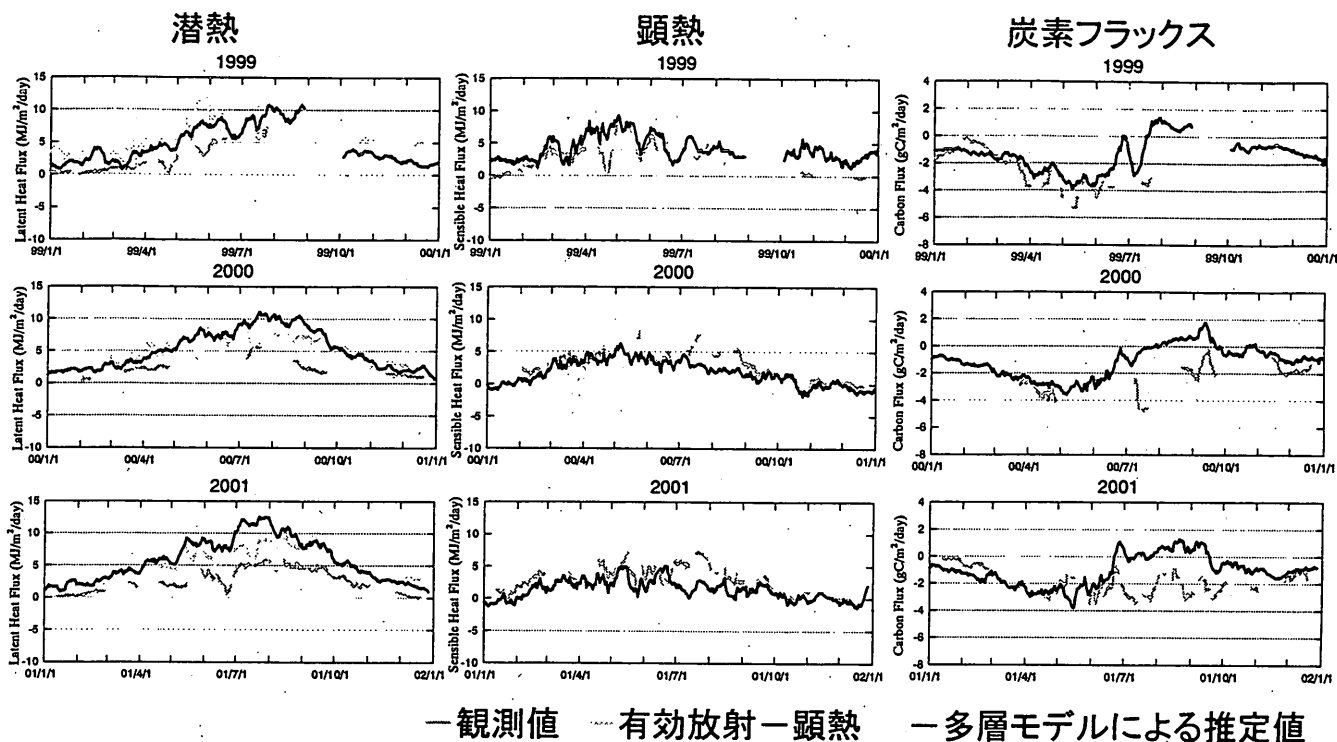


図 34 渦相関法による潜熱、顕熱、CO₂フラックス日積算値と多層モデルによる推定値との比較

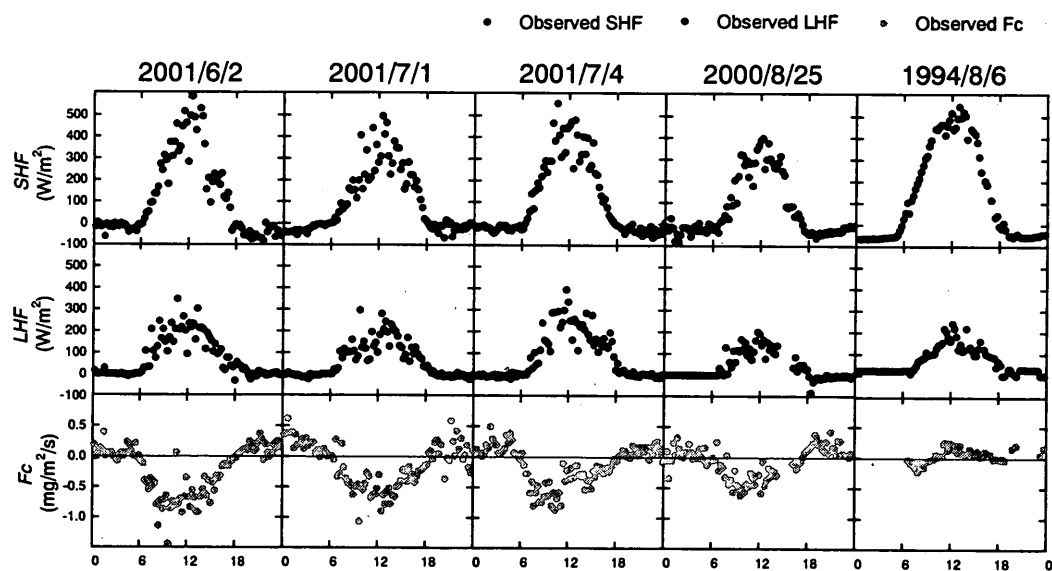


図 35 夏期の各フラックスの日変化の事例。高温による夜間放出量の増大、土壌乾燥による日中の光合成・蒸散抑制等が観測されている。

さらに、同試験地では、濡れセンサーによる樹冠内各高度での葉の濡れ乾き、ヒートパルス法による樹液流速、樹冠遮断量の測定等も行っている。乱流フラックス観測データと併せて、遮断蒸発から蒸散への移り変わりがどのように起こるのか、また樹冠各層での降雨中および降雨後の光合成活動について、多層モデルを用いた解析を行っている。図 36 は、降雨量、風速、気温、大気飽差、純放射量、潜熱フラックス、ヒートパルス速度、樹冠濡れ具合の日変化、および図 37 はその多層モデルによる再現計算の結果の一例である。

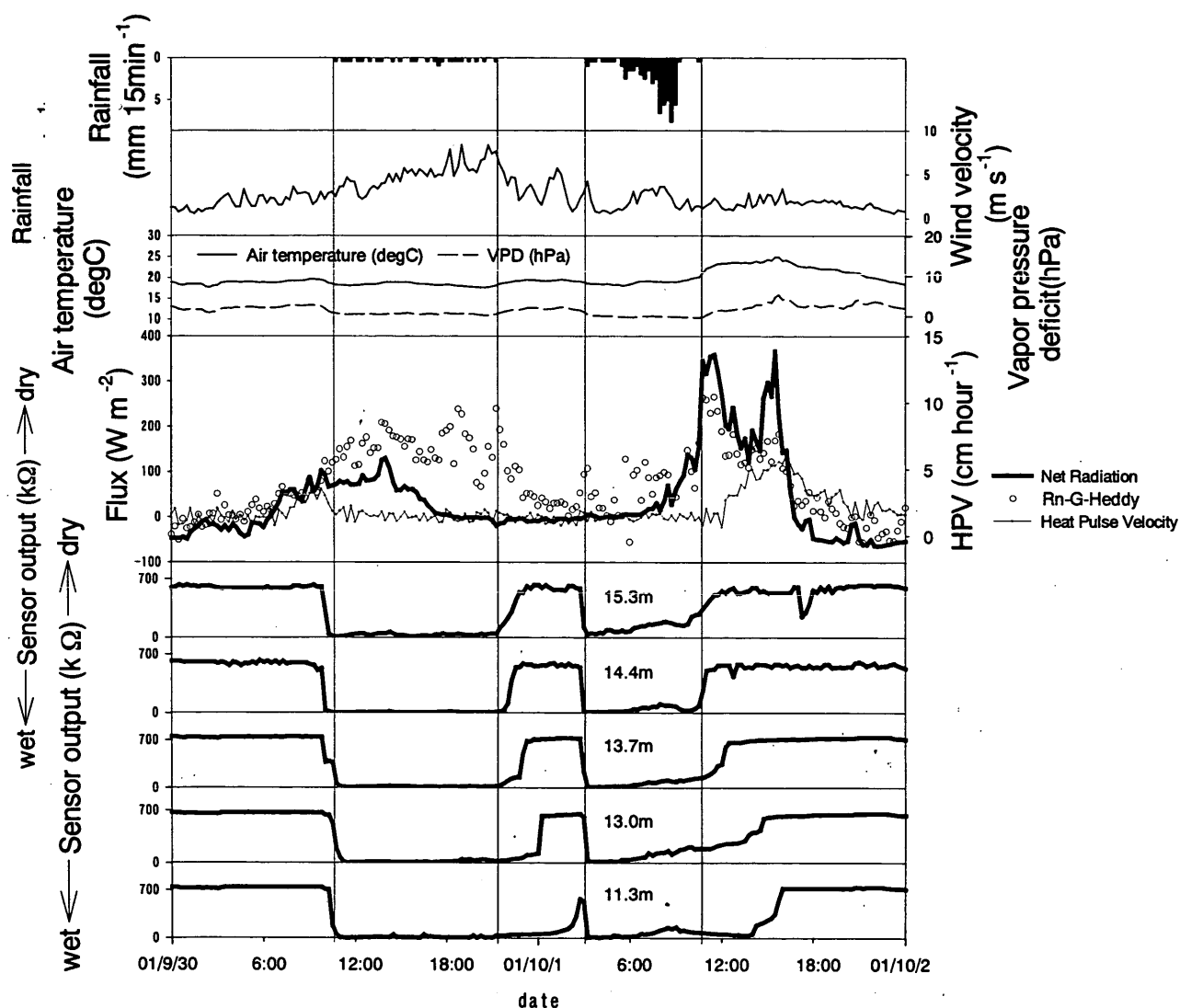


図 36 降雨量、風速、気温、大気飽差、純放射量、潜熱フラックス、ヒートパルス速度、樹冠濡れ具合の日変化

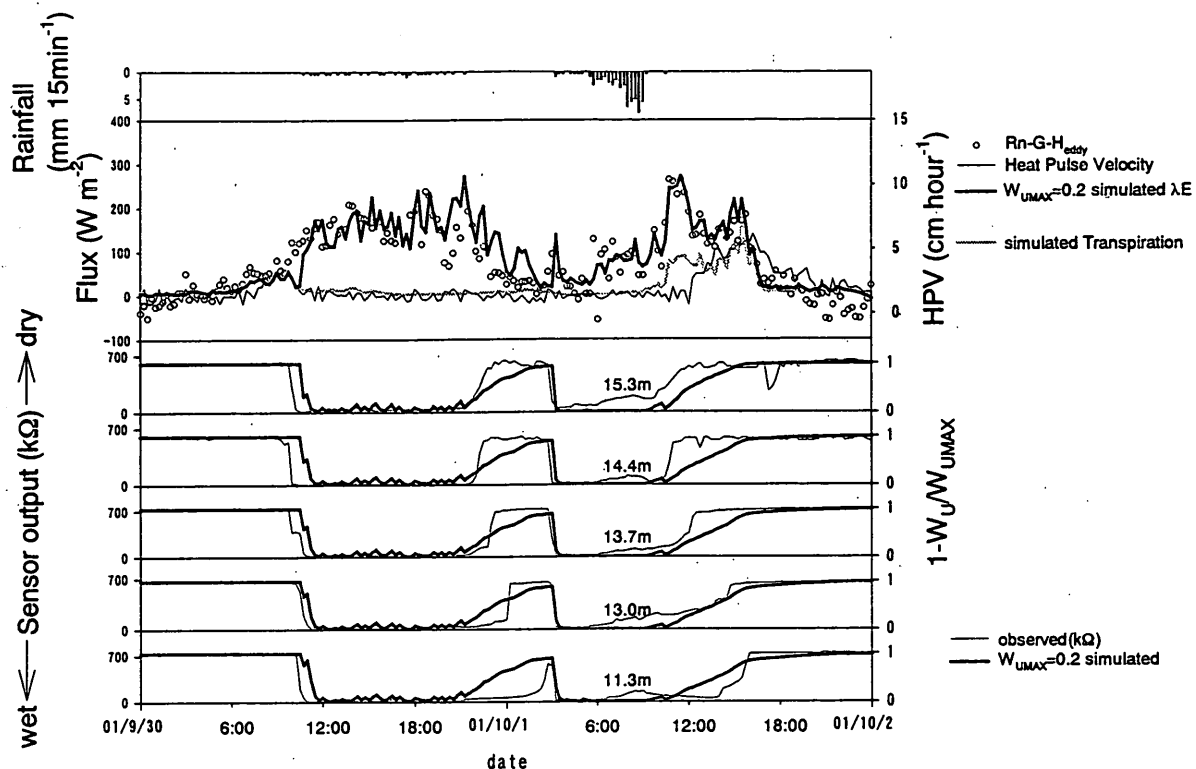


図 37 観測結果と多層モデルによる日変化の再現計算結果との比較

④ 考察

渦相関法による CO_2 フラックスは、夏期には呼吸量の増大に伴い夜間に二酸化炭素放出が大きくなる様子が観測された(図 35 参照)。冬から初夏にかけては温度の増大とともに吸収量が増大する。湿潤な夏期における昼間の吸収速度のピークは初夏と変わらない値を示したが、夜間の呼吸速度が大きくなるため、収支としての日積算炭素吸収量は減少した。潜熱フラックスの季節変動特性は概ね飽差の季節変動特性に従うが、乾燥時に飽差の増大から予測される程度に潜熱が増加しない期間もみられ、個葉の気孔開閉による調節が行われた結果、変動を生み出していると考えられた。

⑤ 引用文献

- 6) Falge, E. et al., 2001. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107, 43-69.

(4) 釧路湿原サイト

ユーラシア大陸の東部を含む北半球中・高緯度帯に広く分布する湿原は、大量の炭素を蓄積していることにより、地球規模での生態系炭素収支とともに、メタンの放出源として温室効果ガスの収支においても重要な役割を果たしている。1980年代以降、この緯度帯の湿原を対象に多くのCO₂、メタンのフラックスの観測が実施されたが、その大部分は冷帯から北極域の湿原を対象としており、観測期間も多くの場合、植物が成長する期間に限定されていた。温帯、冷温帯の湿原は専有面積は狭いものの、地球温暖化が進行した環境での湿原の炭素収支、温室効果ガス収支を予測するうえでは重要な生態系である。

① 研究目的

本研究では、北海道東部に位置し、国内最大の面積を占める釧路湿原を対象に、大気との間のCO₂、エネルギー収支を長期的に観測し、その特徴を明らかにすることを目的とする。低層湿原、高層湿原という異なるタイプの生態系で観測を実施し、植生や湛水の有無などの環境条件が両観測点のCO₂、エネルギー収支に及ぼす影響を明らかにする。また、高層湿原ではメタンフラックスの観測を行い、CO₂を含めた温室効果ガスの収支を評価する。

② 研究方法

ア. 観測点

本研究は、釧路湿原西部(43°N, 144.3° E, 8m ASL)に設置した3つの観測点で実施した。観測点の位置を図38に、各観測点の葉面積指数(LAI)の季節変化を図39に示す。夏季の卓越風向は南、冬季は北である。各観測点の特徴は以下の通り。

(ア)低層湿原サイト(KS0)

環境省温根内ビジターセンターに隣接した温根内木道沿いのヨシ群落内にある。夏季は常時湛水状態となり、冬季は凍結した水面上に積雪がみられる。ヨシは6月頃から成長を始め、8月後半にLAIが最大(4.2~4.8)となった。草高は最大で水面から約1.8m。観測は2001年6月から2002年11月まで実施した。

(イ)高層湿原サイト(KST, KSM)

釧路湿原南部を横断する釧路川右岸堤防と赤沼の間に広がる赤沼高層湿原内にある。この地帯は常時湛水状態にはないが地下水位は高く、泥炭層の上にミズゴケ層が発達しているため、釧路湿原では特異的な高層湿原に分類される。地表面にはホロー、ハンモックと呼ばれる、最大高度差約40cmの凹凸がみられ、一部のホローには夏季にも開水面が見られる。高層湿原の地下水位は降雨とともに変動し、降雨後には急上昇し、その後徐々に低下する。また、大雨の直後には、高層湿原一帯が湛水状態となる。KSMサイト付近の表層水のpHは、夏季を通して約6.0であった(2002年の測定結果)。赤沼の南側約100mの地点に微気象観測を中心とするサイト(KST)、さらに100m南側(堤防から北側約200m)の地点にガスフラックスの観測を中心とするサイト(KSM)を設置した。KSTサイトの北側にはスゲ(最大草高0.9m)が、南側にはまばらなヨシ群落(1.5m)が広がっている。また、KSMサイトの周辺はスゲ(0.85m)が優占している。スゲは5月上旬から成長を始め、7月末にLAIの最大値(KSTサイトでは2.1~2.5、KSMサイトでは1.4~1.5)に達した後、8月中旬から葉の黄変が始まった。ヨシの成長はスゲに比べて遅く、KS0サイトと同じく8月後半にLAIが最大(1.6~1.8)となり、9月に入って葉の黄変が始まった。

1月から3月にはスゲ群落は積雪に覆われ、枯れたヨシの茎葉のみが積雪上に現れた状態となった。積雪の深さは10～20cm、凍結深は20～30cm¹⁾である。観測期間は、KSTサイトが1999年6月から2002年11月まで、KSMサイトは2001年5月から2002年11月までである。

イ. 測定項目と測器

各観測点の測定項目を表9にまとめた。KSO, KSMの両サイトの渦相関法関連のデータは、データロガー (DR-M3a, Teac) を用いて10Hzでサンプリング、記録した。KSTサイトの渦相関法関連のデータは、A/D変換カード (NR-110, Keyence) を装着したパーソナルコンピュータ

(Libretto70, TOSHIBA) を用いて、同様に記録した。それ以外の測定項目については、データロガー (23xおよびCR10x, Campbell) を用いて5～10秒間隔でサンプリングし、その15分間平均値を記録した。

KSOサイトの電力は、ビクターセンターから仮設電線を敷設して供給した。KSTサイトの電力は、ソーラーパネル

(昭和ソーラーエネルギー, GT155. 定格出力86W), 6～8枚から供給したが、電力不足による欠測が生じた。また、2000年1月から3月には60cmを越える大雪により、ソーラーパネルが積雪中に埋没し、長期の欠測が生じたので、以後は冬季のみ、ソーラーパネルを鉛直に設置した。KDMサイトでは、消費電力が大きい分析計 (APHA-360) を動作させるため、交流発電機 (2kW) を用いた。2001年には発電機の突然の停止による欠測が頻発したが、専門業者による週1回の整備を依頼した2002年5月以降は、データの取得率が向上した²⁾。KSMサイトの2002年

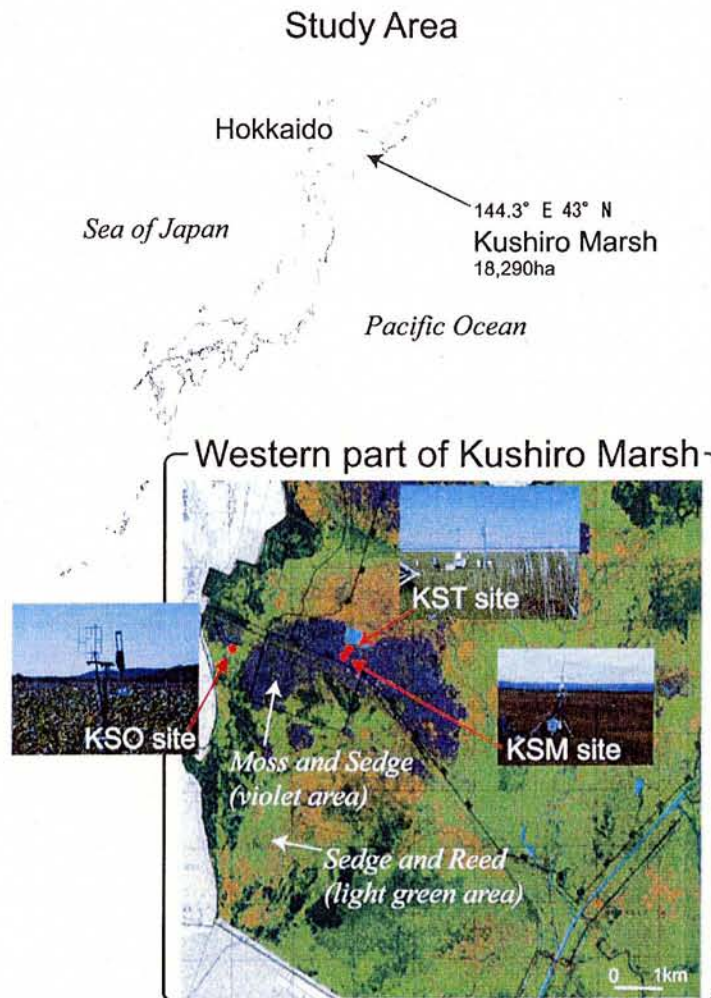


図38 観測点の位置。釧路湿原植生図（前田一步園財団発行）に加筆。

5月から10月までの期間の総時数に対する、品質管理後の有効な渦相関データ数の割合は26%であった。

渦相関法で使用したオープンパス型ガス分析計は、定期的の実験室に持ち帰り、 CO_2 および水蒸気に対する校正を行った。本研究では3つの異なる機種種のオープンパス型ガス分析計を使用した。LI-7500以外の2機種種のガス分析計は老朽化のためトラブルが頻発し、欠測の原因となった。KSOサイトで使用した3機種種のガス分析計のうち、OP-2は校正ごとにアナログ信号（電圧値）の感度とオフセットが大きく変動し、両者には図40に示すような線形の関係がみられた。OP-2とLI-7500を同時に設置していた期間について、OP-2から得られる CO_2 と水蒸気の30分間平均密度がLI-7500と一致するように、1日毎にOP-2の感度とオフセットを再決定してからフラックスを計算した。その結果、 CO_2 フラックスについては両分析計の結果がほぼ一致した（OP-2の方が1.5%小さかった）が、水蒸気フラックスはOP-2の方が57%も小さくなった。 CO_2 、水蒸気のパワースペクトル、鉛直風速とのコスペクトルを比較すると、 CO_2 では両分析計の差はほとんど見られなかったが、 H_2O では全周波数帯にわたってOP-2のパワーの方がLI-7500に比べて小さかった。観測サイトのエネルギー収支のクロージャを考慮すると、OP-2による水蒸気フラックスが過小評価されていることが示唆された。KSOサイトで使用したOP-2のデータは以上のような問題を含んでいるので、現在、データ処理を慎重に進めているところであり、以下に示すフラックスの値は暫定値である。

ウ. データ処理の方法

渦相関法のデータ処理は、水田（つくば）サイトと同様の方法で処理した。KSMサイトの CO_2 フラックスは非線形回帰法で補完した。生態系呼吸量の回帰式の説明変数としては、欠測データ

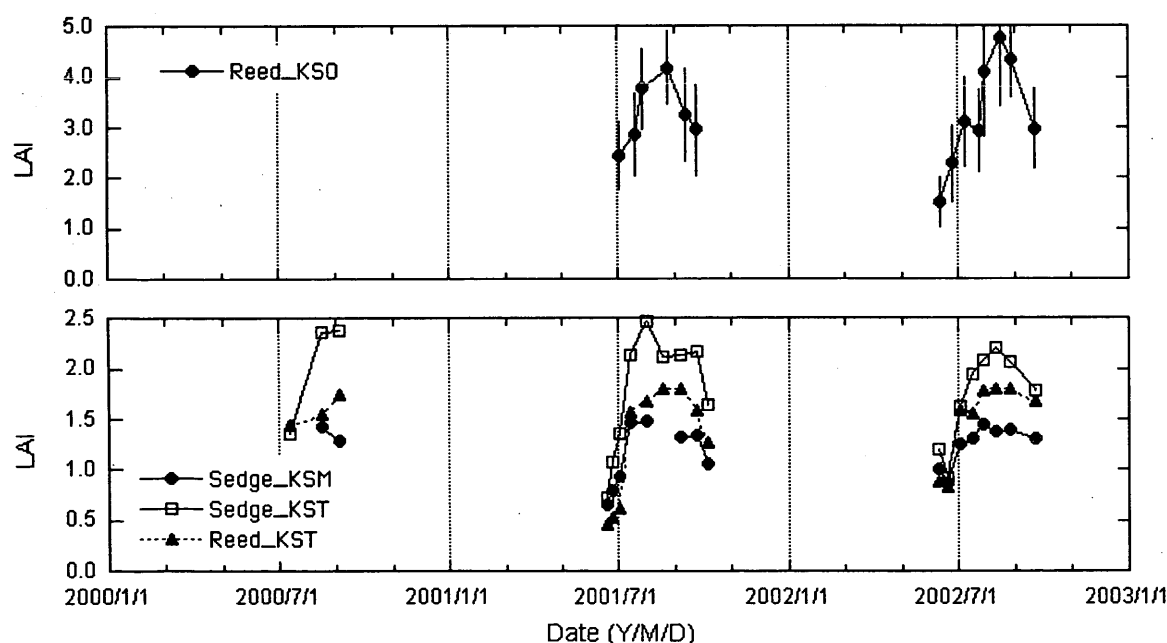


図39 各観測点のLAIの季節変化。(上) KSOサイトのヨシ群落、(下) KSMサイトのスゲ群落、KSTサイトのスゲ群落とヨシ群落。LI-2000 (LI-COR) を用いて測定した。

が比較的少ないKSTサイトの気温データを採用し、1年間のデータを用いて夜間平均のCO₂フラックスと夜間平均気温との回帰式を求めた²⁾。KS0サイト、KSTサイトの各フラックス、KSMサイトの顕熱、潜熱フラックスの補完は未実施である。以下では貯留変化量は無視して、渦相関法で測定したCO₂フラックスをNEE (Net Ecosystem CO₂ Exchange) とする。総光合成速度と生態系呼吸量の分離には、補完用に決定した回帰式を用いた。

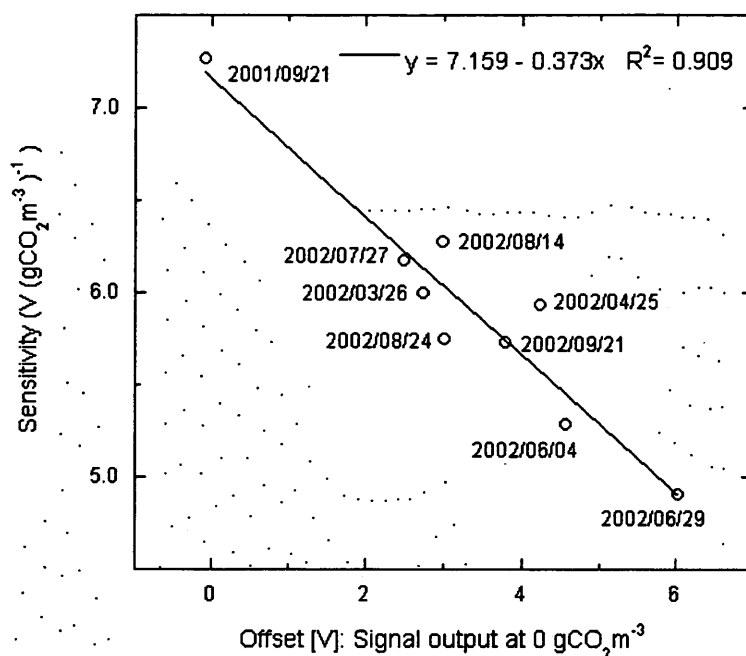


図40 KS0サイトで使用したオープンパス型ガス分析計のCO₂に対する感度とオフセットの関係。各点の日付は校正を実施した日を表す。

表9 測定項目と測器

測定項目	測定高度 ^a (m)	測器	備考
KS0サイト			
CO ₂ フラックス	3.8	超音波風速温度計 DA-600 (Kaijo), 開光路型赤外線ガス分析計 LI-7500 (LI-COR) **	
水蒸気フラックス	3.8	同上	
顕熱フラックス	3.8	DA-600	
摩擦速度	3.8	同上	
短波・長波放射量	2.4	4成分型放射計 MR-40 (EKO)	上向き, 下向き
PAR	2.1	光量子センサ LI-190 (LI-COR)	入・反射, 透過
気温	3.2	白金抵抗温度計 HMP45 (Vaisala)	
相対湿度	3.2	静電容量式湿度計 HMP45 (Vaisala)	
水温	-0.05, -0.1 -0.2, -0.4	白金抵抗温度計 (100オーム)	貯熱変化量の計 算に使用
水位		静電容量式水位計 Model 6521 (UNIDATA)	

表9 (続き)

測定項目	測定高度* (m)	測器	備考
KSTサイト			
CO ₂ フラックス	2.95	DA-600, 開光路型赤外線ガス分析計 OP-2 (DDG)	
水蒸気フラックス	2.95	同上	
顕熱フラックス	2.95	DA-600	
摩擦速度	2.95	同上	
短波・長波放射量	1.4	4成分型放射計 CNR1 (Kipp&Zonen)	上向き, 下向き
PAR	1.1	LI-190	入・反射
大気圧		光静電容量式気圧計 PTA427 (Vaisala)	
気温	1.0, 3.1	HMP45	
相対湿度	1.0, 3.1	同上	
風向	3.45	矢羽根式風向計 牧野応用測器 (VF016)	
風速	0.9, 1.3, 1.8, 2.4, 3.8	風杯型風速計 牧野応用測器 (AF750)	
降水量		転倒マス式雨量計 TE525MM (Texas Electronics)	2001年7月以降
群落表面温度	1.1	放射温度計 505型 (Minolta)	
地温	脚注***	白金抵抗温度計 (100オーム)	
地中熱フラックス		熱流板 MS-81 (EKO)	
地下水位		静電容量式水位計 Model 6521 (UNIDATA)	2001年7月以降
KSMサイト			
CO ₂ フラックス	2.3	DA-600, LI-7500****	
水蒸気フラックス	2.3	同上	
顕熱フラックス	2.3	DA-600	
摩擦速度	2.3	同上	
メタンフラックス	0.65, 2.25	FID型メタン分析計 APHA-360 (Horiba), DA-600	傾度法を適用
CO ₂ 濃度	0.65, 2.25		
短波・長波放射量†		MR-40	上向き, 下向き
PAR†		LI-190	入・反射, 透過
気温†	0.9, 2.2	HMP45	
相対湿度†	0.9, 2.2	HMP45	
地温	-0.05, -0.10	白金抵抗温度計 (100オーム)	2001年9月以降
地中熱フラックス		MS-81	2001年9月以降
地下水位†		静電容量式水位計 Model 6521 (UNIDATA)	
土壌酸化還元電位†		白金電極 自作, 比較電極 4400-065型 (東亜ディーケーケー)	

*地表面からの高さ (負の値は地表面からの深さ) を表す.

**2001年7月まではE009B (Advantech), 2002年6月まではOP-2 (DDG) を使用した.

***深さ0.01, 0.05, 0.10, 0.20, 0.40m

****2002年6月まではE009B (Advantech) . . .

† 2002年6月以降の測定項目.

メタンフラックスは、水田（つくば）サイトと同様の方法で算出し、摩擦速度が 0.1ms^{-1} の場合のデータは除外してフラックスの日平均値を計算し、日積算フラックスを求めた。渦相関法以外のデータは、15分値から30分値を計算する段階で異常値を除去した、欠損データは他の観測点の同一要素のデータで置き換えるか、または関連する要素のデータとの線形回帰式を用いて補完した。

③ 結果・考察

ア. 気象経過

2000年から2002年までの全天日射量、降水量、気温の経過を図41に、各要素の夏季の月別値を表3に示す。図41の気温は観測点のデータを示したが、欠測値が多いため表10の月別値は釧路地方気象台の観測値を示した。2000年は2～3月に降雪が多かったが、夏季は高温で経過し、とくに7、8月は平年に比べてそれぞれ、 2.3°C 、 1.7°C 、高温であった。2001年は、6月の日射量が3年間で最大であった。2002年は5月の日射量が多かったが、7月には台風に伴う大雨（7月11日、95mm）があり、8月は降水量が多く低温、少照であった。

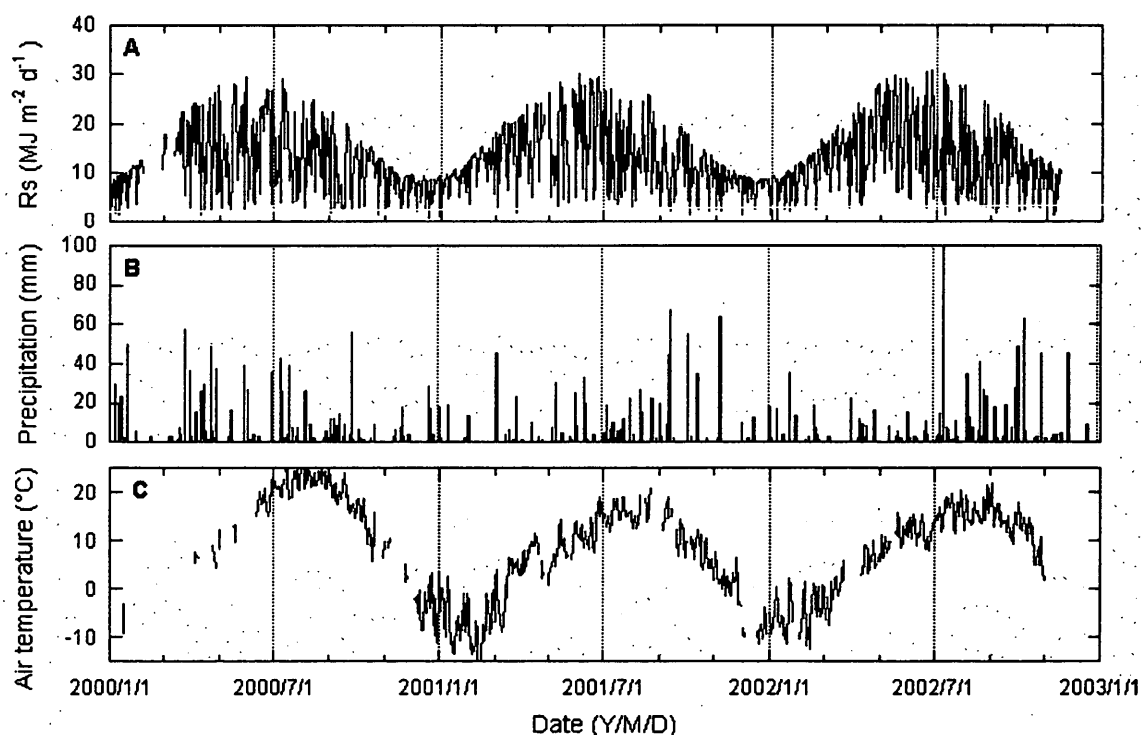


図41 日積算全天日射量 (A) , 日降水量 (B) , 高さ3.1mの日平均気温 (C) の経過. 日射量はKSTサイト, 日降水量は釧路地方気象台, 2000年, 2001年の気温はKSTサイト, 2002年の気温はKS0サイトのデータ.

表10 夏季の気象要素の月別値。気温、降水量は釧路の値。

要素	月	2000年	2001年	2002年	釧路平年値
全天日射量 (MJ m ⁻²)	5月	462	505	590	-
	6月	505	601	515	-
	7月	397	403	428	-
	8月	468	403	369	-
	9月	300	347	386	-
	年間	4071	4618	-	-
降水量(mm)	5月	68	75	21	103
	6月	73	69	48	122
	7月	134	102	154	110
	8月	55	91	180	118
	9月	131	137	114	136
	年間	1046	812	993	1043
平均気温 (°C)	5月	9.6	7.3	9.4	7.9
	6月	12.7	12.1	11.1	11.4
	7月	17.6	15.5	15.4	15.3
	8月	19.5	16.5	15.7	17.8
	9月	16.4	14.8	15.5	15.2
	年間	6.3	5.5	6.4	5.7

イ. エネルギー収支

3つの観測点の2002年のアルベドとPAR反射率の季節変化を図42に示す。低層湿原（KS0サイト）と高層湿原（KST, KSMサイト）の違いは、春季に顕著に現れた。4月から6月にかけてはヨシの成長は顕著ではないため、KS0サイトでは水面に到達する短波放射量の割合が高く、高層湿原の2つのサイトに比べてアルベドが小さかった。7月以降、ヨシのLAIが急増するにしたがって、KS0サイトのアルベドが高層湿原よりも大きくなった。PARの反射率は、各サイトとも7月後半から8月前半にかけてもっとも小さな値を示した（KS0サイトで0.05、KSTとKSMサイトでは0.04）。

盛夏期のKST, KSM両サイトの地表面エネルギー収支の例を図43に示す。KS0サイトは水田と同じく湛水した観測点であるが、つくば、岡山の両水田観測点と比較してボーエン比が大きく（顕熱フラックスの占める割合が高く）、7月の晴天日の日中で約1.0であった。また、湛水深が大きいため、水田（岡山）観測点と同程度の水体貯熱変化量が観測された。KSMサイトは湛水状態ではないが、KSTサイトとほぼ等しいボーエン比を示した。

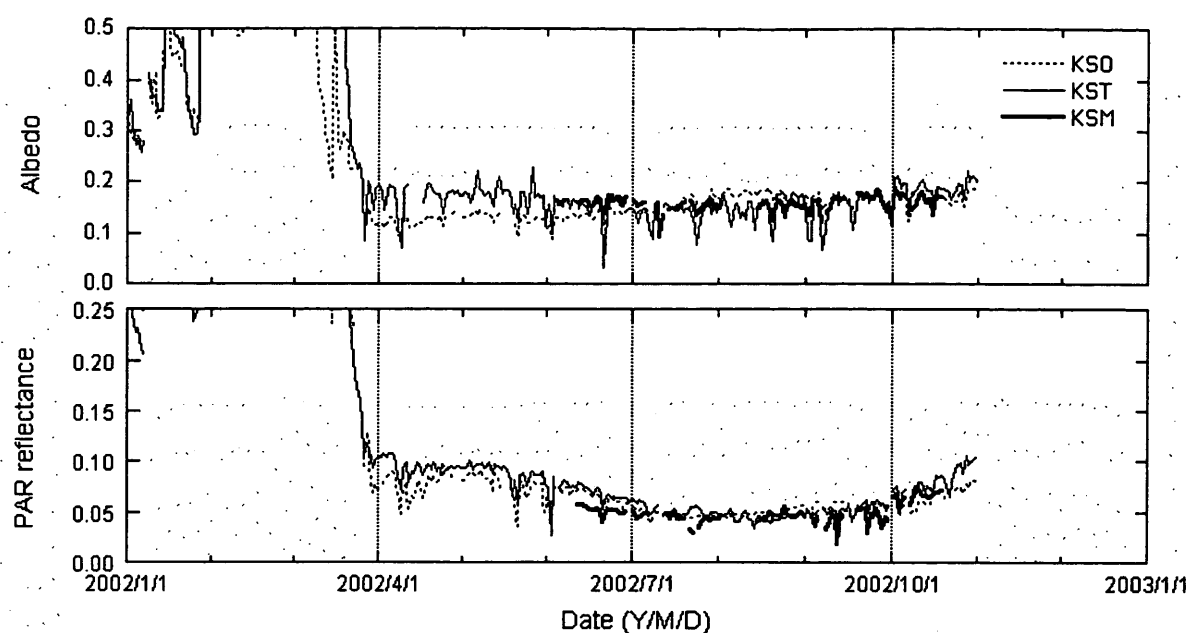


図42 3つの観測点のアルベドと光合成有効放射量（PAR）の反射率の季節変化（2002年）。

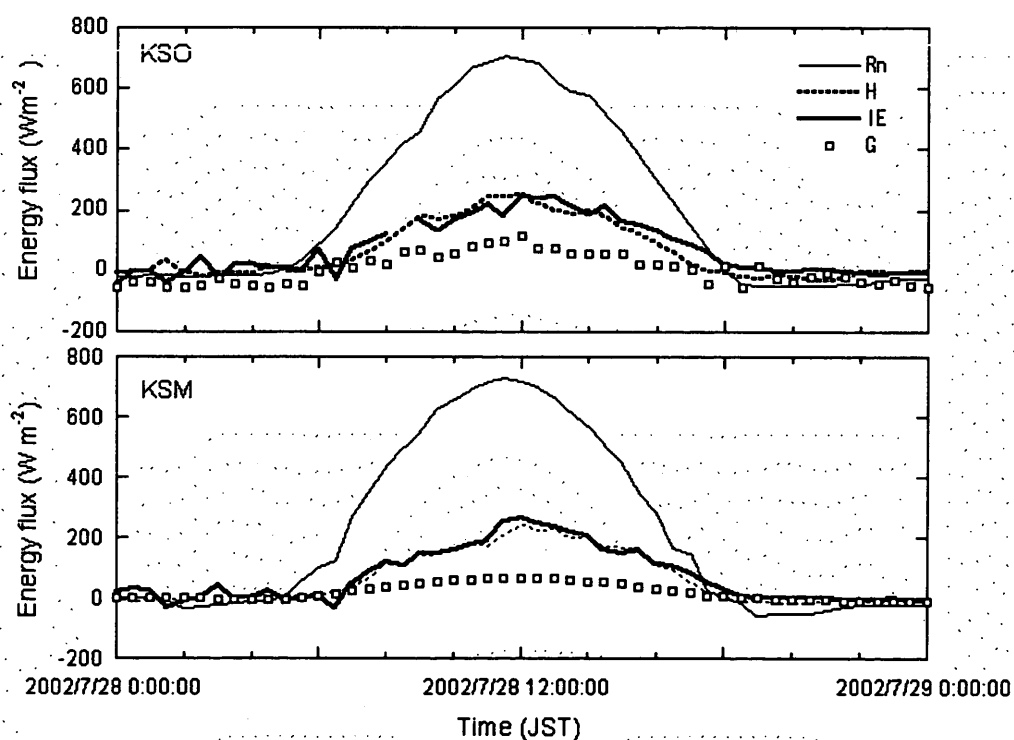


図43 盛夏期の晴天日のKSOサイト（上図）とKSMサイト（下図）のエネルギー収支項の日変化。Hは顕熱フラックス，LEは潜熱フラックスで，ガス分析計は両サイトともLI-7500。Rnは正味放射量，Gは湛水したKSOサイトでは水温のプロファイルから計算した水体の貯熱変化量，KSMサイトでは熱流板で測定した地中熱フラックス。

ウ. NEE

KS0 サイト（低層湿原）の NEE の季節変化を図 44 に示す。2002 年の NEE は 3 月下旬から 5 月にかけて正の値（湿原からの CO_2 の放出）を示したが、ヨシの成長に伴って徐々に放出量が減少し、6 月末には湿原による CO_2 の吸収に転じた。NEE は LAI が最大となった 8 月に $3\sim 6 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の吸収を示した後、徐々に吸収フラックスが減少し、10 月初めには吸収がほぼゼロとなった。2001 年の場合は、観測を開始した 6 月中旬に NEE は負の値を示しており、2002 年に比べて放出から吸収への移行が早く、7 月の吸収フラックスもやや大きかった。この年次間差の原因として、2001 年の方が 6 月の日射量が多く（表 10）、ヨシの成長が早かったことがあげられる。12 月から 3 月前半の積雪期間の NEE は、 $0.5 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 以内の小さな放出であった。

KSM サイト（高層湿原）の NEE の季節変化を図 45 に示す。KSM サイトで優占するスゲは、ヨシに比べて成長が早いため、KSM サイトの NEE は 5 月には吸収に転じ、6 月下旬には $4 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の最大吸収フラックスを示した。その後は吸収フラックスが緩やかに減少して、KS0 サイトと同じく 10 月初めに放出に転じた。積雪期間の KSM サイトは発電機の運転が困難であり、実測値は少なかったが、気温との回帰式を用いて補完した NEE では約 $0.5 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の放出が続いた。KSM サイトの月別の光合成量 GPP と生態系呼吸量 RE を図 46 に示す。KSM サイトでは NEE が負の月は 5 月から 9 月までの 5 ヶ月間であった。とくに、LAI がまだ小さな 5 月の GPP が盛夏期の値に匹敵すると評価された。2002 年の場合は盛夏期に雨天日が多く、逆に 5 月の月別日射量が最大であったことが要因としてあげられる。このように、スゲの優占する KSM サイトでは、ヨシの優占する KS0 サイトよりも早い時期に CO_2 の放出から吸収に転ずることが特徴である。

観測データのない 2002 年の 11 月、12 月の RE を 2002 年 1 月と同じと仮定して、KSM サイトの通年の CO_2 収支を評価すると、NEE、GPP、RE はそれぞれ -204 、 -654 、 467 g C m^{-2} であった。KSM サイトは生育期間の CO_2 フラックスは小さいが、NEE が吸収となる期間が長く、非生育期間の RE も小さいため、年間の NEE は水田（つくば）観測点に匹敵することがわかった。

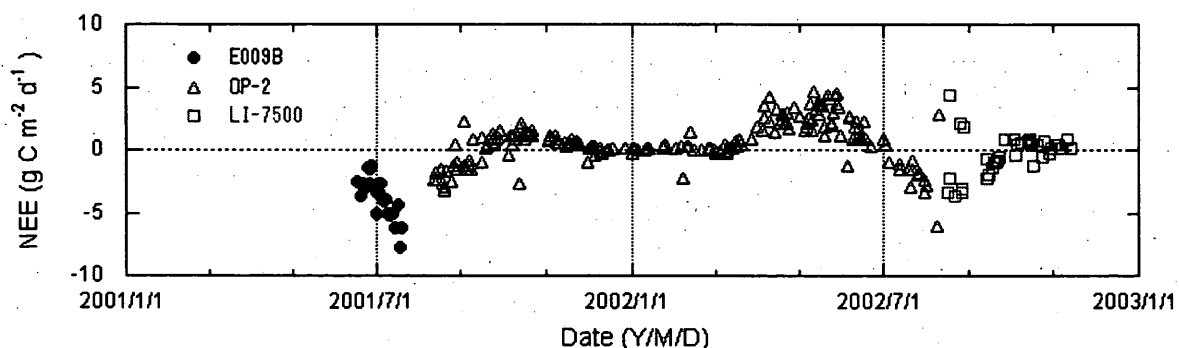


図 44 KS0 サイト（低層湿原）の NEE の季節変化（補完前の暫定値）。KS0 サイトでは、分析計の故障により、観測期間内に 3 つの異なるオープンパス型分析計を使用した。

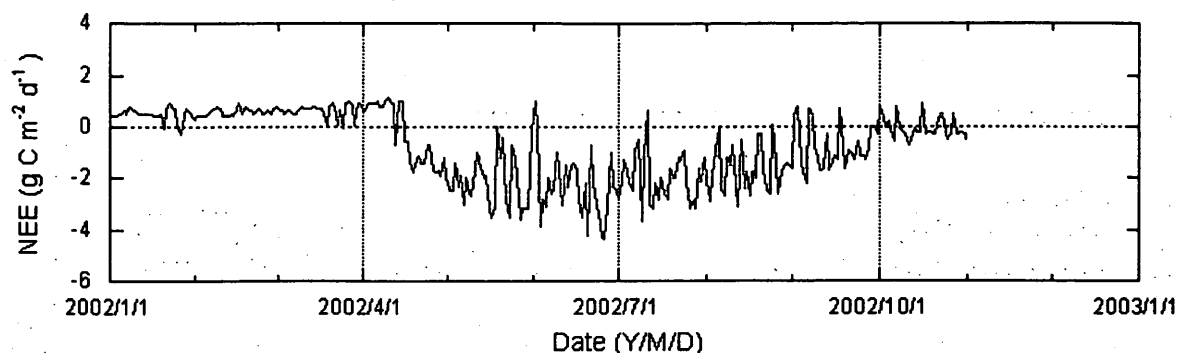


図45 KSMサイト（高層湿原）の2002年のNEEの季節変化（補完後の値）。2002年6月まではE009B, 以降はLI-7500を使用した。

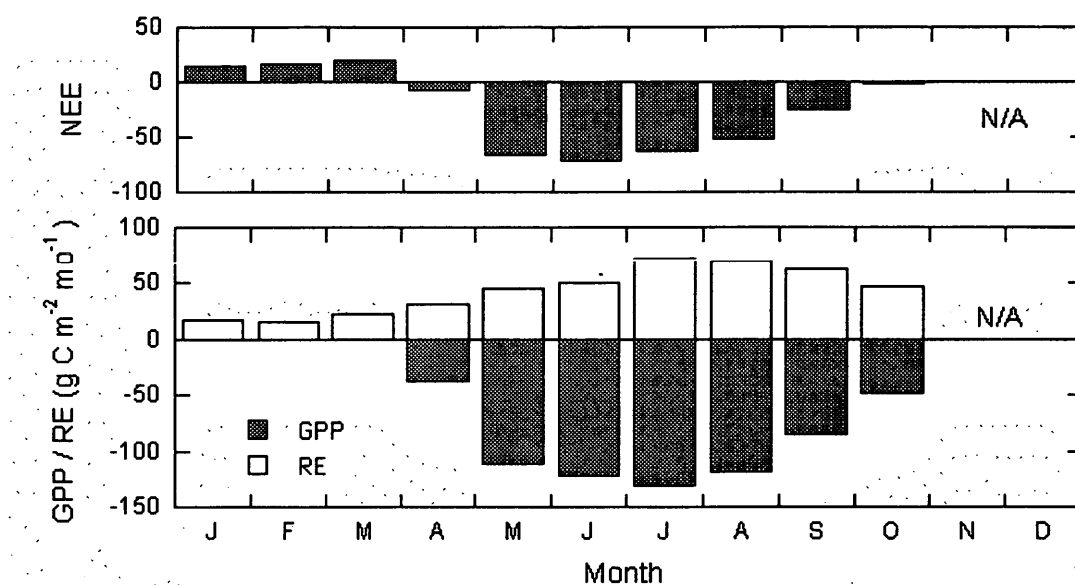


図46 KSMサイトの2002年のNEE，総光合成量GPP，生態系呼吸量REの月別積算値。

エ. メタンフラックス

KSMサイトのメタンフラックスの季節変化を図47に示す。メタンの放出量は，吸収 CO_2 フラックスの増加とともに増加し，7月中旬と9月中旬にピークを示した。 CO_2 フラックスが吸収から放出に転じた後もメタンの放出は継続し，表層土壌が凍結した冬季（積雪5～10cm）にも約 $20\text{mgCH}_4\text{ m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ の放出が観測された。2002年6月から11月に実施した土壌の酸化還元電位の測定結果によれば，5つの測定点のうちの3つは常時-200mV以下で，メタンの生成が行われる還元状態にあった。これは，地下水位は降雨とともに約30cmの振幅で上下しても（図47B），地下水面下の土壌中では常にメタン生成が行われていたことを示している。

冬季の積雪した湿原からのメタンフラックスの測定例は少ないが、北半球中緯度の湿原では積雪期間にもメタンが放出されているという報告がある⁹⁾。KSMサイトから約200m北側に位置する赤沼の南岸で、クローズドチャンバー法を用いて測定した結果では、積雪深20~30cm、凍結深20cmの条件下でも7~35mgCH₄ m⁻² d⁻¹のメタンの放出が観測されている¹⁰⁾。このように、釧路湿原では、水田とは異なり、冬季もメタンの放出が継続するため、年間のメタン放出量を算出するためには冬季のフラックスも考慮する必要がある。そのために、日積算メタンフラックス F_{CH_4} (mg CH₄ m⁻² d⁻¹) と日平均気温 T_a (°C) の関係に指数関数を仮定して、気温に対するメタンフラックスの回帰式を求め ($F_{CH_4}=29 \exp(0.0608 T_a)$, $R^2=0.602$) , 気温のデータを用いて2001年11月から2002年10月までの1年間の総メタン放出量を試算すると、17.1 gCH₄ m⁻² (12.9 g C m⁻²) となった。この炭素量は年間NEEの6.3%であり、地球温暖化指数 (GWP, 積算期間100年) を用いて換算すると、108 g C m⁻²のCO₂放出量に相当する。

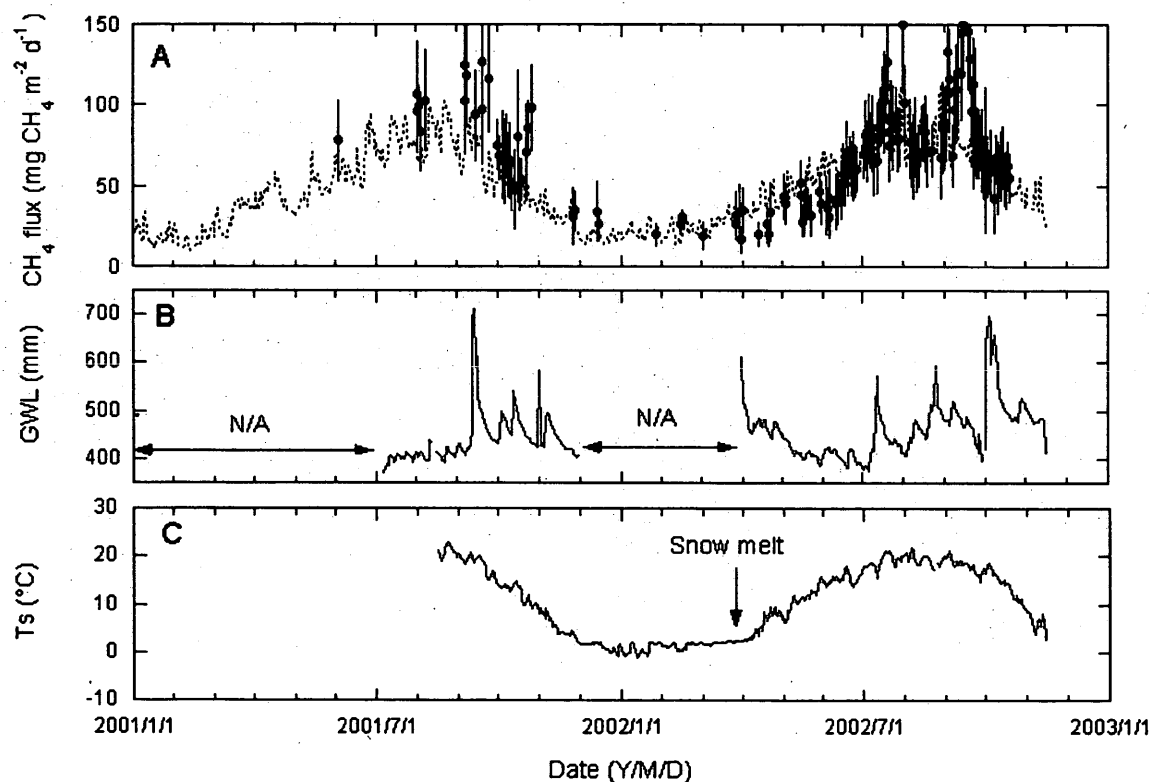


図47 KSMサイトの日積算メタンフラックス(A), 日平均地下水位 (B), 深さ5cmの日平均地温 (C)の季節変化。メタンフラックスは、6時間以上のデータが得られた日について平均値と標準偏差(エラーバー)を示す。点線は地温との回帰式から推定した値。地下水位はKSTサイトのデータを相対値で示す。

オ. 今後の課題

商用電源が得られなかったKSTサイト、KSMサイトでは、ソーラーパネルや交流発電機を使用して観測を実施した。しかし、観測点が国立公園内にあり、さまざまな制限があるため十分な電力供給を行うことができず、くわえて測器の老朽化によるトラブルの発生も多く、結果として欠測が多くなった。日本国内では湿原の占有面積は狭いものの、東アジアや世界規模の炭素収支や温室効果ガス収支を評価する場合に、湿原が重要な陸域生態系であることは疑いがない。シベリアや中国の湿原での研究と比較するうえでも、釧路湿原での観測の重要性は高い。保守担当要員の不足により、本観測点での観測は2002年12月以降休止しているが、保守業務の委託とともに、十分な電力の確保と測器の省電力化を行い、観測を再開したい。とくに、本研究では実施できなかった低層湿原でのメタンフラックスの長期観測の実現に向け、努力したい。

釧路湿原は夏季に濃霧が発生することが多く、オープンパス型ガス分析計や放射関係測器に水滴が付着し、データが異常値を示すことが多かった。また、地中熱フラックスや地温、光合成有効放射量（PAR）、土壌の酸化還元電位などの測定は、複数のセンサを湿原内に設置して行ったが、湿原の場所による不均一性のため、空間代表性のあるデータを得ることが難しかった。たとえば、KSMサイトには、透過PAR量の測定のために、群落内に3台の光量子センサを設置したが、得られたデータのばらつきは、その平均値の2倍程度であった。これらについても、解決が必要である。

④ 本研究により得られた成果

ア. ヨシが優占する湛水した低層湿原（KS0サイト）、スゲの優占する非湛水の高層湿原（KSMサイト）とも、盛夏期のボーエン比は約1.0で、湛水の有無による差は小さく、本州中央部の水田に比べて顕熱フラックスの占める割合が高かった。

イ. 低層湿原に比べて高層湿原はNEEが放出から吸収に移行する時期が早く、CO₂を吸収する期間も5ヶ月間と長かった。これは、ヨシに比べてスゲの生育が早いためである。両観測点とも、10月初めにはNEEが吸収から均衡または放出へと移行した。

ウ. 2002年の高層湿原の年間積算NEEは約-200 g C m⁻²と推定され、水田（つくば）観測点とほぼ同じであった。

エ. 高層湿原では年間を通じてメタンの放出が観測され、2002年のメタンの年間総放出量は約13 g C m⁻²で、炭素換算では年間NEEの6.3%に相当した。地球温暖化指数（積算期間100年）を考慮して評価すると、高層湿原は温室効果ガスの吸収源として作用してはいるが、温室効果ガス収支におけるメタン放出の寄与はCO₂吸収の約1/2に相当する。

⑤ 引用文献

- 7) 前田一步園財団（1993）「湿原生態系保全のためのモニタリング手法の確立に関する研究」
- 8) 桧物聖，北海道教育大学大学院教育学研究科修士論文（2003）
「釧路赤沼高層湿原におけるCH₄とCO₂のフラックスの季節変化およびその相互関係」
- 9) N. B. Dise, Global Biogeochemical Cycles, 7, 123-142.
“Methane emission from Minnesota Peatlands: spatial and seasonal variability”
- 10) 國吉俊一，北海道大学大学院地球環境科学研究科修士論文（1997）
「自然湿地におけるメタン発生量とそれに関与する環境要因」

(5) 水田サイト

モンスーンアジア（東アジアおよび東南アジア）において、水田は代表的な農業生態系のひとつであり、その面積は暖地性草原、暖地性作物畑、熱帯雨林に次ぐ面積を占め¹¹⁾、この地域の炭素収支を評価するうえで重要な生態系である。水田はその栽培期間が湛水状態となる特徴的な陸域生態系であるが、日本や韓国に広く分布する水稻単作水田は、年間の2/3を占める非耕作期間には落水、耕起された裸地となる。このため、耕作期間と非耕作期間では、水田と大気間のCO₂やエネルギー交換は大きく異なることが予想される。陸域生態系の炭素・エネルギー交換の世界的観測網であるFLUXNETでは、渦相関法を標準的なフラックスの測定法として採用しているが、この方法を水田に適用して炭素・エネルギー収支を長期観測した研究例はない。

A. つくばサイト

① 研究目的

本研究では、本州中央部の慣行栽培水田を対象に、大気との間のCO₂交換を中心とする炭素収支、エネルギー収支、水収支を長期的に観測し、その特徴を明らかにすることを目的とする。また、湛水生態系の特徴であるメタンの放出や灌漑、排水等に伴う溶存態炭素のフローについても観測を行い、水田の炭素収支、温室効果ガスの収支に対する影響を評価する。その結果を、西日本で同様の観測を実施する八浜観測点の結果や、本研究とは異なる方法を用いた既往の研究と比較する。

② 研究方法

A. 観測点

観測点は、利根川の支流である小貝川沿いに広がる水田地帯（茨城県つくば市真瀬、36° 03' N, 140° 01' E, 15m ASL）にある（図48）。最寄りの気象官署（館野）によれば、年降水量は1197mm、年平均気温は13.2° Cである。土壌は灰色化低地水田土（農耕地土壌分類第3次改訂版¹²⁾）に分類される。1999年8月に、農家水田の一面に高さ6mのタワーと測器類を設置して観測を開始した。タワーを設置した区画（南東 北西辺が100m、北東 南西辺が54m）では、毎年、水稻（品種；コシヒカリ）が栽培されており、所有する農家がこの地域の慣行に従って水田を管理している。2000年から2002年の水田の管理状況を表11にまとめた。観測期間中は、2001年の湛水前の厩肥施用を除いて、化成肥料のみが施用された。水稻の移植（田植え）は5月初め、収穫（稲刈り）は8月末から9月中旬に行われた。水稻の栽植密度は18.2株～18.8株/m²、湛水深は約3cmである。2002年の収穫日が2000年、2001年に比べて半月以上遅れたのは、水稻の生育遅延ではなく、9月上旬の大雨による圃場の軟弱化が原因である。収穫時にコンバインによって裁断された稲わらは圃場に残され、耕起時に切り株とともに土中に鋤き込まれた。収穫から最初の耕起までの期間にはひこばえの成長がみられたが、その植物体も耕起時に鋤き込まれた。なお、周辺の区画もほぼ同様に管理されたが、一部の区画では収穫後に稲わらが圃場内で焼却された。

タワーの南西約250mには小貝川堤防、北約25mには揚水機場があり、観測に必要な電力は揚水機場から配電した。卓越風向は4～6月は北東から東、7～8月は東から南、9月～3月は西か

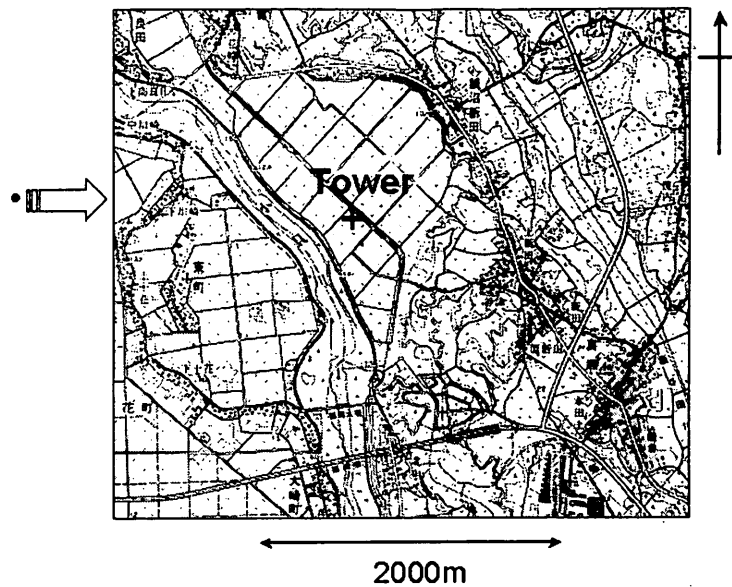


図48 真瀬観測点の位置。（国土地理院発行25000分の1の地図，谷田部に加筆）

ら北西である．夏季の代表的な観測条件について，解析解モデル¹⁴⁾を用いて推定したフラックスフットプリントを図49に示す．大気が不安定（図49のA）および中立に近い場合（B）には，最大寄与率点の10%の寄与率をもつ範囲はタワーを設置した区画内にあるが，大気が安定で風速が低い場合（C，摩擦速度 $u_* = 0.04 \text{ ms}^{-1}$ ）には，最大寄与率点までの距離が53mとなり，最大寄与率の10%の寄与率範囲も約320mまで拡大する．しかし，耕作期間（5月から9月まで）全体では，最大寄与点が60mを越えることは5月の5.7%を除いてほとんどなかった，この結果から，本観測点で測定される CO_2 などのフラックスは，ほぼタワー近隣の区画の水田を起源とするものであると推定される¹⁵⁾．

イ．測定項目と測器

測定項目を表2にまとめた．渦相関法関連のデータは，カットオフ周波数10 Hzのローパスフィルタで高周波成分を除去した後，データロガー（DR-M3a, Teac）を用いて10Hzでサンプリング，記録した．それ以外の測定項目については，データロガー（21xおよびCR23x, Campbell）を用いて5秒間隔でサンプリングし，その15分間平均値を記録した．

渦相関法によるフラックス測定に使用したオープンパス型ガス分析計は，定期的の実験室に持ち帰り， CO_2 および水蒸気に対する校正を行った．校正は，2000年，2001年については各3回，ガス分析計をLI-7500に交換した2001年12月以降はほぼ月1回（2002年4月3日から6月11日までは2週間毎）の頻度で行った．LI-7500は出力の長期安定性に優れ， CO_2 ，水蒸気とも，10日当たりの感度変化率は0.1%以内，10日当たりのオフセットの変化率は CO_2 が 0.1 mmol m^{-3} 以内， H_2O が 0.1 g m^{-3} 以内であった¹⁵⁾．

2002年8月には，群落内4高度と群落上1高度で CO_2 濃度を測定し，渦相関法の測定高度を含めた6高度の濃度プロファイルの時間変化から， CO_2 の貯留変化量を計算した．また，表12にあげた項目以外に，耕作期間のみ，灌漑水量，排水量，浸透水量と溶存態炭素の測定を実施したが，その詳細はサブテーマ2の報告¹⁶⁾に譲る．耕作期間と収穫後のひこばえ生育期間に，原則

表11 2000年から2002年までの水田の管理。カッコ内は1月1日を1とする通日。

事項	2000年	2001年	2002年
耕起日	2月2日 (30) 3月27日 (87)	2月下旬	2月22日 (53)
基肥 (厩肥) 施用日	-	2月下旬	-
施用量 (kg ha ⁻¹)	-	4,380*	-
基肥 (化成肥料) 施用日	4月12日 (103)	4月13日 (103)	4月3日 (93)
施用量 (kg ha ⁻¹)	N, P, K=40, 100, 100	N, P, K=32, 35, 66	N, P, K=43, 43, 43
耕起日	4月12日 (103)	4月14日 (104)	4月10日 (100)
灌水開始日	4月20日 (111)	4月19日 (109)	4月18日 (108)
代かき日	4月下旬	4月29日 (119)	4月27日 (117)
移植日	5月2日 (123)	5月4日 (124)	5月2日 (122)
中干期間 (1)	7月8日 (191) ～7月19日 (201)	6月23日 (174) ～7月5日 (186)	6月19日 (170) ～7月9日 (190)
中干期間 (2)		7月30日 (211) ～8月12日 (224)	7月24日 (205) ～7月31日 (212)
出穂期	7月20日 (202)頃	7月24日 (205)頃	7月30日 (211)頃
追肥日	7月下旬	7月下旬	7月18日
施用量 (kg ha ⁻¹)	N, P, K=8, 0, 8	データなし	N, P, K=9.5, 0, 9.5
落水日	8月14日 (227)	8月18日 (230)	8月11日 (223)
収穫日	8月29日 (242)	9月2日 (245)	9月19日 (262)
収穫量 (kgDW ha ⁻¹)	5,100**	4,800**	5,700-6,000**
耕起日	9月中旬 12月1日 (336)	11月30日 (334)	10月15日 (288) ～18日 (291)

*農家からの聞き取り調査で得られた運搬車両台数からの推定値¹³⁾。

**農家からの聞き取り調査で得られた玄米俵数を、1俵あたり60kgとして換算。

として2週間毎にイネを10株抜き取り、部位別乾物重と葉面積の測定を行った (自動葉面積計, AAM-7, 林電工。2000年の調査は2回のみ)。また、定期的に草高を測定した (2001年は抜き取ったイネの草丈を測定)。各年の草高、総乾物重 (根部を含む)、葉面積指数 (LAI) の季節変化を図50に示す。

ウ. データ処理の方法

渦相関法のデータ処理は30分間を区切りに行った、超音波風速計のデータはDouble rotation (風速の横風成分と鉛直成分の30分間平均値がゼロとなるように座標軸を回転) を適用した。顕熱フラックスは超音波風速計の仮温度出力を用いて計算し、水蒸気フラックスおよび横風の影響を補正した。センサ長および超音波風速計とガス分析計の距離によるコスペクトルの高周波数成分の減衰は、標準的コスペクトルを参照する方法¹⁷⁾を用いて補正した。水蒸気とCO₂のフラックスに対しては、密度補正を適用した。また、2001年11月まで使用していたガス分析計 (E009B) はCO₂濃度測定に対する水蒸気の影響を補正した¹⁸⁾ ($\beta/\alpha=0.001$ を仮定)。渦相関法で得られたフラックスデータの品質管理としては、定常性テスト、乱流強度テスト¹⁹⁾を行い、さらにフラックスの絶対値に適当な敷居値を設定して異常値を除去した。欠損データ (欠測値および異常値) の補完に関しては、欠損期間が30分値で3項以内であれば線形補完、それ以上の場合にはCO₂フラックスは非線形回帰法、顕熱および潜熱 (水蒸気) フラ

ックスはLook-up table法²⁰⁾を適用した。補完に用いる回帰式やTableは、イネの有無、湛水の有無によって区分した期間毎に決定した。

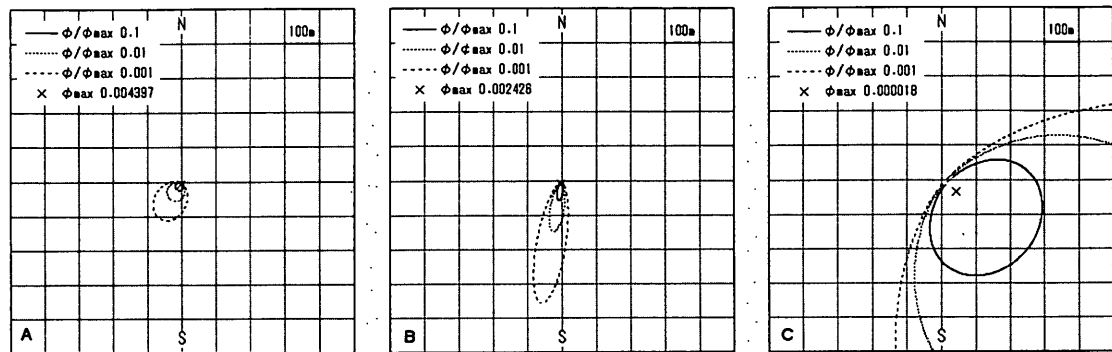


図49 観測点のフラックスフットプリント⁵⁾。2002年7月31日の(A)9:00-9:30, (B)12:00-12:30, (C)22:00-22:30の例。表示した領域の中心に観測タワーがあり、測定高度は2.17m (地面修正量を引いた値)。×は最大寄与率点。各線で囲まれた領域は、最大寄与率点の寄与率に対して、それぞれ10% (実線)、1% (点線)、0.1% (破線)の寄与率をもつ範囲を表す。

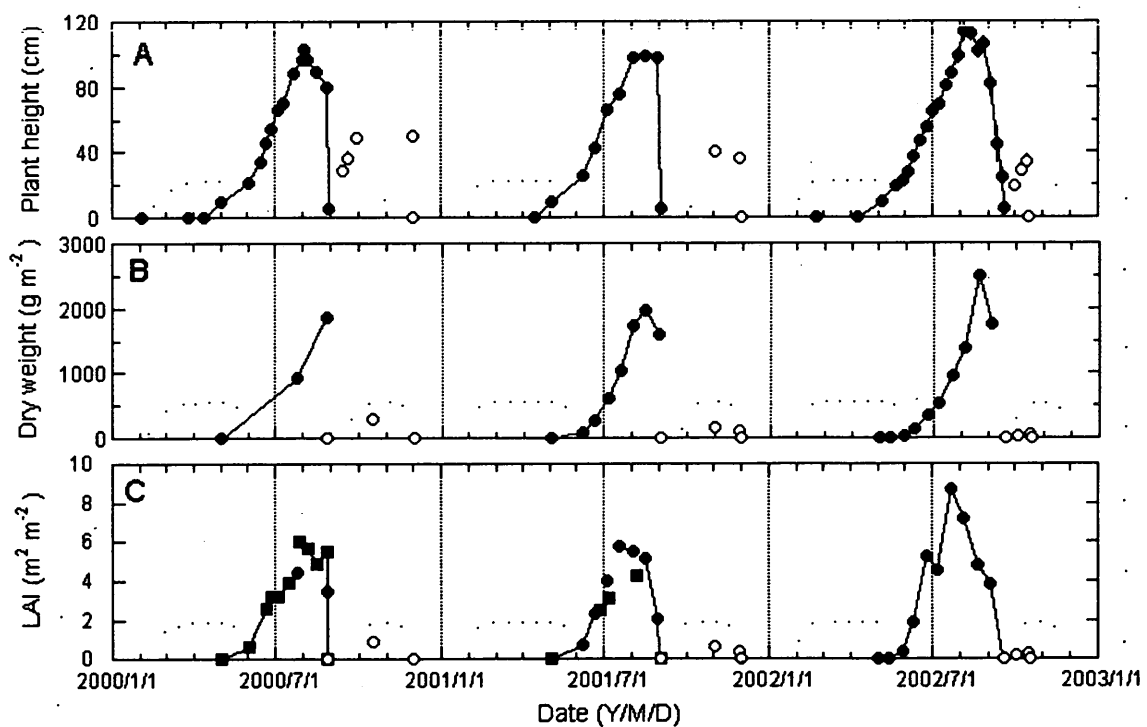


図50 草高(A), 総乾物重(B), LAI(C)の変化。○はひこばえの値。Cの■はLAI-2000による非破壊測定値, ●と○は自動葉面積計による測定値 (2002年については暫定値)。

表12 測定項目と測定高度，使用した測器（2002年8月1日現在）．

測定項目	測定高度* (m)	測器	備考
CO ₂ フラックス	2.9	超音波風速温度計 DA-600 (Kaijo), 開光路型赤外線ガス分析計 LI-7500 (LI-COR)**	
水蒸気フラックス	2.9	同上	
顕熱フラックス	2.9	DA-600	
摩擦速度	2.9	DA-600	
メタンフラックス	1.1, 3.8	FID型メタン分析計 FIA-510 (Horiba), DA-600	傾度法を適用
CO ₂ 濃度***		LI-7000 (LI-COR)	貯留量の計算用
短波放射量	2.3	4成分型放射計 CNR1 (Kipp&Zonen)	入射, 反射
長波放射量	2.3	同上	下向き, 上向き
PAR	2.3	光量子センサ LI-190 (LI-COR)	入射, 反射
透過PAR	0.05	光量子センサ LI-191 (LI-COR)	
大気圧	1.8	静電容量式気圧計 PTA427 (Vaisala)	
気温	1.1, 3.8	白金抵抗温度計 HMP45 (Vaisala)	
相対湿度	1.1, 3.8	静電容量式湿度計 HMP45 (Vaisala)	
風向	4.3	矢羽根式風向計 牧野応用測器 (VF016)	
風速	0.9, 1.1, 1.9, 3.8, 6.25	風杯型風速計 牧野応用測器 (AF750)	
降水量	2.0	転倒マス式雨量計 TE525MM (Texas Electronics)	
群落表面温度	2.1	放射温度計 505型 (Minolta)	
地表面温度	0.3	同上	
水位	-	超音波式変位計 UD310 (Keyence)	
水温	0.01	白金抵抗温度計 (100オーム)	
地温	-0.01, -0.05, -0.1, -0.2, -0.4	T型熱電対	
地中熱フラックス	-0.02	熱流板 MS-81 (EKO)	
土壌水分量	0 -0.3	TDR型土壌水分計 TDR100 (Campbell)	
土壌酸化還元電位		白金電極 自作, 比較電極 4400-065型 (東亜ディーケーケー)	

*地表面からの高さ（負の値は地表面からの深さ）を表す．

**2002年11月まではE009B (Advanet)とOP-2(Data Design Group)を使用した．

***2002年8月のみ測定．測定高度は0.10, 0.35, 0.60, 0.85, 1.20mで，群落高度は1.1m．

2000年の1月と7月上, 中旬に測器の故障により欠測を生じたが, その後は長期間の欠測は発生しなかった. とくにガス分析計をLI-7500に交換した2001年12月からの1年間については, 測器の故障, 電源の異常, 分析計の校正にともなうCO₂フラックスの欠測値の割合は, わずか1.5%であった. しかし, 品質管理後の欠損データの割合は59.2% (5月から9月までの期間については43.7%) と, 約6割のデータが異常値と判定され, とくに12月から2月にかけてのCO₂フラックスの小さな時期に, 異常値と判定される割合が高くなった. なお, 2002年8月に実施した貯留変化量の評価の結果によれば, 摩擦速度が0.1 m s⁻¹以上の条件では貯留変化量は無視できることがわかった¹⁵⁾. 摩擦速度が0.1 m s⁻¹以下では貯留変化量が無視できない場合もあるが, CO₂の濃度プロファイルを測定していない場合の貯留変化量の評価や, 群落条件が異なる場合の摩擦速度の敷居値の設定などの問題が未検討のため, 以下では渦相関法で測定したCO₂フラックスに貯留変化量を含めないでNEE (Net Ecosystem CO₂ Exchange) とする. なお, CO₂フラックスの補完用に決定した回帰式は, 生態系呼吸量と総光合成量の分離評価にも用いた.

メタンフラックスは, 渦相関法で決定した摩擦速度, 大気安定度と, 2高度で測定したメタン濃度から, 傾度法を適用して算出した²¹⁾. 摩擦速度が0.1 m s⁻¹の場合のデータは除外してフラックスの日平均値を計算し, 日積算フラックスを求めた. 渦相関法以外のデータは, 15分値から30分値を計算する段階で異常値を除去し, 欠損データは観測点の関連要素や気象官署 (館野) の観測データとの線形回帰式を用いて補完した.

③ 結果・考察

ア. 気象経過

2000年1月から2002年2月までの日射量, 降水量, 気温の経過を図51に示し, 夏季の月毎の統計値を表13に示す. 各年の夏季の気象経過の特徴は以下の通り. 2000年は5月から7月にかけて降水量が多かった. 2001年は7月に晴天が多く高温で, 8月は曇天日が多かった. 2002年は5月から6月が低温であった.

イ. エネルギー収支

地表面のエネルギー収支に関連する要素の季節変化を, 2002年について図52に示す. 水田のエネルギー収支の特徴は夏季のボーエン比が小さい (顕熱フラックスの占める割合が小さい) ことである. とくに7月から8月にかけては, 顕熱フラックスの日合計値がゼロもしくは負となることが多く, 有効エネルギーの大部分は潜熱フラックスに変換された. 水稻の収穫後もボーエン比は小さい値で経過したが, 土壌が乾燥する2月後半から徐々に増加し, 4月中旬までは1.0を越える日もあった. アルベドはこの時期に年間最大値を示し, 湛水開始とともに急減して, その後は水稻の生長とともに徐々に増加した. エネルギー収支のClosure比 (ここでは, 日合計有効エネルギーに対する顕熱・潜熱フラックスの日合計値の比として計算した) は, 5月および7月中旬から8月中旬にかけては0.9から1.0の値を示す日が多く, その他の時期にはこれより小さな日が多かった.

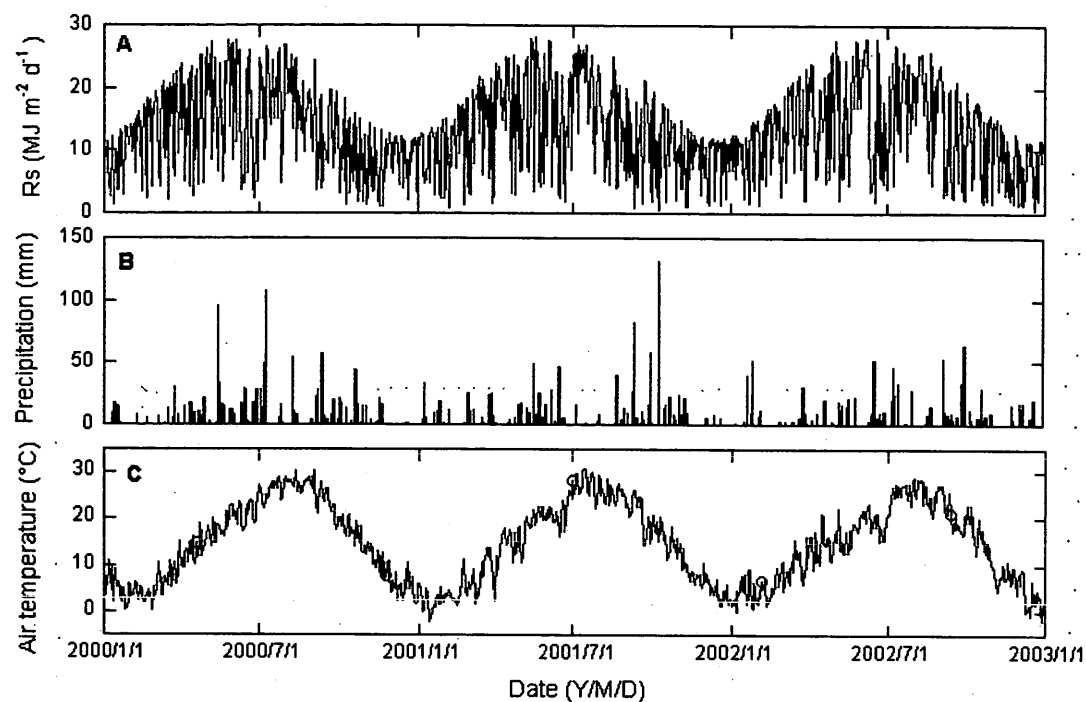


図51 日積算全天日射量 (A) , 日降水量 (B) , 高さ3.8mの日平均気温 (C) の季節変化.
降水量は館野の値.

表13 夏季の気象要素の月別値. 気温は高さ3.8mの値. 降水量は館野の値.

要素	月	2000年	2001年	2002年	館野平年値
全天日射量 (MJ m ⁻²)	5月	561	513	541	
	6月	443	441	457	
	7月	601	662	548	
	8月	558	425	591	
	年間	4966	4889	4924	
降水量(mm)	5月	218	165	121	121
	6月	191	133	111	160
	7月	225	18	136	122
	8月	80	80	64	120
	年間	1382	1221	1070	1197
日平均気温 (°C)	5月	18.4	19.1	16.6	16.6
	6月	21.4	21.5	19.5	19.9
	7月	26.2	27.7	25.6	23.5
	8月	27.7	25.3	25.7	25.2
	年間	15.1	14.5	14.1	13.2

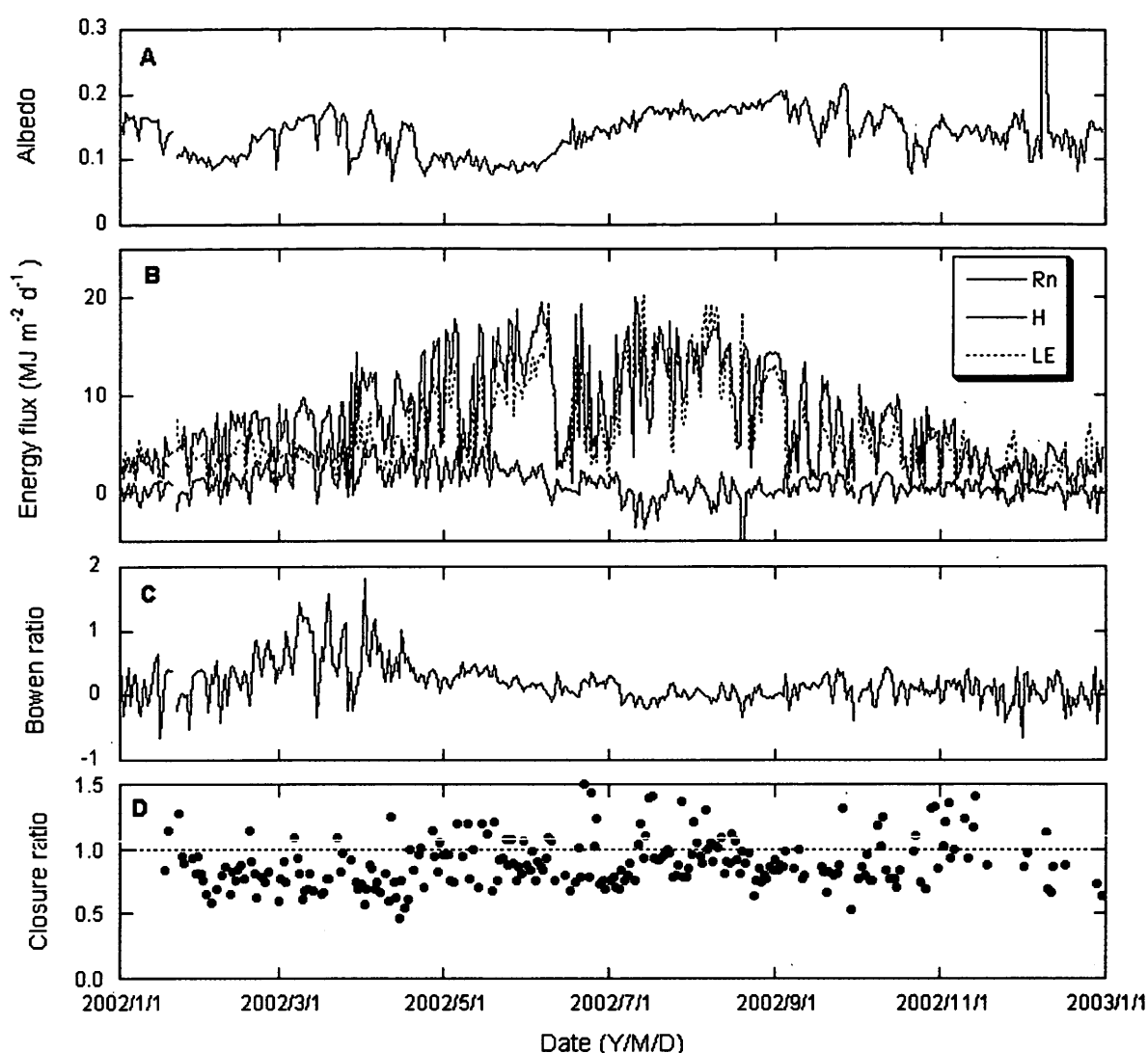


図52 2002年の (A) アルベド, (B) 正味放射量(Rn), 顕熱フラックス (H), 潜熱フラックス (LE), (C) ボーエン比, (D) Closure比の季節変化. アルベド, ボーエン比, Closure比は日積算フラックス同士の比として計算した. Closure比は, $Rn-G$ が $4MJm^{-2} d^{-1}$ 以下の日は除き (G は地中熱流量), 水体貯熱量は無視した.

ウ. NEE

2000年から2002年までの日積算NEEの変化を図53に示す. NEEは移植から3週間後の5月下旬以降, イネの成長に伴って急激に負値 (生態系による CO_2 の吸収) が増加し, 6月下旬から8月初めにかけて, 最大で $10g C m^{-2} d^{-1}$ の吸収を示した. その後, NEEは徐々にゼロに近づき, 収穫直後に正 (生態系からの CO_2 の放出) に転じた. 2002年はNEEが正に転ずる時期が収穫日よりも早まったが, これは9月になるとイネの光合成速度が低下する一方で, 生態系呼吸量は高いレベルを維持したためである (この時期の水田は落水状態のため, 土壌呼吸量の寄与も大きい). 2000年, 2001年は収穫の約1ヶ月後にNEEが一時的にゼロに近づく時期が見られ, ひこ

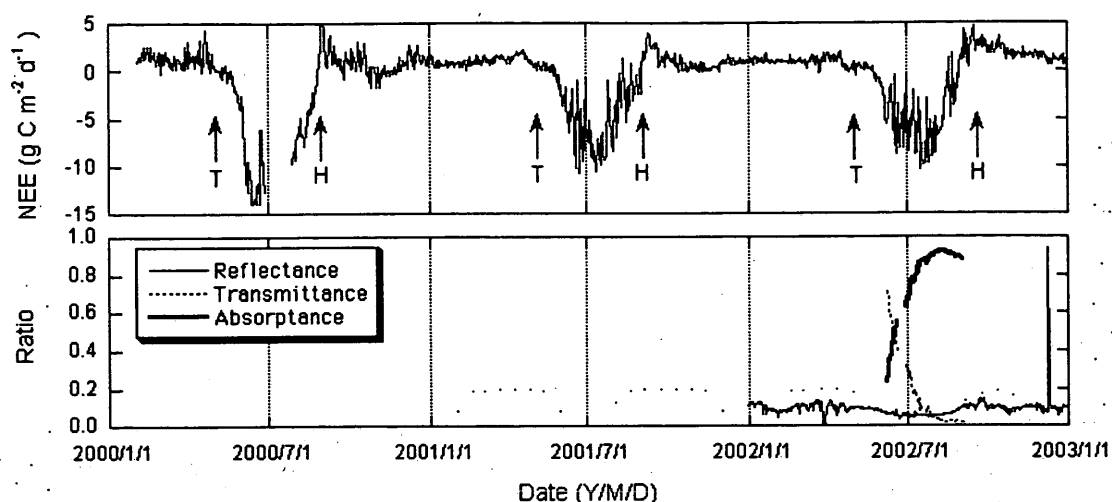


図53 日積算NEEの季節変化（上図）と、PARの反射率（Reflectance），透過率（Transmittance），吸収率（Absorptance）の季節変化（下図，2002年のみ）．2000年のNEEは品質管理，補完前の暫定値．T, Hは移植日と収穫日．

ばえの光合成が日積算NEEに影響を及ぼしていることがわかる．光合成有効放射量（PAR）の反射率は6月下旬から8月上旬にかけて0.05と年間でもっとも低い値を示した．一方，PARの吸収率は7月末から8月下旬にかけて約0.9にまで増加し，生育後期には入射したPARの9割が水稻群落で吸収されたことがわかる．

2001年について，生態系呼吸量と温度との関係を図54に示す．非耕作期間について，深さ5cmの地温を説明変数とする回帰式（指数関数）における Q_{10} の値は，湛水開始前が1.7，収穫後は2.1であった．耕作期間は高温になるほど植物量が増加するため，非耕作期間に比べて大きな Q_{10} の値を示した（図54b）が，この関係式が日中も成立すると仮定して，日中の生態系呼吸量を推定し，NEEに加えることにより総光合成速度を求めた．なお，非湛水期間には土壌面からの CO_2 拡散が増加するので，生態系呼吸量は図54bに示した関係式よりも増加した．

総光合成速度とPARとの関係（光－光合成曲線）に直角双曲線を仮定し，入射PAR量に対する総光合成速度の回帰式を求めた．回帰式に含まれる二つのパラメータである，初期光利用効率とPARが無限大のときの総光合成速度 $F_{GPP, sat}$ の季節変化を図55に示す．初期光利用効率は，イネの生育期間を通じてほぼ一定の値（ $0.05 \sim 0.06 \text{ mol CO}_2 (\text{mol quantum})^{-1}$ ）をとったが， $F_{GPP, sat}$ はイネの成長に伴って変化し，7月中旬に最大値を示した．

2001，2002年について，NEE，総光合成量GPP，生態系呼吸量REの月積算値の変化を図56に示す．両年ともほぼ同様の変化を示したが，2001年8月は曇天日が多かったため，2002年同月に比べてGPPが小さかった．また，2002年は収穫が遅れ，9月上，中旬にも圃場にイネが残っていた．このため，2002年9月は2001年同月に比べてRE, GPPともに大きかった．NEEが負値となったのは6月から8月の3ヶ月間で，5月はGPPとREが拮抗していた．2001年は11月までひこばえの成長がみられたが，REがGPPを上回り，NEEとしては正值（水田からの放出）となった．非耕作期間のREはほぼ地温の変化と対応しているが，4月の後半に水田が湛水状態となるため，4月のREは3月と同程度であった．

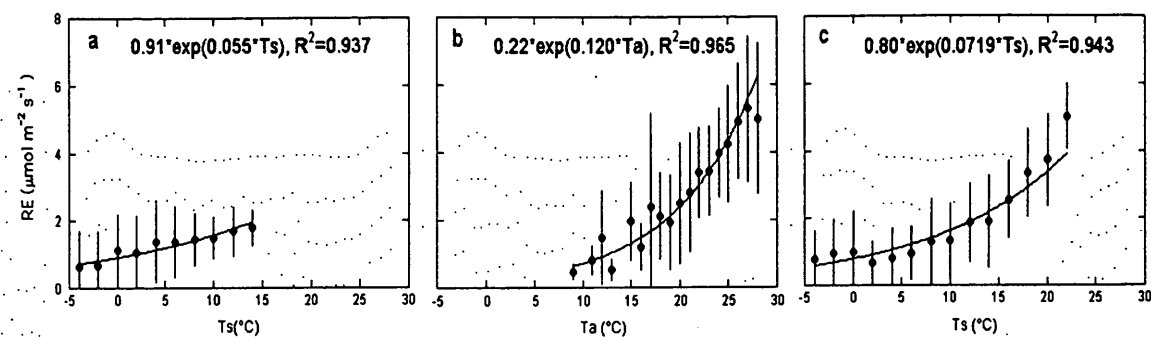


図54 生態系呼吸量REと温度との関係。2001年のa)1月から湛水開始まで，b)湛水開始から収穫日までの湛水期間，c)収穫から12月まで。温度については，a, cの期間は深さ5cmの地温，bの期間は気温を用いた。バーは各温度区分に含まれるREの標準偏差。

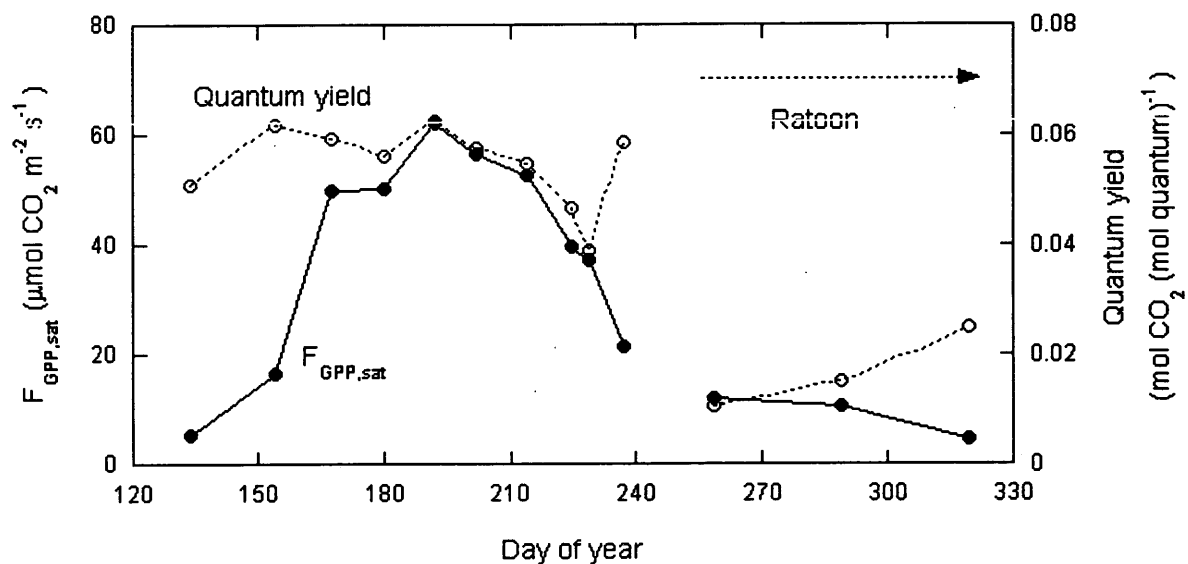


図55 光－光合成曲線（直角双曲線）の二つのパラメータ，（初期光利用効率とPARが無限大のときの総光合成速度 $F_{GPP,sat}$ ）の季節変化。2001年のデータで，光量としては入射PARを用いた。250日以降はひこばえの光合成による値。

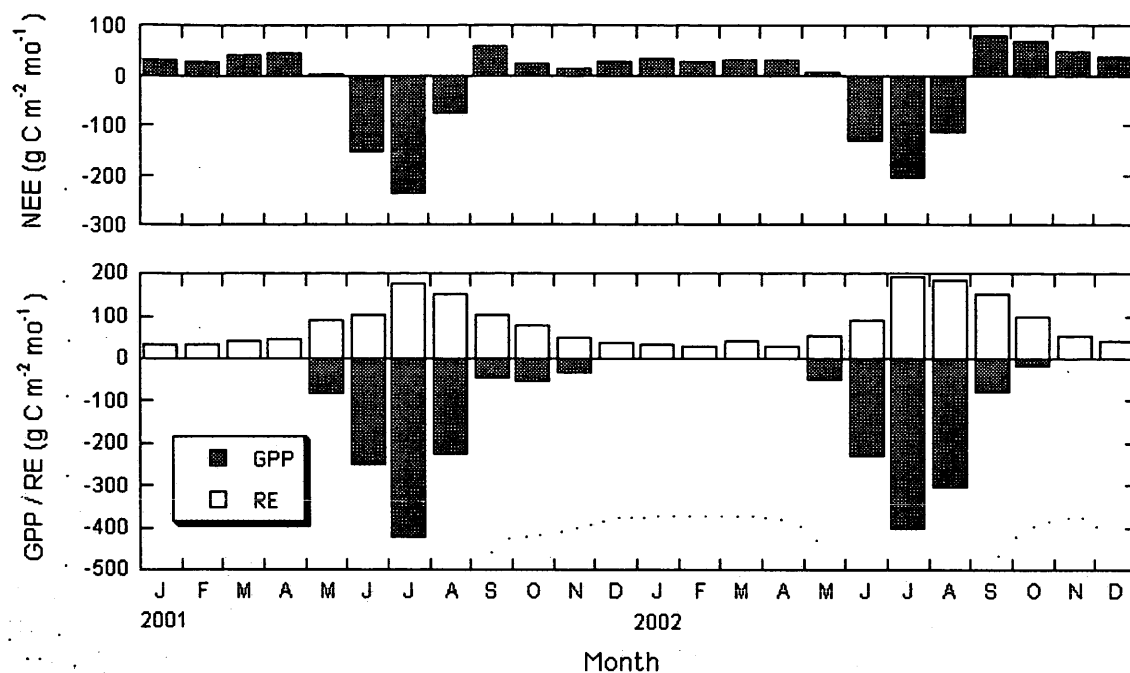


図56 2001年および2002年のNEE（上図），総光合成量（GPP，マイナス値で示す）および生態系呼吸量（RE）の月別積算値の変化．GPPとREは欠損値データの補完に用いた回帰式による計算値．

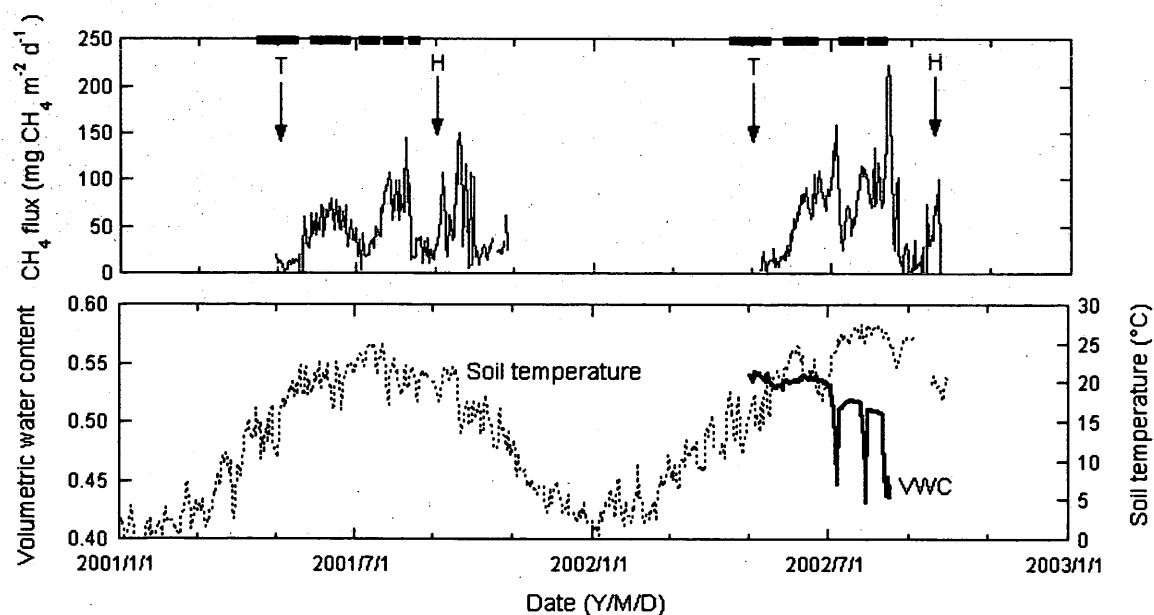


図57 メタンフラックス（上図），表層5cmの体積含水率および深さ5cmの地温（下図）の季節変化．上図のTは移植日，Hは収穫日，太い線は湛水期間を示す．2001年5月30日以前のメタンフラックスは渦相関法による測定値．

エ. メタンフラックス

2001年と2002年のメタンフラックスの季節変化を図57に示す。メタンの放出量は移植後徐々に増加し、中干し前に最初のピークを示した。放出量は中干し時に一時的に減少した後、再び増加し、落水まで大きな放出が続いた。2001年は9月初めに水稻の収穫が行われたが、その後も降雨が多く、水田が湛水状態となる場合が多かったので、9月上、中旬でも大きな放出量が観測された。移植日から9月末までのフラックスの積算値は、2001年が $7.2 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2}$ (5.4 g C m^{-2})、2002年（9月24日まで）が $8.3 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2}$ (6.2 g C m^{-2})であった。

オ. 炭素収支

本観測点の2001、2002年の CO_2 収支と炭素収支を表14に示す。両年の CO_2 収支を比較すると、年間NEEに 110 g C m^{-2} の違いがみられる。この年次間差の主な要因は、2002年の収穫遅延により耕作期間のREが増加したことと、非耕作期間のGPP（ひこばえによる光合成）が減少したことである。このように、収穫や耕起などの水田管理の違いは CO_2 収支に影響を及ぼす。2001年のようにひこばえが成長し耕起が遅れた場合には、非耕作期間のGPPは耕作期間の14%に達し、年間の CO_2 収支を評価するうえで無視できない。また、2001年の非耕作期間のREは耕作期間の80%に達した（2002年はRE59%）。

表14に示したように、水田生態系の炭素収支構成要素のなかで主要な項は大気との CO_2 の交換（NEE）と収穫物搬出量であった。収穫物搬出量は、収穫前の穂重からの推定値と農家からの聞き取り調査に基づく推定値に $45\sim 60 \text{ g C m}^{-2}$ の差がみられた。メタン放出量は年間で $5\sim 6 \text{ g C m}^{-2}$ と小さく、年間の炭素収支を評価する場合には溶存態炭素収支とともに無視できる大きさであった。ただし、地球温暖化指数（GWP、積算期間100年）を用いて CO_2 に換算すると、メタン放出量は $42\sim 50 \text{ g C m}^{-2}$ に相当し、 CO_2 収支（NEE）に比べて無視できない大きさとなる。本研究の対象とした水田では数年毎に厩肥が投入されるが、これを除外して年間の炭素収支を比較すると、2001年は -103 g C m^{-2} 、2002年は -156 g C m^{-2} と、両年とも生態系から炭素が流出するという結果になった。

岡山県玉野市の八浜観測点で、本研究と同様の方法で観測されたNEEは、本観測点の2001年の結果とおおむね一致した（表14）。八浜観測点では、5月中旬に播種（乾田直播）、10月末に収穫と、本観測点よりも作期が1~2ヶ月遅い。また、水管理方法や収穫物の搬出量も本観測点とは異なる。今後、これらの水田管理法の違いが、両観測点の CO_2 収支、炭素収支の各構成要素にどのような影響を及ぼしているかについて、詳しい解析を進める予定である。

比較のため、本研究とは異なる手法を用いて水田の炭素収支を評価した研究例を表14に示す。いずれも、農業環境技術研究所（茨城県つくば市）内の試験圃場で、3年間にわたって実施された研究である。これらの圃場の作期は本観測点に比べて半月から1ヶ月遅く、栽植密度は 22.2 株/m^2 で本観測点よりも約20%大きかった。また、耕作期間中は圃場が常時湛水状態に保たれ、収穫時には稲わらも含めて圃場外に搬出された点も、本観測点とは異なる。小泉らの研究では、GPPは植物の生長解析法で、REは通気式チャンバー法で測定した。一方、早野らの研究では、通常条件と遮光条件で閉鎖式チャンバー法による測定を行い、GPPとREを分離評価した。二つの研究の結果には違いがみられるが、いずれも本研究に比べて年間のNEE（負値）が大きい。これは、耕作期間のGPPが大きく、非耕作期間のREが小さいためである。前者には栽植密度の大きさが、後者には収穫時の稲わら搬出が影響していると推定されるが、その影

響の定量的な評価や他の要因の影響についても検討が必要である。このように、これらの既往研究例では、本研究に比べて年間のNEEが大きいいため、稲わらを搬出しているにもかかわらず、年間の生態系炭素収支はほぼ均衡、または水田への流入という結果となっている。

表14 水田のCO₂収支と炭素収支の比較。単位はg C m⁻²。GPPとREは欠損データの補完に用いた回帰式による計算値なので、その和は実測値に基づくNEEとは一致しない。

構成要素	本観測点 2001年	本観測点 2002年	八浜（1999-2002年 の平均）	小泉ら ²²⁾	早野ら ²³⁾
CO ₂ 収支					
NEE（耕作期間）	-463	-398	-481	-608	-
NEE（非耕作期間）	262	308	241	70	-
NEE（年間）	-201	-91	-241	-537	-700
GPP（耕作期間）	-975	-1045	-	-1348	-1200*
GPP（非耕作期間）	-136	-34	-	-61	-
RE（耕作期間）	516	623	-	740	500*
RE（非耕作期間）	414	370	-	132	-
生態系炭素収支					
-NEE（年間）	201	91	-	537	700
メタン放出量	-5	-6	-	-	-10
溶存態炭素収支 ¹⁶⁾	-7	-5	-	-16	-20
収穫物搬出量**	-292 (-232)	-236 (-281)	-	-558***	-500***
厩肥	120****	-	-	0	0
炭素収支	17	-156	-	-20	170

*年間の値。

**収穫直前の穂の乾物重と、炭素含有率の実測値から計算した値。括弧内の数値は、農家からの聞き取り調査で得られた玄米重（表1）に粃殻の乾物重（玄米重の22%と仮定した²²⁾）を加えた値。

***稲わらも搬出しているので、本研究よりも大きい。

****厩肥の投入量の推定値（表1）と炭素含有率の実測値（24.8%）から推定した値³⁾。

力. 今後の課題

本観測点で、耕作期間のNEEの測定値に基づいて推定した純一次生産量（NPP）の積算値を、イネの乾物重の変化と比較した結果によれば、積算NPPが乾物重を下回った。エネルギー収支の不均衡（図52D）の原因のひとつと考えられる渦相関法によるフラックスの過小評価が、CO₂フラックスの測定でも起こっている可能性は排除できない。また、本観測点では圃場にCO₂の吸収源がない3月頃に、日中、下向きのCO₂フラックスが観測されることがある（本報告では異常値として処理した）。この時期は年間でもっとも顕熱フラックスが大きくなるため（図52B）、オープンパス型ガス分析計によるCO₂フラックス測定における密度補正項の大きさは最大で10 μmol m⁻² s⁻¹に達する。この大きさは、地温との関係から推定される土壌呼吸速度（図54a）の約5倍であり、CO₂フラックスを正しく評価するためには補正項を含めた厳密な測定が要求される。また、年間の約6割に達するCO₂フラックスの欠損データの補完が、NEEの評価にバイアス

をもたらしていないかどうかについても、十分な検討が必要である。このような渦相関法によるフラックス測定上の問題は、本観測点だけでなく、すべてのフラックス観測点に共通する問題である。水田観測点は森林の観測点と比べてフラックスの測定値と植物体乾物重変化の比較が容易であり、フラックス測定上の問題が炭素収支の評価に及ぼす影響の検討に適している。この点から本観測点は重要な意義を持っており、今後も観測を継続するとともに、これらフラックス測定上の問題点の解決を図っていきたい。

④ 本研究により得られた成果

ア. 本州中央部の慣行栽培が行われている水稻単作水田では、生態系が大気中のCO₂を吸収するのは3ヶ月間であり、残りの9ヶ月間は収支が均衡しているか、生態系からCO₂が放出されている。

イ. 本研究で得られた年間NEEは-90~-200g C m⁻²で、成長解析法やチャンバー法を用いた既往の研究結果と比べて吸収量が少なかった。また、気象の年々変動に伴う水稻の収穫時期の遅延や収穫後の耕起時期の違いにより、年間NEEは100g C m⁻²以上の年次間差を示した。

ウ. 水田生態系の年間炭素収支の主な構成要素はNEEと収穫物搬出であり、メタンの放出量や溶存態炭素の収支は年間の炭素収支では無視できる大きさである。ただし、地球温暖化指数を考慮すると、メタン放出量は生態系によるCO₂吸収量 (NEE) に対して無視できない。

エ. フラックス測定の結果に基づいて本水田観測点の年間炭素収支を評価すると、不定期に行われる厩肥投入を除いて、100~160g C m⁻²の流出となった。

⑤ 引用文献

- 11) T. Oikawa and A. Ito, Present and Future of Modeling Global Environmental Change: Toward Integrated Modeling, 207-219, TERRAPUB (2001)
"Modeling carbon dynamics of terrestrial ecosystems in Monsoon Asia"
- 12) 農耕地土壌分類委員会, 農業環境技術研究所資料, 17, 79p (1995)
「農耕地土壌分類第3次改訂版」
- 13) 大津正一, 筑波大学大学院環境科学研究科修士論文, 85p (2002)
「つくば地域の水田における炭素の動態と収支」
- 14) R. Kormann and F.X. Meixner, Boundary-layer Meteorology, 99, 207-224 (2001)
"An analytical footprint model for non-neutral stratification"
- 15) 斉藤誠, 横浜国立大学大学院教育学研究科修士論文, 83p (2003)
「水稻単作水田におけるCO₂収支の観測とその評価」
- 16) 濱田洋平, 田瀬則雄, 谷山一郎, 本報告書 (2003)
「水田の水収支・炭素収支および溶存態炭素の安定同位体組成」
- 17) C.J. Moore, Boundary-Layer Meteorology, 37, 17-35 (1986)
"Frequency response corrections for eddy correlation systems"
- 18) R. Leuning and J. Moncrieff, Boundary-Layer Meteorology, 53, 63-76 (1990)
"Eddy covariance CO₂ flux measurements of CO₂ fluxes by open- and closed-path CO₂ analyzers: Corrections for analyzer water vapour sensitivity and damping of

fluctuations in air sampling tubes”

- 19) Th. Foken and B. Wichura, *Agricultural and Forest Meteorology*, 78, 83-105 (1997)

“Tools for quality assessment of surface-based flux measurements”

- 20) E. Falge, D. Baldocchi, R. Olson, P. Anthoni, M. Aubinet, C. Berrnhofer, G. Burba, R. Ceulemans, R. Clement, H. Dolman, A. Granier, P. Gross, T. Gr nwald, D. Hollinger, N. -O. Jensen, G. Katul, P. Keronen, A. Kowalski, C. T. Lai, B. E. Law, T. Meyers, J. Moncrieff, E. Moors, J. W. Munger, K. Pilegaard, . Rannik, C. Rebmann, A. Suyker, J. Tenhunen, K. Tu, S. Verma, T. Vesala, K. Wilson, S. Wofsy, *Agricultural and Forest Meteorology*, 107, 71-77 (2001)

“Gap filling strategies for long term energy flux data sets”

- 21) A. Miyata, *Bulletin of the National Institute of Agro-Environmental Sciences*, 19, 61-183 (2001)

“Observational study on methane exchange between wetland ecosystems and the atmosphere”

- 22) 小泉博, 別宮有紀子, 中台利枝, 研究成果339, 農林生態系を利用した地球環境変動要因の制御技術の開発, 農林水産技術会議事務局, 55-59 (1999)

「土壌 作物系における炭素循環過程の動態解明」

- 23) 早野恒一, 竹中真, 上村順子, 環境省地球環境研究総合推進費終了研究課題「地球温暖化に係る二酸化炭素・炭素循環に関する研究」報告書, 43-50, 国立環境研究所ほか (1996)

「水田における炭素循環・収支の定量的解析」

B. 岡山サイト

① 研究目的

本研究では、西日本の典型的な耕作がなされている岡山県南部の水田を対象に、CO₂を中心とする炭素収支、エネルギー収支を長期的に観測し、その特徴を明らかにすることを目的とする。結果は、東日本で同様の観測を実施するつくば市真瀬の観測点の結果と比較する。なお、土壌－灌漑水－水稻群落－大気系において、灌漑水が二酸化炭素の流れに果たす役割についての成果は、Kishida et al.(2001)²⁴⁾がまとめている。

② 研究方法

ア. 観測点

観測は岡山大学農学部附属八浜農場(34°32'N, 133°56'E)で行った。八浜農場は、岡山市の南方約 20 km、岡山県玉野市の児島湾干拓地にあり、面積は約 300 × 300 m² である。周辺は、私有地であるが、同じ耕作形態の水田が広がっている(図58)。卓越風は夏には南東～南西、冬には北西であり、最短の吹送距離は南方向で約500mである。1998年に、農場内の水田の一角に1.8mの高度にフラックス測定装置を、その他の測器類を2.3mに設置して観測を開始した。

八浜農場では、5月中旬に稲粃(品種:アケボノ)が播種(2.5gm⁻²)され、約2週間後に発芽する。6月中旬に水稻の高さは0.15mになり、灌漑水が導入される。特に7月下旬までの水稻の

成長は著しい。8月下旬には出穂し、9月中旬に平均草高は1mに達する。10月下旬に稲は収穫され、0.15mの刈り株が残される。収穫時に出た稲藁は別の家畜農場の飼料として持ち出される。地表面は6月から10月までの5ヶ月間は水稻群落で覆われ、11月から翌年の3月までの5ヶ月間は0.15mの稲の切り株が残され、3月には切り株は土と共に鋤き込まれ裸地状態となる。非耕作期の地表面は裸地であり、冬季には時々降雪は観測されるが、積雪が見られることは稀である。八浜農場における地表面状態の変化を図59に示す。7月期の水稻の成長が特に顕著である。耕作期間の施肥は化学肥料（成分N、 P_2O_5 、 K_2O ）のみによって行われ、炭素を含有する肥料は投入されない。

イ. 観測方法

熱収支に関係する観測項目は下表の通り。風速、気温、水蒸気、二酸化炭素などのアナログ変動信号をカードタイプのA/D変換器(National Instruments, DAQ700)を用いて12ビットで0.1秒毎にサンプリングしノートPCに記録した。純放射、気温、地中温度、地中熱流量、水温などの信号は30秒毎にサンプリングし、別のデータロガーに記録している。観測開始時から2001年11月まで渦相関法で用いたオープンパス型ガス分析計は3ヶ月毎に実験室に持ち帰り CO_2 に対する校正を行った。水蒸気に関しては同時に測定している乾球・湿球温度計の測定値から算出した水蒸気変動により1ヶ月毎に校正係数を切り替えている。2002年5月より導入したLi7500については定期校正を行わず、播種・収穫時の感度検定のみにとどめている。測定項目および使用した測器、設置高度を表15にまとめる。

ウ. データ処理の方法

平均値および統計量の計算処理は30分を区切りに行った。フラックス計算の処理の流れは、①主風向および吹上げ補正（平均のVおよびWがゼロになるようにする）、②温度変動に対する横風補正、③1次トレンドの除去、④共分散値の計算、⑤顕熱フラックスに対する水蒸気補正、⑥潜熱および CO_2 フラックスに対する密度補正（WPL補正）である。超音波風速計の素子センサー距離およびガス分析計の赤外線光路による高周波成分の平滑化に対する補正は行っていない。E009に対する水蒸気の影響（Cross-Talk）は無視した。

フラックスデータの品質管理については、時系列の目視による異常値の除去（降水時のデータ欠測、夜間弱風時の異常値など）とMonin-Obukhovの相似則による敷居値テストを行った。尚、本報告で示す年間収支等に用いる日平均値データについては、データ欠損率10%以上の場合、平均値算定は行わず欠測日扱いとしている。

③ 結果と考察

ア. フラックスの季節変化

(ア) 熱フラックス

非耕作期の顕熱フラックスの日平均値はプラスであり、1月から4月にかけて日数とともにほぼ線型に増加し、4月末の時点で $80\sim 100 Wm^{-2}$ に達する(図60a)。5月中旬に播種されると日中のフラックスが低下することから、平均値も低下し、最成育期を迎える7月中旬にはほぼゼロとなる。さらに草高の成長に伴って下向きに転じ、9月末までの平均値が約 $-20 Wm^{-2}$ となる。その後10月下旬の刈入れ期に向かって再び線形的に増加し、 $20\sim 30 Wm^{-2}$ 程度にまで回復する。刈入れ後は日照時間の減少とともに平均値も減少し、12月下旬～1月上旬に再びゼロとなる。

表15 測定項目と測器および設置高度

項目	測定要素	機器(メーカー)	取付高度	測定時期
渦相関法	風速変動	DA600 (Kaijo)	1.8m	1999. Jan-
	温度変動			
	湿度変動	E009B (Advanet)		1999. Jan-2001. Nov (E009B)
	CO2濃度変動	Li7500 (Li-cor)		2002. May- (Li7500)
傾度法	気温	HMP35D, HMP45A (Vaisala)	1.0m, 4.3m	2002. May-
	相対湿度			
	CO2濃度	URA106 (Shimadzu)		1999. Jan-
	CH4濃度	GA-360E (Horiba)		2000. Aug. -
その他	純放射	CN-11 (Eko)	2.3m	1999. Jan-
	地表面温度	Q185 (Optex)	2.3mから迎角45°	
	乾球・湿球温度	TS-PT (IioElectric)	2.3m	1999. Jan-2001. Nov
	標準温・湿度	HMP35D (Vaisala)		
	地表面熱流量	MF-18 (Eko)	-0.01m	2002. May-
	地中温度	Thermo-Couple	-0.01, 0.05, 0.1, 0.2m	

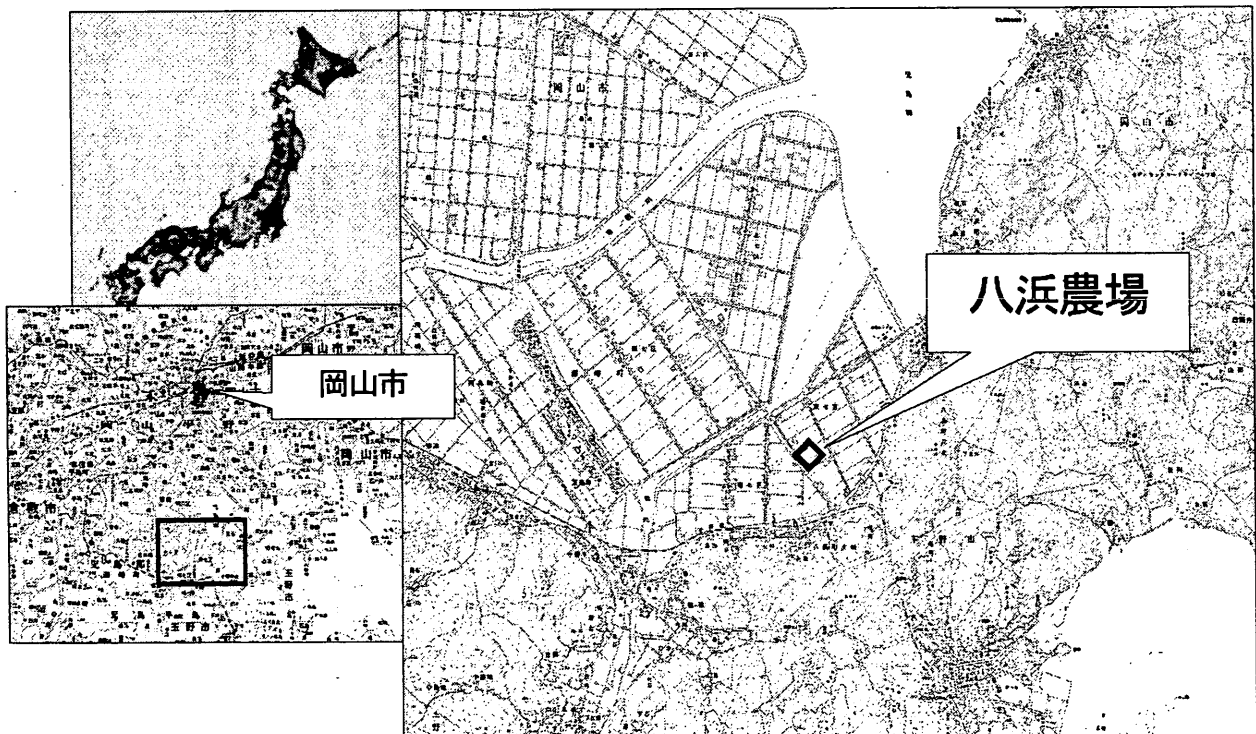


図58 観測地と周辺の地形

潜熱は顕熱に比べて一年間を通じてばらつきが大きい(図60b)。1～2月は比較的ばらつきは少なく、 $80 \sim 40 \text{ Wm}^{-2}$ に減少傾向である。その後3～6月は最もばらつきの大きい時期であり、 $50 \sim 200 \text{ Wm}^{-2}$ の間で変動する。この時期は降水により土壤水分が変動しやすく蒸発量に大きな影響を与えているものと考えられる。播種後～最成育期には日中のフラックスが増加することから、日平均値も増加し7月下旬～8月上旬に約 200 Wm^{-2} に達する。8～10月は日数と共に

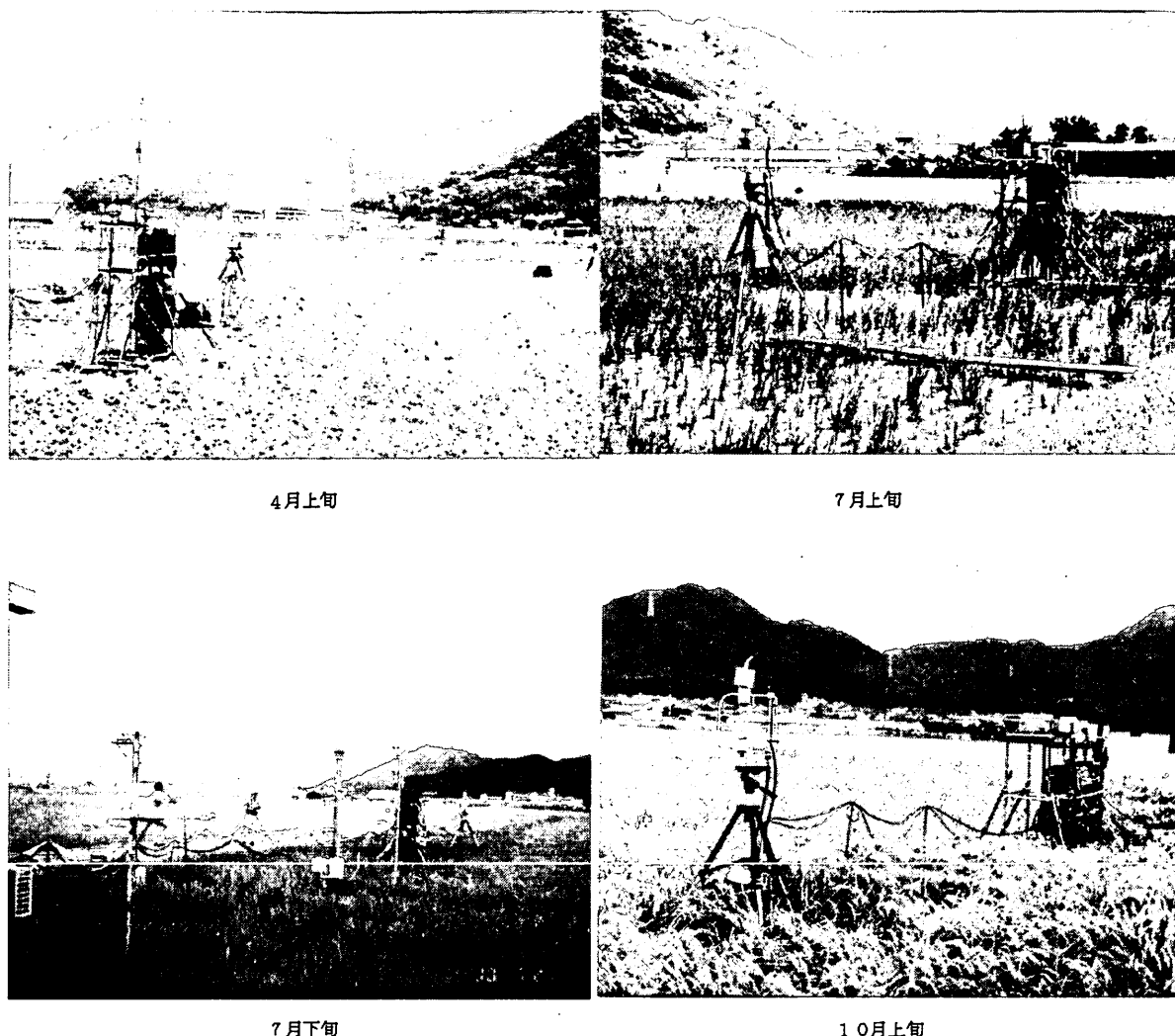


図59 地表面状態の変化の様子

線型に減少傾向となるが、この時期は一年を通じて最も変動が小さく安定している時期である。刈入れ後は顕熱フラックスと同様に日照時間の減少とともに減少し、12月末に最小値約 50Wm^{-2} となる。

(イ) CO_2 フラックス

1999–2002年における二酸化炭素フラックス日平均値の季節変化（図61a）の特徴は次のようにまとめられる。

- 6月下旬から7月下旬にかけて、水稻の生育状態を反映して鉛直下向きの CO_2 フラックスの増加が顕著。（昼間の最大下向き輸送量の増加率 $\approx 0.35\text{mgm}^{-2}\text{s}^{-1}/5\text{days}$ ；水稻の草高は40cmから70cmとなる）
- 8月上旬から9月中旬までは、 $-0.15 \sim -0.35\text{mgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で推移。
- 9月下旬から10月上旬にかけて、水稻群落の CO_2 取り込み量は低下。10月下旬には CO_2 フラックスが上向きとなる。
- 水稻収穫後、圃場は CO_2 を放出。
- 水稻生育時の CO_2 吸収量は灌漑水の有無で異なる。

f) 裸地状態時のCO₂放出量は地表面温度の上昇と共に増加。

g) CO₂の年間収支

耕作期間 5ヶ月間のCO₂吸収量：1.88kgm⁻²

非耕作期間 7ヶ月間のCO₂放出量：1.00kgm⁻²

耕作地はCO₂を 0.88 kgm⁻²y⁻¹ (= 240gCm⁻²y⁻¹)の割合で固定。

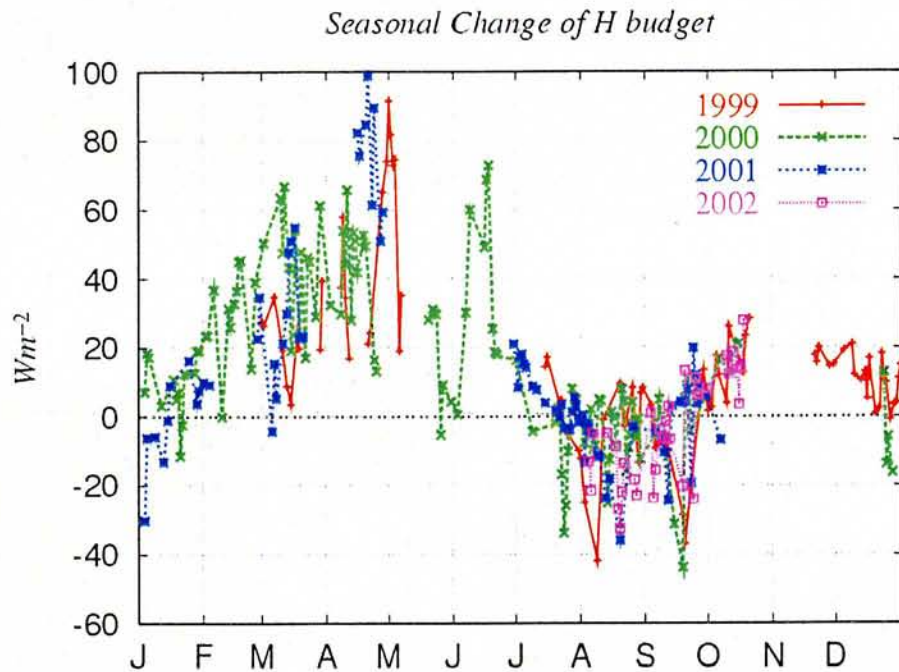


図60a 顕熱フラックスの日平均値の季節変化

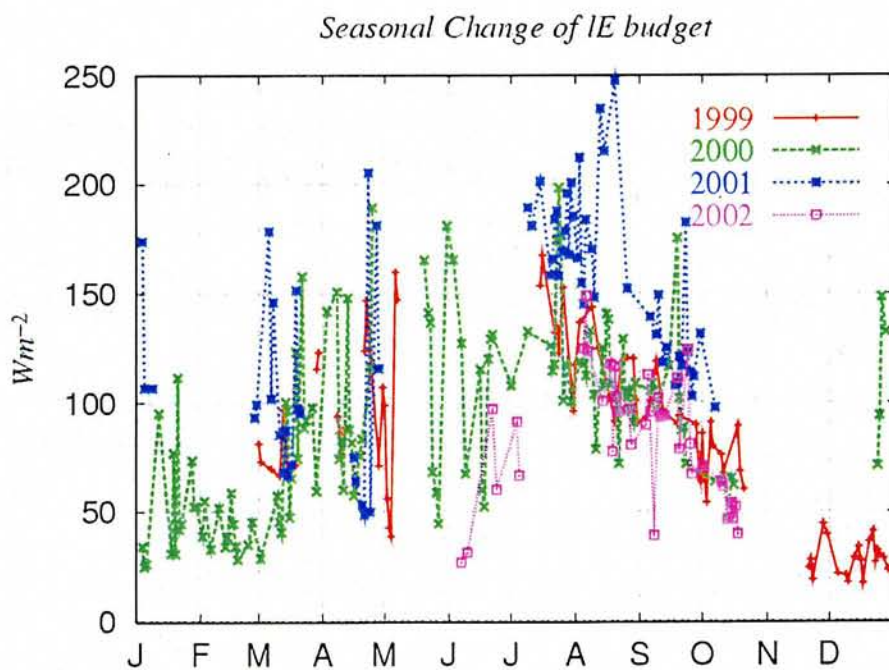


図60b 潜熱フラックスの日平均値の季節変化

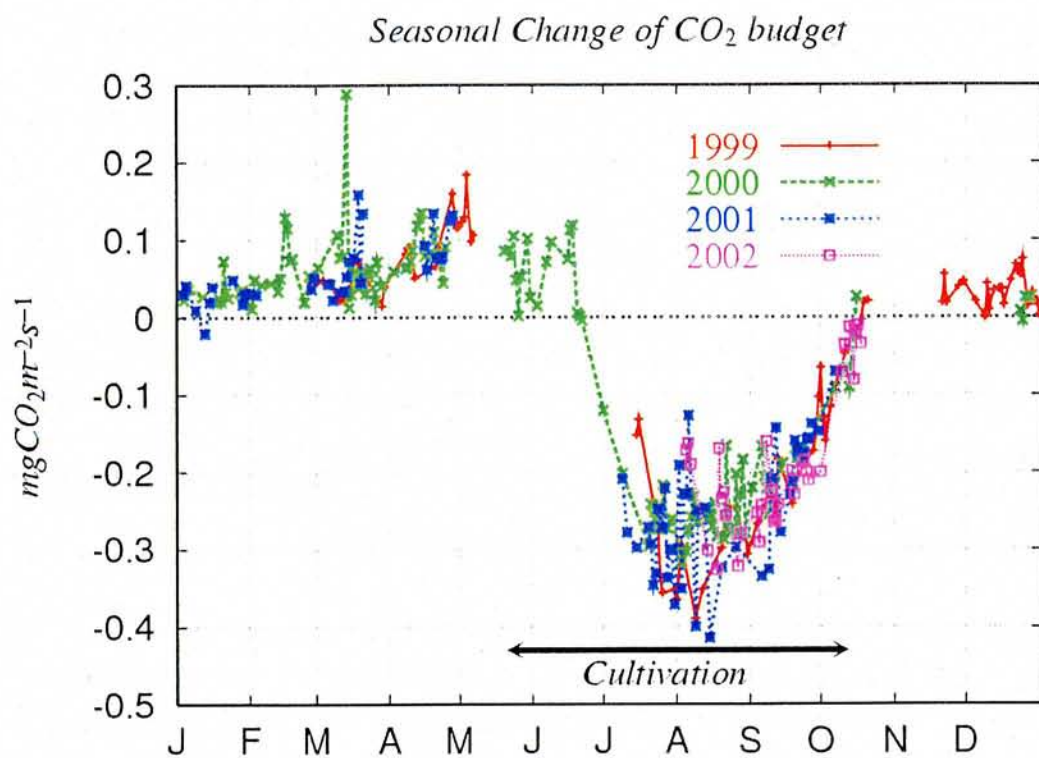


図61a CO₂フラックスの日平均値の季節変化

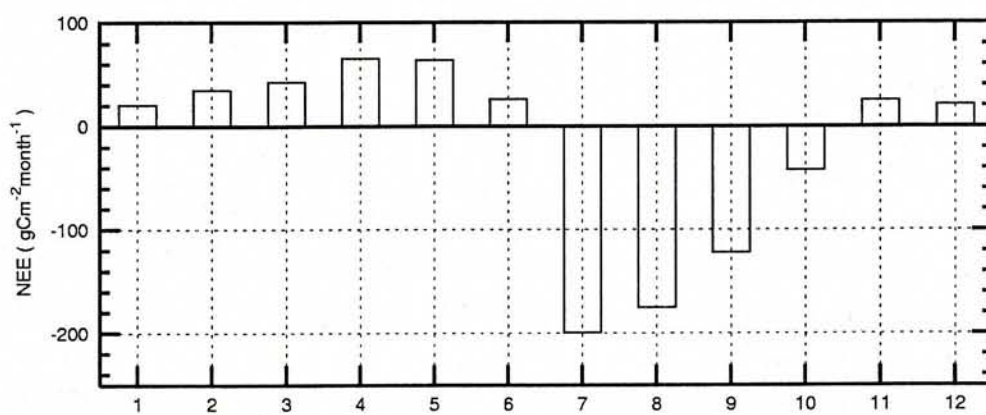


図61b NEEの月平均値の季節変化

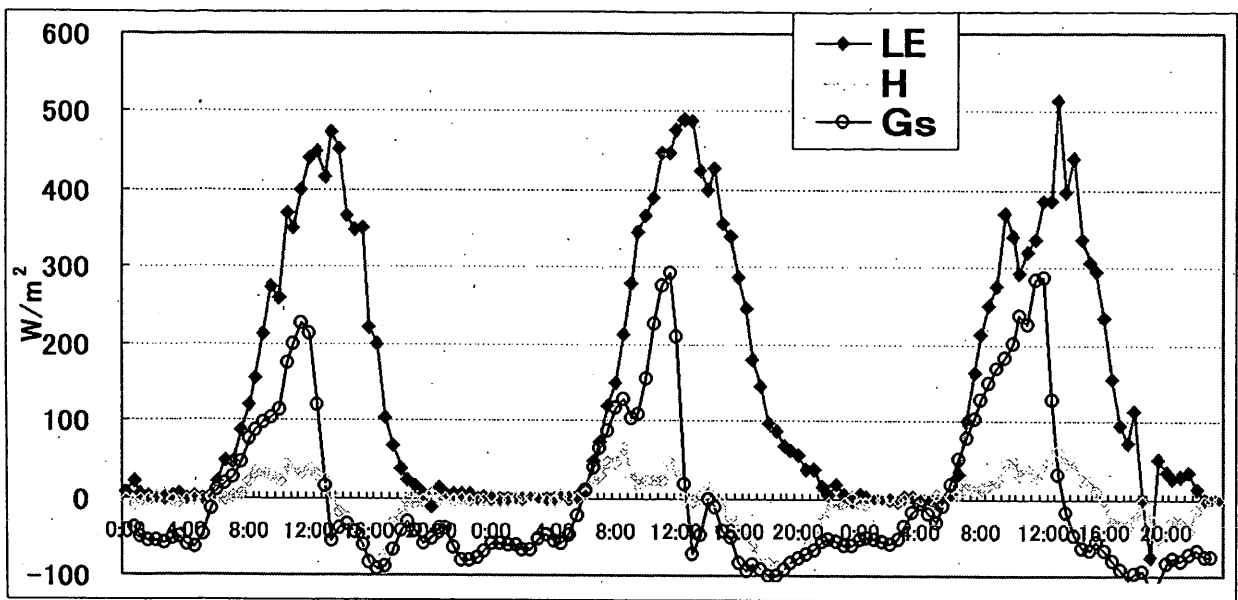


図63a 灌漑水のない日のH, LE, Gs (8月4~6日)

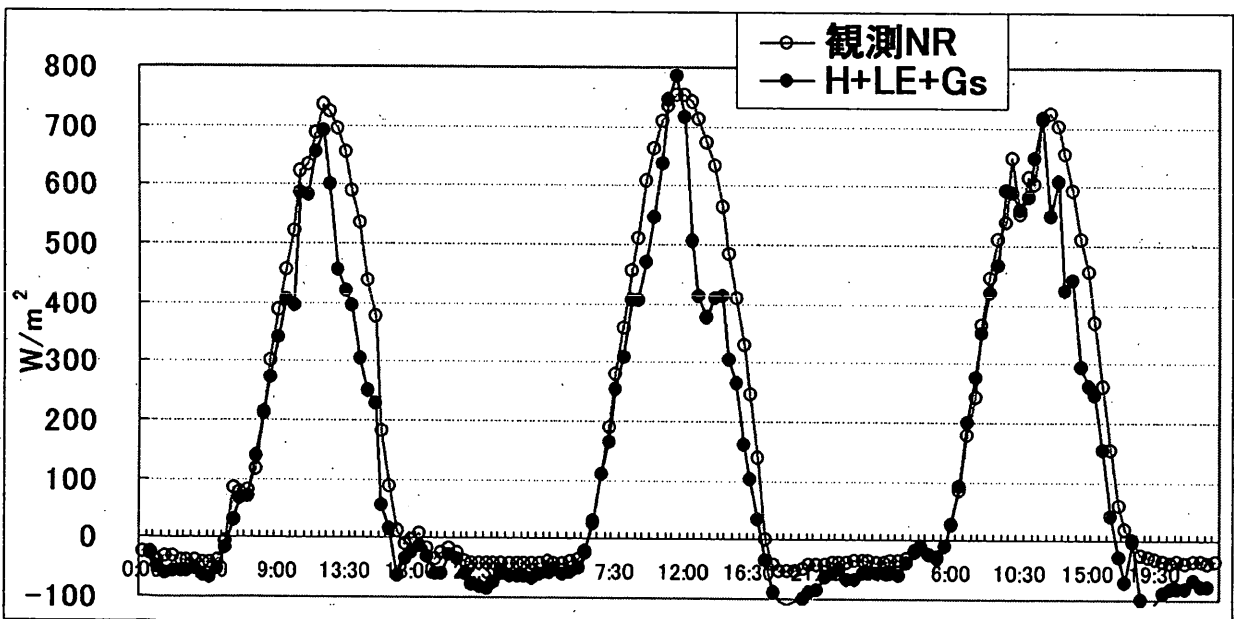


図63b 灌漑水のない日のNRとH+LE+Gs (8月4~6日)

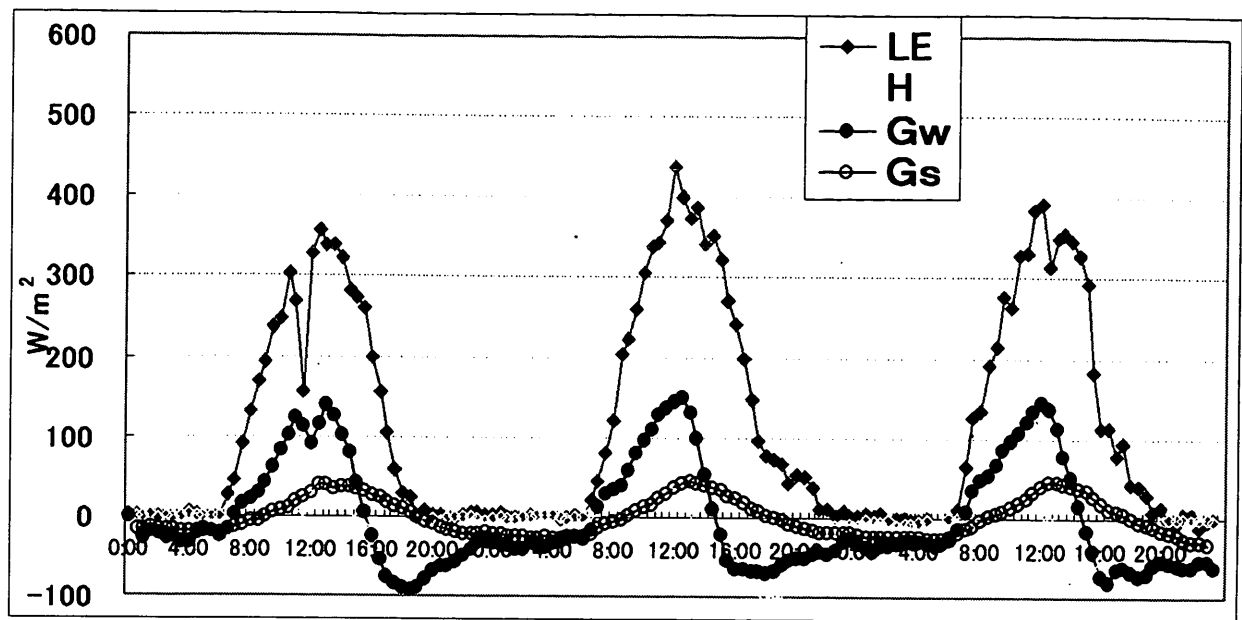


図64a 灌漑水のある日のH, LE, Gs, Gw (9月3～5日)

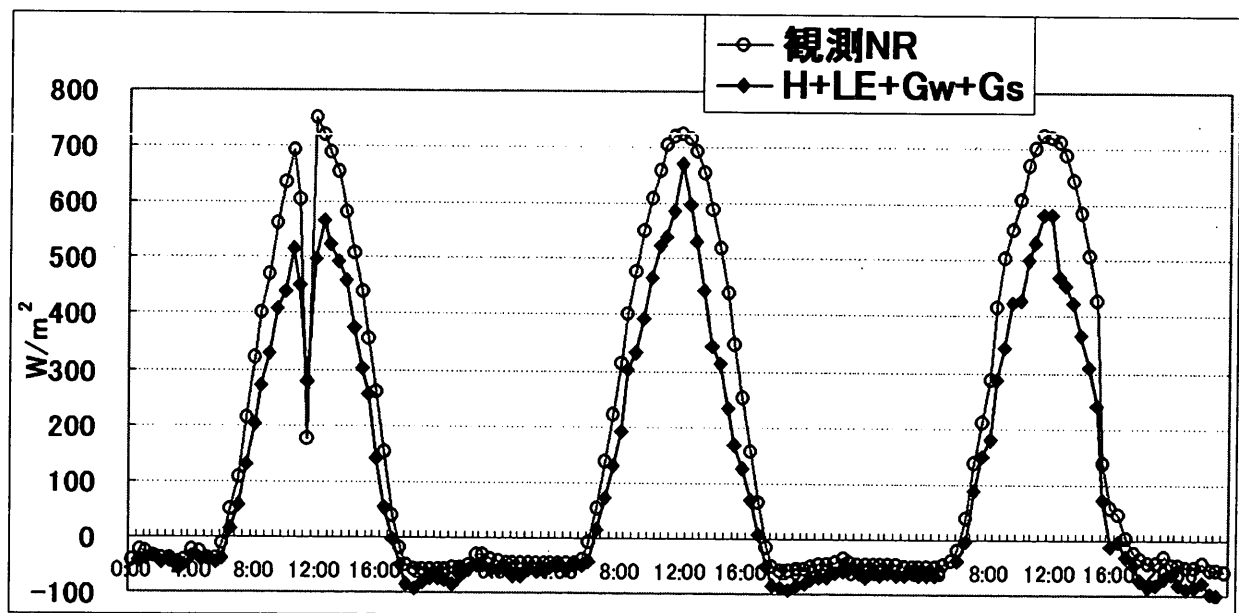


図64b 灌漑水のある日のNRとH+LE+Gw+Gs (9月3～5日)

●灌漑水のある場合

灌漑水のある日の例として、2002年9月3～5日の結果を示す。水田には深さ約15cmの灌漑水が存在していた。LEの最大値は約400 Wm^{-2} であり、Gw, Gsの最大値はそれぞれ約150 Wm^{-2} , 約45 Wm^{-2} である(図64a)。地中への伝導熱の大部分は灌漑水の層に吸収されており、灌漑水貯熱量の最大値は土壌貯熱量その約3倍である。NRとH, LE, Gw, Gsの合計値の比較を図64bに示す。Gwは12時以後で低下しているが、Gsは13時から14時にピークを示すために、H, LE, Gw, Gsの合計値はNRの約85%であるが、日変化傾向はよく似ている。今回、観測デー

タに制限されたため、土壌表面から5cmの水温データのみを用いて灌漑水を1層として貯熱量を計算したが、灌漑水の水深が15cmあるため、灌漑水を2層(上5cm,下10cm)として計算すると、精度を一層上げることが可能であると考えられる。

(ウ) 今後の検討事項

●土壌の比熱と密度について

今回の計算では含水率40%として土壌の比熱と密度を実測から評価し、次の値を得た。

$$\rho_s = 2.30 \text{ g/ml}, \quad \rho_s = 2.35 \text{ J/gK}$$

計算では全層でこれらを定数として扱ったが、より正確な評価のためには土壌比熱の鉛直分布を実測することで更に精度を上げることが可能になると考えられる。

●群落の貯熱量について

G_p は、群落気層の平均気温を θ 、層の平均比熱を C 、平均質量を m とすれば、

$$G_p = C \cdot m \cdot d\theta/dt$$

で評価される。 θ は群落中0.5mの高さの測定値を利用した。 $C \cdot m$ の値は水稻体の比熱と密度で決まる。水稻水分を80%、実際の水稻植栽密度を考慮すれば、八浜農場の水稻群落の8-9月の $C \cdot m$ は約 $20 \times 10^3 \text{ J m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ 程度である。これに群落平均気温の時間変化率 $d\theta/dt$ 値を乗じると、 G_p は最大でも約 10 W m^{-2} であり、 G_s 、 G_w に比べると小さいものの決して無視できる量ではなくなる。

●純放射量の測定精度について

今回の一連の熱収支問題を検討する過程において、熱収支が閉じない原因は純放射計の測定感度に問題があるのかも知れない、という疑念が生じた。観測で用いたのはFN-11(英弘精機)であったが、例えば放射量の理論式(Stull,1991)²⁶⁾を使って、八浜における晴天(雲量ゼロ、アルベド0.2)条件下でのNRを評価してみた。12時におけるNRの計算値(最大値)と実測値をまとめると下のようになる。

単位(W m^{-2})	実測値	計算値
8月5日	760	729
9月5日	730	654

実測値は、計算値に較べ8月の場合は約5%、9月の場合は約10%大きい。実測のNRをこの割合だけ小さくすれば、熱収支のインバランス問題は大きく改善されることになる。

④ 本研究により得られた成果

岡山大学附属の水田観測も開始から4年が経過しようとしている。地上部での CO_2 フラックスの経年変化の傾向は把握できるようになった。八浜農場での年間炭素収支、水田での熱収支について次のことが分かった。

八浜農場での年間の炭素収支

水稻生育時 5ヶ月間のCO₂吸収量：1.88kgm⁻²

裸地状態時 7ヶ月間のCO₂放出量：1.00kgm⁻²

耕作地はCO₂を 0.88 kgm⁻²y⁻¹ (= 240gCm⁻²y⁻¹)の割合で固定。

土壌各層の温度変化を実測し、水田での熱収支の各項を評価した。

- 灌漑水の無い場合、午前中のH、LEとGの合計はほぼcloseした。午後に熱収支各項の合計がNRより15%程度過小評価だったのは、HとGの急低下が主な要因である。
- 提案したモデルは概ね妥当な結果を示した。モデルの精度を上げるには、
 - 1)土壌比熱の鉛直分布の実測
 - 2)灌漑水の温度分布を考慮した灌漑水貯熱量、たとえば2層モデルの採用
 - 3)植物群落による貯熱量の正確な評価の3つをさらに考慮する必要がある。
- 熱収支インバランス問題を研究する場合、最も基本的な測定量である純放射量の測定精度を再検査する必要がある。

⑤ 引用文献

- 24) Kishida, T., Iwata, T., Miura, T., Ohtaki, E., Nishimura, K., Higuchi, Y., Ohtou, A., Harazono, Y. and Miyata, A., : Factors affecting the diurnal variation of carbon dioxide concentration in standing water in a rice field. J. Agric. Meteorol., 57, 117-126 (2001).
- 25) Seo T. 1958: A microclimatological study of thermal exchange at the earth's surface (II). Res. Rep. Kochi Univ. Vol. 7, 1-39.
- 26) Stull, R. B. 1991: An introduction to boundary layer meteorology, 251-294.

(6) 暖地牧草地サイト

① 研究目的

九州・沖縄地域は、我が国の主要な畜産基地であり、重要な畜産物の供給基地であるため、作物別作付割合は水稻の 36%に続いて飼料作物が 19%と 2 位である。その飼料作物は温暖な気候を利用して周年のトウモロコシ・イタリアンライグラス体系が主流を占めている。

そのため、農耕地での炭素循環を考える上で、上記の温暖牧草地生態系における CO₂、エネルギーフラックス量の季節変化を測定し、解析を実施した。

② 観測サイトの概況と観測方法

ア. 観測サイトおよび対象作物の概要

観測サイトは、熊本県菊池郡西合志町九州沖縄農業研究センター内(31° 44' 05" N, 131° 00' 50" E、標高 185m)の輪作飼料用作物畑である。観測期間に供試した飼料作付体系の播種および収穫日はイタリアンライグラス(冬作：播種日 2000 年 10 月 16 日、2001 年 10 月 3 日、2002 年 10 月 12 日、収穫日：2001 年 4 月 10 日、2002 年 4 月 8 日、2003 年 4 月 11 日)～青刈トウモロコシ(夏作：播種日 2001 年 5 月 11 日、2002 年 5 月 7 日、収穫日 2001 年 8 月 20 日、2002 年 8 月 19 日)である。サイト面積は東西 400m×南北 300m であり、主風向に位置する西側周囲の畑地はほぼ同様な飼料作付体系で、南北側は宅地および当研究センターの施設に囲まれており、主方向に対して吹走距離は約 1km である。耕地は土壌が火山灰土壌(黒ボク土壌)で平坦な畑地である。トウモロコシは畝間 0.80m、株間 0.20m、イタリアンライグラスは 0.05m の条播で播種されており、耕種方法は熊本県の標準栽培管理方法に従った。

イ. 観測方法

CO₂、エネルギーフラックス量の観測は、2000 年 5 月にサイト用のタワーを設置し、観測の準備を行い、2000 年冬から開始し 2003 年 4 月まで継続しているが、観測サイトの概況を図 65 に示す。熱収支法、渦相関法および傾度法による観測項目の計器類は供試圃場に図 65 に示すように配置した。

微気象観測項目は次の通りである。風速計(牧野応用測器：AF750 型)は 0.6、1.4、3.0、4.0、6.0、8.0m、温湿度計(VAISALA:HMP45A 型)は 0.6、1.4、3.0、4.0、6.0、8.0m、CO₂ 濃度計(LI-COR：LI-800 型)は 0.6、1.0、1.4、3.0、4.0、6.0m の高さである。土壌水分量(東北電子:TRIME-FM3 型)と地温(熱電対)は表層から 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.8、1.0、1.6m の深さに埋設した。放射関係は日射量(英弘精機:MS-401 型)が 3.5m、アルベドメータ(英弘精機：MR-22 型)が 3.5m、純放射量(英弘精機:MF-11 型)が 3.5m の高さに設置し、地中熱流板(英弘精機:MF-9L)は表層から 0.02m 深さに 3ヶ所である。これらのデータはデータロガー(CAMPBELL:CR23X)に接続し、5 秒間隔のサンプリングで 30 分間平均値で記録した。なお、光合成有効放射量は、サイトから約 2km 離れた熊本県農業研究センター気象観測露場のデータを使用した。

渦相関法のための計測器は、超音波風速計(Kaijo:DA-600 型)、赤外湿度変動計(Kaijo:AH-300 型)および炭酸ガス濃度変動計(Kaijo:KC-100 型)を測定高度 5m に配置し、スパン 0.2m で、サンプリング間隔 10Hz で、デジタルレコーダ(TEAC:DR-M3MK2)に連続記録した。

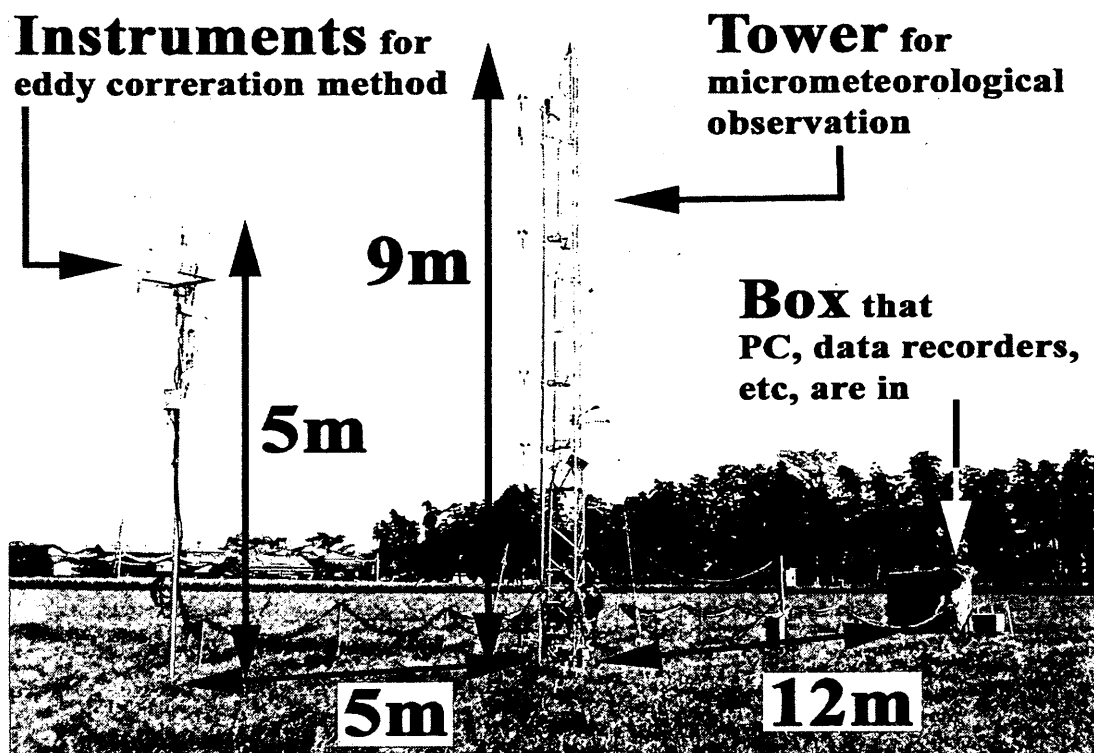


図 65 暖地牧草地生態系サイトの観測概況図

作物の生育調査は、定期的に葉面積指数をキャノピーアナライザー(LI-COR:LI-1200 型)で測定し、生体重、草丈および乾物重の測定を行った。土壌中の CO_2 フラックス量は 2002 年 4 月からセンサー(VAISALA:GMTP220 型)を土壌中に 10、20、50cm 深度に埋設して、 CO_2 濃度の連続観測を行い、その濃度勾配法により求めた。

③ 研究成果

ア.1999 年冬から 2002 年冬の気象概況

観測サイトにおける気象概況は 1999 年の冬が並温・少雨・多照で寒暖変動の大きい冬であり、2000 年は年間を通して高温傾向であり、梅雨期間が少雨である。秋は高温と不順な天候(多雨寡照)で経過し、台風の上陸もなかった(年平均気温平年差 $+0.8^\circ\text{C}$ ・年降水量平年比 87%・日照時間平年比 109%)。次に、2000 年の冬は高温・少雨・多照な初冬から 2001 年初めは寒暖変動が大きく、多雨な冬季で、春季が記録的な少雨傾向で推移し、夏季は高温である。2001 年 10 月冬作の秋季から初冬は気温、降水量が平年並みで推移し(年平均気温差 $+0.5^\circ\text{C}$ 、年降水量平年比 90%、年日照時間平年比 104%)、2002 年 1~2 月も暖冬傾向が続き春季から夏季の季節の進行が早まる傾向であった。また、夏季の気象は、梅雨期の降水量が少なく、平年の 52%であり、8、9 月がそれぞれ平年の 34.6%、31.4%である。逆に、6、7、8 および 9 月の日照時間は平年に対してそれぞれ 147.2、104.2%、117.4%および 133.5%である。観測サイト付近では 8~9 月にかけて昨年に続き少雨多照の干ばつ傾向であった。このように、観測期間中では台風の襲来がなく、トウモロコシ群落等の倒伏破損が見られない状況で、観測は順調であった。

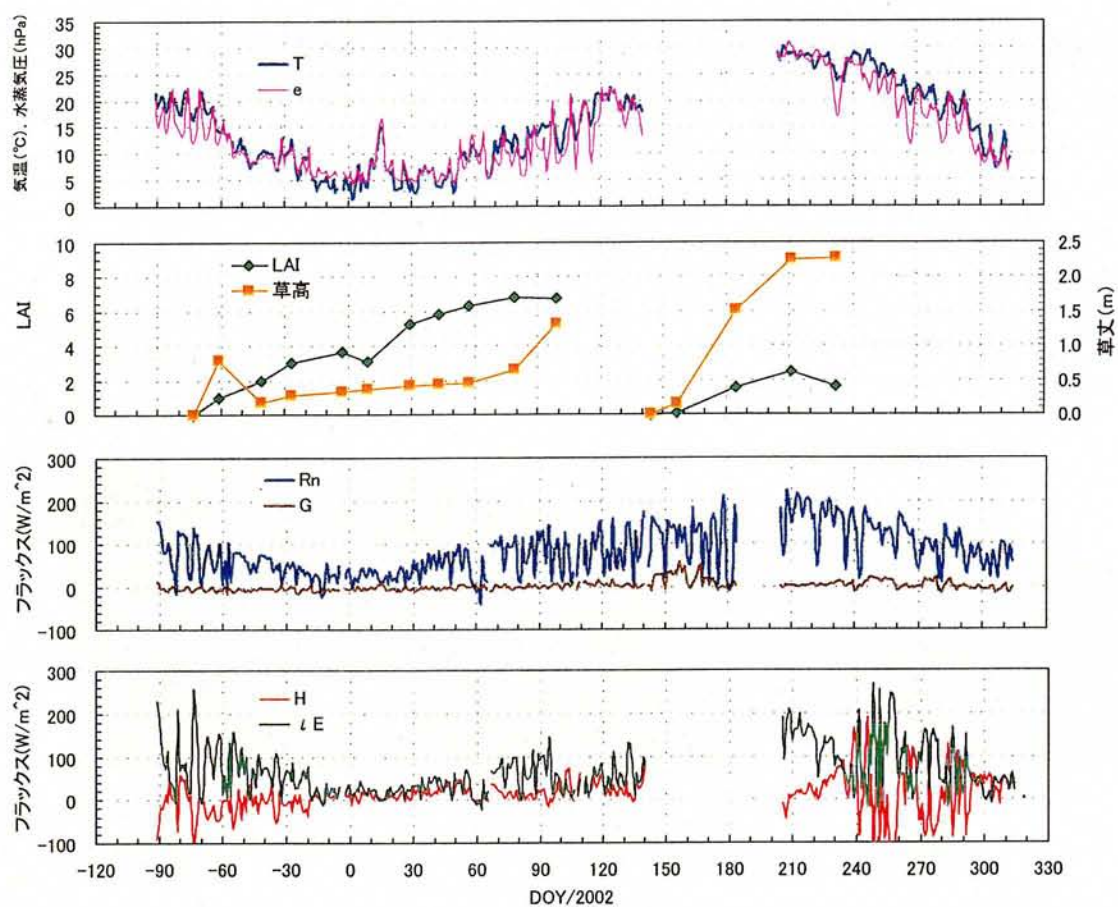


図 66 暖地牧草地サイトでの気温、水蒸気圧、草丈、葉面積指数および熱収支項の季節変化

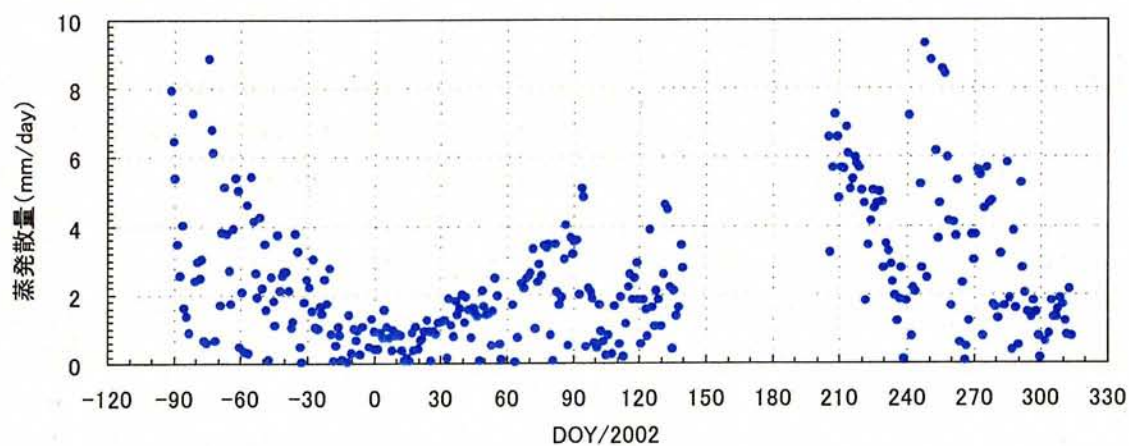


図 67 暖地牧草地生態系における蒸発散量の季節変化

イ.熱収支項、蒸発散量の季節変化

図 66 に 2002 年度の気温、水蒸気圧、草丈、葉面積指数および熱収支項の季節変化を示す。作物の生育はイタリアンライグラスの葉面積指数が 0~7.0 に変化し、トウモロコシが 0~3.0 付近であった。エネルギーフラックス量の季節変化は潜熱フラックス量が純放射量に匹敵する量で、顕熱フラックス量が負になる場合が多く、秋季から冬季でその傾向が多かった。また、地中熱量は年間を通して 0 付近であり、きわめて小さく推移した。図 67 に示すように日蒸発散量 ET の季節変化をみると、イタリアンライグラスにおける低温期の生育初期では、ET は約 1~3mm/day を示し、生育中期においては、日射量の減少、気温の低下などで、ET は 1mm/day 前後で推移した。その時の作物係数 K_c は 0.4~0.6 となった。温度上昇期にあたる生育後期には日射量の増加、気温の上昇などによって ET は増加傾向を示し、刈取直前には 4mm/day を示した。この時 K_c も増加し刈取直前には約 0.9 まで増加した。また、生育期間中の平均蒸発散量は 1.7mm/day であった。

ウ.夏作トウモロコシ群落の熱収支の日変化

1999 年 10 月から 2000 年 4 月 11 日までにおけるイタリアンライグラスの生育時期別熱収支項の日地変化は、潜熱量が各生育時期において純放射量に匹敵する量であり、顕熱量はわずかであった。また、2001 年におけるトウモロコシ群落の生育時期別熱収支の日変化を図 68 に示す。ボーエン比は生育が進行するにしたがって負の値を示したが、収穫時期頃の乾燥条件下では正の値を示した。葉面積指数が 3 以上での盛夏期は潜熱量が純放射量とほぼ同程度の値を示し、旱魃条件下では潜熱量が小さくなり、顕熱量が正の値を示した。8 月 29 日の収穫後裸地条件下では、土壌水分張力が 2.91 と乾燥状態であり、潜熱量はきわめて小さく、地中熱量とほぼ同じ値で推移し、顕熱量が午前中プラス側で潜熱より小さく、午後から潜熱より大きい値を示した。

エ.作物群落内 CO_2 フラックス量の季節変化

2000 年度のイタリアンライグラス畑での CO_2 フラックス量は季節の進行とともに増加する傾向を示し、11 月~12 月で平均 $-341\text{mmolCO}_2/\text{m}^2\text{day}$ であり、本格的な低温期では $-182\text{mmolCO}_2/\text{m}^2\text{day}$ である。また 3 月の温度上昇期には平均 $-364\text{mmolCO}_2/\text{m}^2\text{day}$ の値を示した。夜間では放出型で平均 $45\sim 68\text{mmolCO}_2/\text{m}^2\text{day}$ である。2002 年度の事例として図 69 に示すように、4 月の収穫時期直前で平均約 $-200\text{mmolCO}_2/\text{day}\cdot\text{m}^2$ であった。夏作のトウモロコシ畑の CO_2 吸収量は播種後から徐々に増加し、吸収量の最大値が約 $-400\text{mmolCO}_2/\text{day}\cdot\text{m}^2$ となり、収穫直後の裸地状態では $-100\text{mmolCO}_2/\text{day}\cdot\text{m}^2$ で吸収状態であった。この原因は畑地の雑草が吸収したものと思われる。また、4m 高度での日平均 CO_2 濃度平均値は冬季に濃度が小さく平均 370ppm で、温度上昇とともに上昇し、夏季の濃度が高い傾向で約 420ppm の値を示し、冬季の植生の活発度が暖冬のために高くなったと考えられる。

オ.作物群落内の CO_2 フラックス量の日変化

イタリアンライグラス畑の生育時期別 CO_2 フラックス量の日変化を図 70 に示す。9 月 27 日の裸地条件下では CO_2 フラックス量は放出型の正值を示し、日中の最大値が約 $0.2\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。 CO_2 フラックス量は生育が進むにしたがって日中の吸収量が増加し、12 月 21 日での最大値

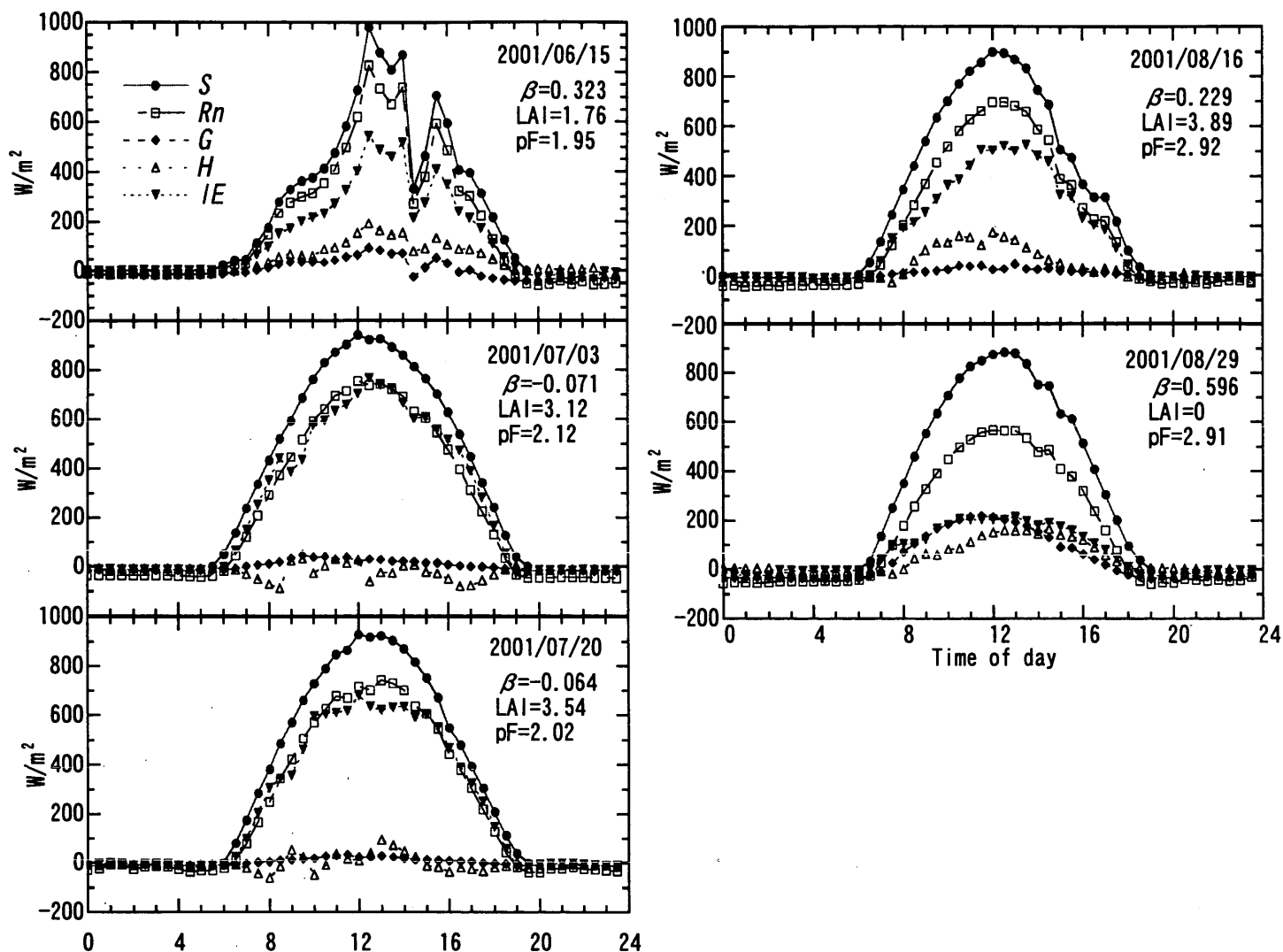


図 68. トウモロコシ畑における生育期間別の各熱収支項の日変化

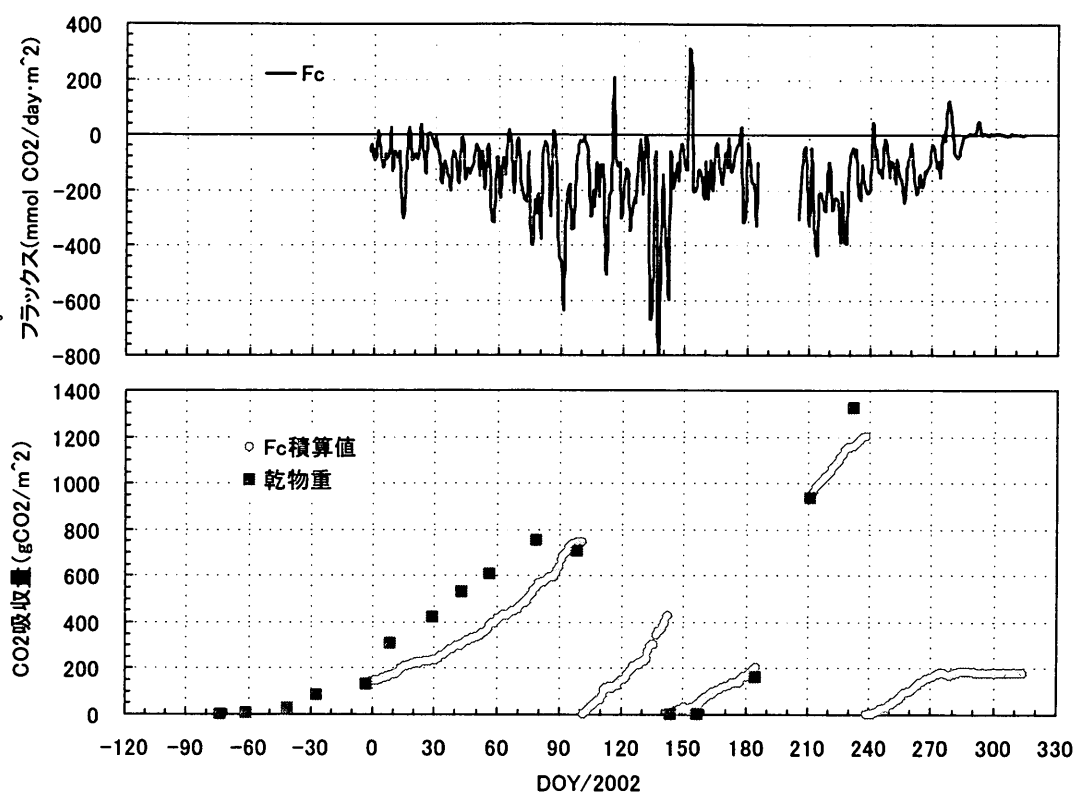


図 69 暖地牧草地群落における CO₂ 吸収量及び乾物重中に含まれる CO₂ 積算量の季節変化

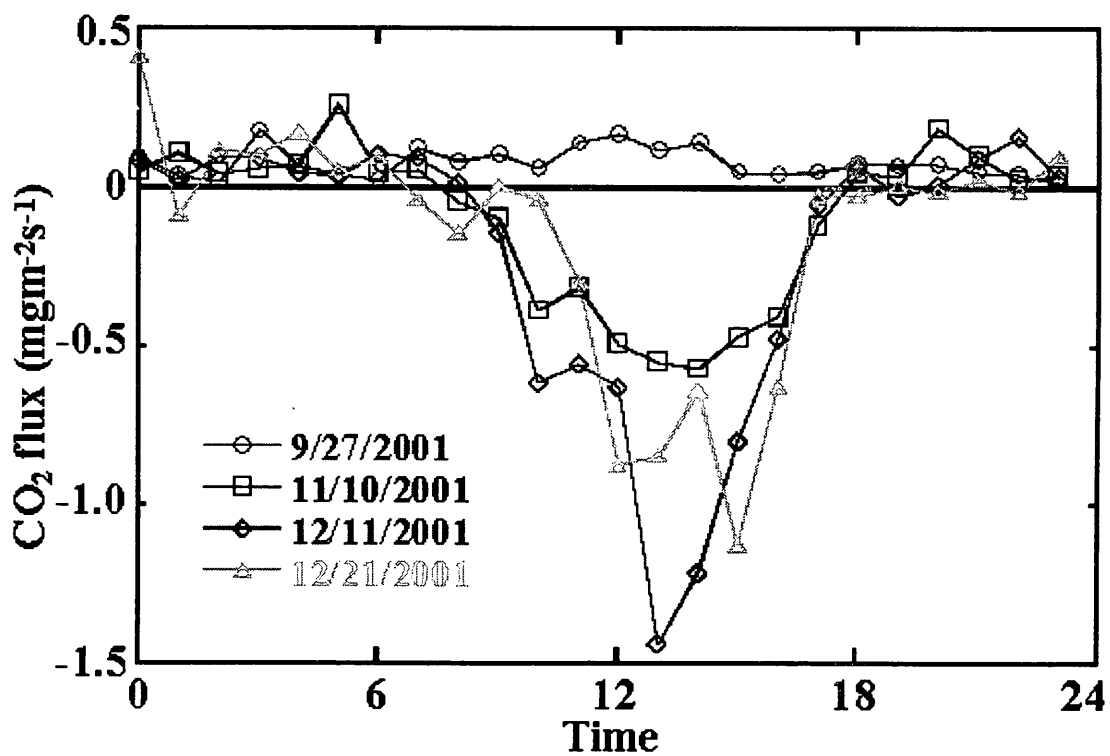


図 70 イタリアンライグラス畑の CO₂ フラックス量の時期別日変化

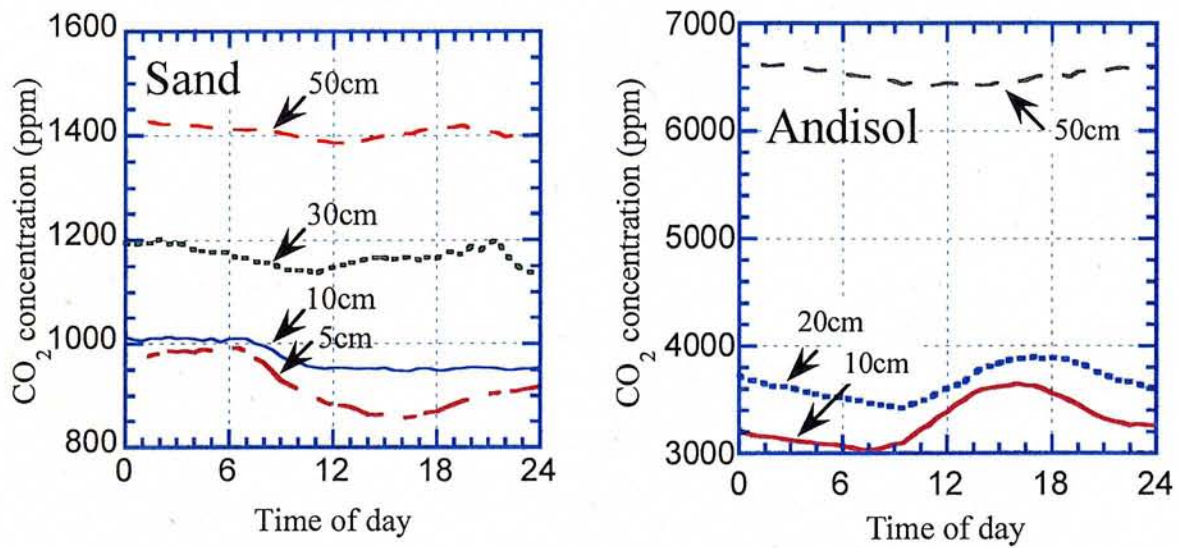


図 71 土壌の違いによる土壌中の CO₂ 濃度の日変化

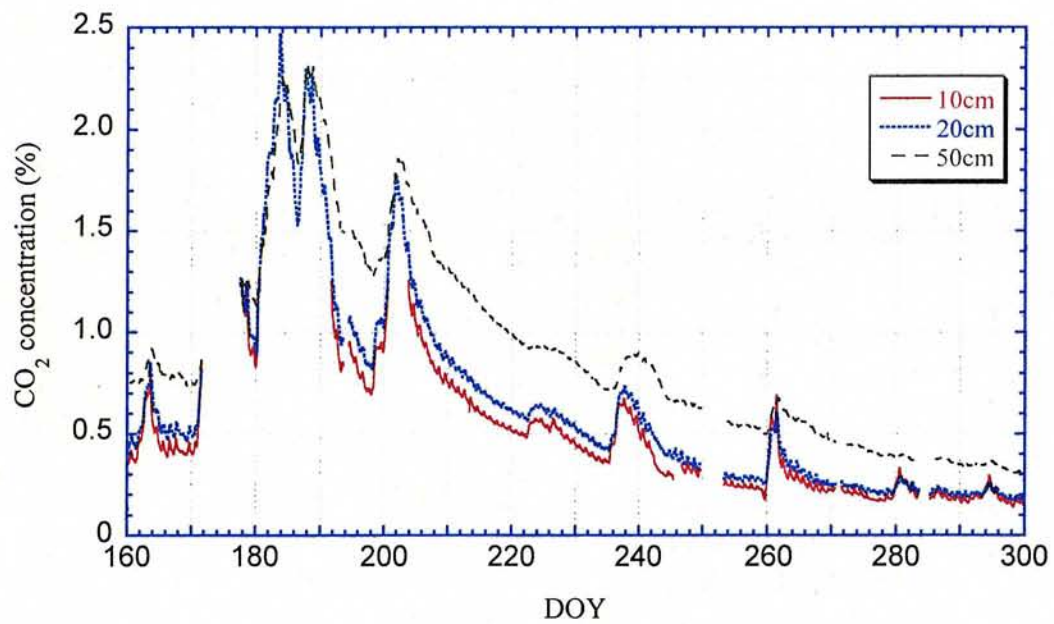


図 72 暖地牧草地生態系サイトにおける土壌中内の CO₂ 濃度の季節変化

が $-1.45\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった。 CO_2 吸収量と日射量の関係は、日射量が増加するにしたがって増加し、その傾向は指数関数曲線で近似できるが、生育時期の温度パラメータが関与していると考えられる。

カ. 土壌中の CO_2 濃度の季節変化

図 71 には砂丘地裸地圃場と黒ボク土圃場裸地期間について、晴天日における土壌中の CO_2 濃度の経時変化を示す。いずれの土壌についても浅い層ほど変動が大きく、深さに伴って変動が小さくなる傾向が認められるが、砂丘地では深さ方向の濃度勾配が小さい。測定を行った黒ボク土畑では地下 40cm 付近に耕盤が存在するため深層での拡散が弱まり、濃度勾配が大きくなったと考えられる。また、地下 5~10cm に注目すると、黒ボク土では日中に濃度が上昇し、15~16 時頃に最大となり、夕方から夜間にかけて濃度が低下する傾向がみられるが、砂丘地では日中に濃度が低下し、夜間に濃度が上昇する傾向がみられ、まったく反対の日変化を示した。

一方、暖地牧草地生態系サイトにおける土壌中の CO_2 濃度プロファイルの季節変化を図 72 に示す。土壌中の CO_2 濃度は深さ 10cm 層では梅雨期間で高くなり最大 2.5%の値を示し、その後は降雨により変動がみられるが、気温低下とともに減少傾向で推移し、 CO_2 濃度の最小値が約 0.3%であった。今後の研究は土壌の拡散係数と土壌水分の関係を求めると同時に計測機器を新しいものに更新してさらにデータを集積して、暖地牧草地生態系における土壌呼吸量の把握を考えている。

キ. 暖地畑生態系における純生産量の評価

図 69 に示されるように、2001 年冬季から 2002 年夏季の作物への CO_2 吸収量積算値と乾物重の比較をみると、冬作のイタリアンライグラス畑では積算値が乾物重に対してわずかに少ない傾向がみられるが、収穫時期ではほぼ一致した。また、トウモロコシ畑では播種直後からほぼ一致しており、計器類の故障による欠測があるが、 CO_2 吸収量と乾物量で比較的一致した。しかし、2000 年 10 月から 2001 年の 4 月までのイタリアンライグラスの乾物重とフラックス吸収量から求めた炭素量は若干違いが見られた。最終的な温暖地畑生態系におけるフラックス法から求めた CO_2 吸収量はイタリアンライグラスが $741\text{gCO}_2/\text{m}^2$ 、トウモロコシが $1200\text{gCO}_2/\text{m}^2$ であり、年間の CO_2 吸収量は $1941\text{gCO}_2/\text{m}^2$ である。収穫法による乾物重に含まれる CO_2 量はイタリアンライグラスが $707\text{gCO}_2/\text{m}^2$ 、トウモロコシが $1323\text{gCO}_2/\text{m}^2$ で、年間の乾物重は $2030\text{gCO}_2/\text{m}^2$ ($20.30\text{tonCO}_2/\text{m}^2$) であり、炭素換算量にすると $5.54\text{tonC}\cdot\text{ha}^{-1}$ であった。さらに、裸地期間の雑草等による CO_2 吸収量はイタリアンライグラス前が $424\text{gCO}_2/\text{m}^2$ 、トウモロコシ前が $178\text{gCO}_2/\text{m}^2$ である。これらの合計による温暖地飼料畑生態系におけるフラックス法から求めた年間の CO_2 ガス吸収量は $2543\text{gCO}_2/\text{m}^2$ ($25.43\text{tonCO}_2\cdot\text{ha}^{-1}$) で、炭素換算量 $6.94\text{tonC}\cdot\text{ha}^{-1}$ である。フラックス法と収穫法による違いは欠測及び土壌呼吸量の補正を行っていないことによる要因と考えられる。

(7) 熱帯季節林・熱帯多雨林サイト

① 研究の目的

熱帯多雨林と熱帯季節林帯で熱帯の森林の大部分を占めているが、共に減少が著しい。熱帯多雨林気候帯は東南アジアでは、インドネシア、フィリピン、マレーシアに分布する。しかし、多くの森林が火入れののちプランテーションの林に変化したり、火入れ後の数年間の食料生産ののち放置されたり、エルニーニョによる森林火災ののち、二次林になったりして、熱帯多雨林帯では二次林の卓越する割合は大きい。一方、乾季雨季のある熱帯季節林帯は人間活動の強い影響下にあるため、熱帯多雨林帯よりも減少と劣化が著しい。東南アジアではタイ、ミャンマー、カンボジア、ベトナム、ラオスが熱帯季節林気候であるが、タイでの森林減少は特に激しい。乾燥による水ストレスを受けて落葉する雨緑落葉樹林と、水分の多い低地と雲のかかる高地には常緑林が分布する。季節林帯の占める面積は、潜在的な条件を満たす地域も含めれば、熱帯多雨林帯に劣らず広く、また、今後大規模に植林が可能な地域でもある。

最近、東南アジアでは以下の6サイトで長期的な炭素収支観測が始められた。

1) メクロン (タイ)、2) プキット・スハルト (インドネシア) 3) サケラート (タイ) 4) ランピルヒルズ (マレーシア)、5) パランカラヤ (インドネシア)、6) パソ (マレーシア) である。このうち、ここでは1-3について報告するが、1は熱帯季節林の落葉林 (混合落葉林)、2は熱帯多雨林であるが、森林火災ののちの若齢二次林、3は熱帯季節林であるが常緑林 (熱帯乾燥常緑林) での観測である。なお、4と6は熱帯降雨林の成熟林、5は泥炭湿地林の成熟林である。熱帯雨林における二酸化炭素収支の観測例は少なく、多雨林帯の二次林、および熱帯季節林帯の二酸化炭素フラックスの観測例はまだ報告されていない。

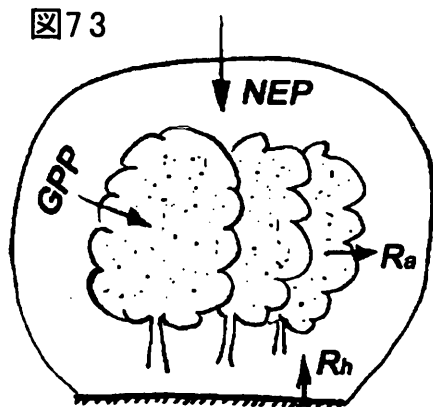
この研究では、いまだ観測例のない、熱帯多雨林の二次林および熱帯季節林の炭素固定能力の定量的評価を行う。また、群落上での二酸化炭素の固定過程を明らかにする。具体的には、二酸化炭素の吸収・排出 (シンク・ソース) を表わす生態系純生産量 NEP (あるいは生態系純交換量 NEE) を見積もる他に群落生態系の物質循環に関係する総生産、一次の純生産量、植物呼吸量、土壌呼吸量などの生産消費量を求めて、二酸化炭素収支機構を明らかにする。さらにこれら物質生産量と気温、湿度、降水量、光量子量、土壌水分量など気象データとの関係を明らかにする。これは、炭素量の気象値によるパラメタリゼーションを行うための基礎データとなる。パラメタリゼーションは、今後、広域の気象分布や衛星画像との組み合わせから二酸化炭素収支の広域評価を行うための理論的根拠を伴う道具となる。また、CO₂ フラックスの欠測時に気象値で補間する方法を提供する。解析と同時にデータも公開し、広く利用できるようにデータを整備する。

② 研究方法

ア. 生態系純生産量 NEP、炭素輸送量 F_c 、生態系純交換量 NEE の関係

森林生態系における炭素循環は図 73 に示すように、 $GPP - R_{ec} = NEP$ (第1式) で表現される。ここで、生態系呼吸量 R_{ec} は、植物呼吸量 R_a と非植物呼吸量 R_h の和である。一次の純生産量は $NPP = GPP - R_a$ であるから、第1式は、 $NPP - R_h = NEP$ (第2式) と表現できる。NPP は $NPP = \Delta B + L + C$ (第3式) と表される。ここで ΔB はバイオマス増加量、 L はリターフォール (落葉落枝や枯死、根の分解を含む)、 C は被食で失われた量である。

図73



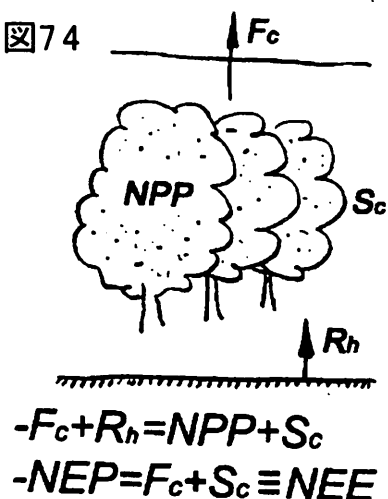
群落の炭素収支の概念図

NEP:生態系純生産量、GPP:群落総生産、

R_a :植物呼吸量、 R_h :非植物呼吸量、

NPP:一次の純生産量

図74



生態系純交換量 NEE の定義

F_c :炭素輸送量 (CO_2 フラックス)、

S_c :炭素貯留量の時間増加率

渦相関法で求められる炭素輸送量 $\overline{w'co_2'}$ を F_c (上向きを正とする) とすると、群落系内に入ってきた炭素 ($-F_c + R_h$) は一次の純生産量 NPP として植物体に取り込まれるか、群落大気中に滞留する (図 74)。

炭素貯留量の時間増加率を S_c とすると、 $-F_c + R_h = NPP + S_c$ となる。この式を書き換えると $F_c + S_c = -NPP + R_h$ (第 4 式) となる。 S_c は CO_2 の鉛直分布の時間変化から求めることができる。観測で求まる $F_c + S_c$ を生態系純交換量 NEE という。第 2 式と第 3 式から $F_c + S_c = -NEP$ (第 5 式) が求まる。NEE と NEP の違いを考えてみる。NEP は系が閉じている場合の概念である。一方、NEE は観測で求まる値で、系が閉じていなくても (横方向に CO_2 が逃げ出しても)、かまわない。水平に一樣な理想的な場でのみ、第 5 式が成立する。 S_c は一般に、夜間貯留増加したものが、日出時に上方へ開放される日周期をしているから、一日以上の期間で積算するとゼロになる。よって、系が閉じている場合には $F_c = -NEP$ (第 6 式) となり、渦相関法により観測される炭素輸送量から生態系純生産量が求まることになる。 F_c 、 S_c 、NEE の日変化のモデル図を図 75a-c に示す。日出直後の大きな F_c は夜間林冠内に貯留した CO_2 が日射による対流により上方へ拡散されることを示す。そのとき、 S_c は急激に減少する。光合成のない夜間は $NEE = R_{cc}$ が成立する。中緯度・高緯度地方など温度の年間変動が大きいところでは気温 T と R_{cc} の関係式 $R_{cc}(T)$ が求まる。この関係式が日中にも成立すると考えると、 $GPP = -NEE + R_{cc}(T)$ (第 7 式) から GPP を算定できる (図 75-d)。図では、 R_{cc} に日変化がないケースを示した。 R_{cc} は、だいたい、気温が 2 倍になれば 2 乗で、10 度上昇すれば 2 ~ 3 倍大きくなる。熱帯多雨林帯では、夜間の気温の年間の変動幅が 5 度にも満たないから、 R_{cc} と気温の間には有意な関係を見つけるのは困難である。さらに、土壌の乾燥度が R_a あるいは R_h を律速する熱帯季節林では、この方法で GPP まで求めることはむずかしいであろう。熱帯で GPP をどう求めるかは今後の研究課題である。

イ. フラックスの測定・解析方法

風の鉛直成分は超音波風速計で測定している。ブキットスハルトとサケラートはスパン 0.145 m の Gill 社製の Windmaster を使用し、気温は熱伝対 (0.1mm) で測定している。メクロンではスパン 10cm のカイジョー社製の SAT-540 で風速と気温を測定している。二酸化炭素濃度と水蒸気は LICOR 社の

Li-6262 によりクローズパス法で測定している。空気取り入れ口と Li-6262 は数メートルのテフロンチューブで連絡している。資料空気は毎分 5 リットルほどをポンプにより吸入している。約 350ppm と 400ppm の標準 CO₂ ガスにより、週 1 回（ブキッスハルト、メクロン）、月 1 回（サケラート）校正を行っている。

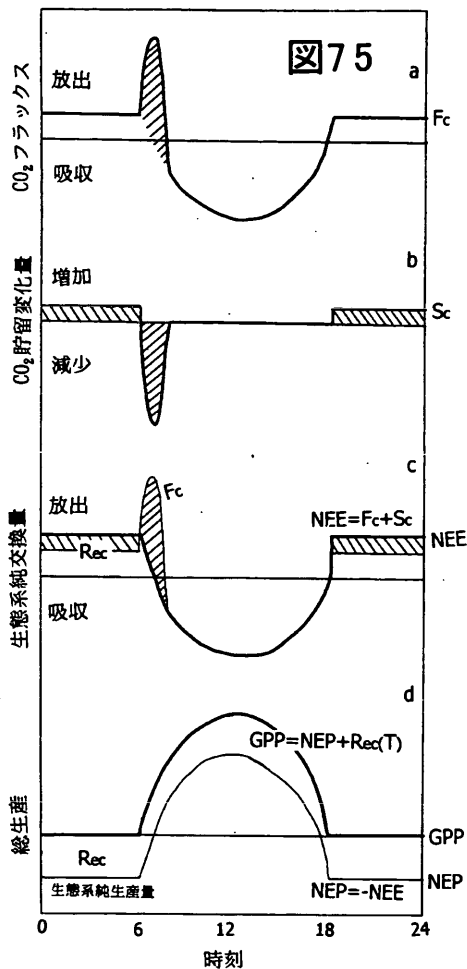


図 3 炭素収支の日変化モデル図

3-a: 炭素輸送量 F_c の日変化

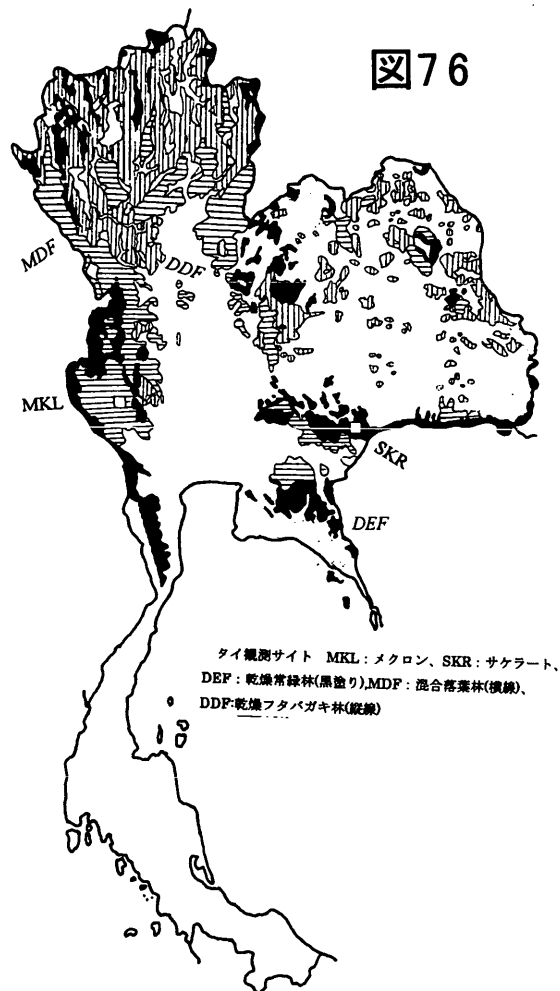
3-b: 炭素貯留量の時間増加率 S_c の日変化

3-c: 生態系純交換量 NEE の日変化

$R_{ec} = R_a + R_h (= NEE)$ は夜間の生態系呼吸量

3-d: 群落総生産 GPP と生態系純生産量 NEP の日変化

$NEP = -NEE$ (図 3-c) の場合 (藤生, 2003 より) (27)



タイ観測サイト MKL: メクロン、SKR: サケラート、
DEF: 乾燥常緑林(黒塗り)、MDF: 混合落葉林(横線)、
DDF: 乾燥フタバギキ林(縦線)

Royal Forest Department (1982)

ウ. 補正

以下の補正を行っている。

(ア) 超音波風速計の傾斜角の補正

超音波風速計は風の 3 成分を測定する測器である。もし傾斜地であれば、風は一般に地面に平行に吹いてくるから、鉛直成分 w に風向方向の成分が入ってしまい、フラックスは過大評価になる。 $\bar{w}$ がゼロになるように座標変換している。

(イ) チューブによる濃度の遅延補正

クローズドパス法ではチューブを使って空気を CO_2 分析計まで引いてくるため、 w' と C' の間には時間遅れが生ずる。空気がチューブを通して分析計に到達するのに t' 秒かかれば、 $\overline{w'_{t_0} \text{CO}_2'_{t_0+t'}}$ が時間 t_0 での相関である。 $\overline{w' \text{CO}_2'}$ を t' を変えながら計算して、その最大値を求める値とする。

ウ) 移流があるサイトでの補正 (u -補正)

夜間、大気が安定成層のとき、生態系呼吸 R_{ec} による CO_2 が群落内に滞留しているが、これが、樹冠上に設置されている大気の吸入口 (クローズドパス法) まで達しない。フラックス F_c としては、貯留している CO_2 は感知しえない。しかし、 $NEE (=F_c+S_c)$ として考えれば、原理的には問題がない (図 75a-c)。しかし、傾斜地のばあい、安定のため重くなった下層の大気は下降して、貯留量は、実際より小さく見積もられてしまう。風が強く、大気が中立成層に近くなったときには、 R_{ec} は移流で横方向に運ばれずに、かき混ぜられて、測器より上空まで拡散される。そのため、風が強いほど NEE は大きくなる。これから、乱流混合の大きさを示す摩擦速度 u_* (運動量輸送量) が大きいときの NEE の値を、風の弱いときにも適用した。なお、近年しないほうがよいと考えられてきているドリフト補正は、データのまとまりがよくなるので行っている。また、現在のところ信頼できる顕熱・潜熱フラックスが求められていないこと、およびクローズドパス法ではこの補正をしない場合の誤差は高々数%であることにより、空気密度変動の補正はまだ行っていない。

③ 観測サイトおよび観測項目

ア. メクロン (熱帯季節林帯落葉林サイト、図 76:MKL)

先に述べたようにタイの森林の 47% は落葉林である。この落葉林は混合落葉林 MDF と乾燥フタバガキ林 DDF に分類されている。一般に DDF は、山腹の斜面や尾根付近の痩せた土壤に卓越する。一方、MDF は肥えた土壤、たとえば、ふもとや平野などに卓越する。このため、現在では MDF は山岳地域にしか残っていない。DDF ではフェノロジーの似たフタバガキ科が主の森林で展葉・落葉が明確である。一方 MDF は種々の樹種からなり、フェノロジーがまちまちで、乾季に葉をつけているものもある。この MDF の森林内の 45m 塔 (北緯 14 度 34 分 34 秒、東経 98 度 50 分 37 秒、高度 160m) で二酸化炭素収支観測を行なっている。この塔は王室森林局流域研究部門のメクロン流域研究ステーションに属している。塔は尾根筋にあり、南は山に面し、東は窪地、北は峰、西は谷筋と周囲の地形も複雑である。植生は成長した二次林で、周囲に竹が多い。2001 年後半に竹 (*Chehalostachuum pergracile*) の花が咲き枯死して、2002 年には竹の稚樹が一面に成長し始めて、炭素循環をさらに複雑にしている。このサイトでの観測項目を以下に示す。

「気象要素」 短波・長波放射 (上向・下向)、光量子密度 (樹冠上で上向と下向、林床で下向 2 地点)、日射量 (上向、下向)、地温、体積含水率 (2 地点)、地中熱流量 (2 地点)、気温・湿度 (フラックス測定高度と樹冠直上の 2 高度)、降水量、樹冠部表面温度

「フラックス」 運動量、顕熱、潜熱、二酸化炭素 (closed-path 式渦相関法、測定高度 45 m)、二酸化炭素濃度高度分布 (4 高度)

「土壌フラックス」 (6 地点)

「リターフォール測定」 (1 月ごと)

さらに、樹木調査として *Berrya ammonilla*, *Dillenia parviflora*, *Terminalia chebula*, *Terminalia species*, *Vitex peduncularis*, *Xylia xylocarpa*, *Shorea siamensis*, *Pterocarpus macrocarpus* の計 31 本の胸高直径を 2 月ごとに計測している。

イ. サケラート（熱帯季節林帯常緑林サイト、図 76：SKR）

熱帯季節林は、落葉混合林（MDF）、および乾燥常緑林(DEF)、乾燥フタバガキ林(DDF)、に分類される(図 76)。タイ王立森林局による 2000 年の統計資料では、タイでは 25%が森林地帯である。そのうち、MDF, DDF はそれぞれ 30%, 17%となっているから、47%が落葉林ということになる。常緑林は 35%となっているが、乾燥常緑林、熱帯多雨林、山岳常緑林の区別をしていない。山岳常緑林は少ないので省き、マレー半島部の常緑林は熱帯多雨林、インドシナ半島部の常緑林を乾燥常緑林と仮定すると、乾燥常緑林は森林の 28%、熱帯多雨林は 7%となる。

カオヤイ国立公園西部にある乾燥常緑林内のサケラート環境研究センター所属の 47m の塔（北緯 14 度 29 分 36 秒、東経 101 度 55 分 19 秒、高度 535m）において、2001 年 3 月から二酸化炭素収支の観測を開始した。周囲どちら方向も数キロ以上森林内である塔は非常に緩やかな東斜面上に立っている。熱帯では珍しく構成樹種の種類が少ない森林で、高木層はフタバガキ科の *Hopea ferrea* が優先している。このサイトでの観測項目を以下に示す。

「気象要素」 短波・長波放射（上向・下向）、光量子密度（樹冠上で上向と下向、林床で下向 2 地点）、日射量（上向、下向）、地温、体積含水率（2 地点）、地中熱流量（2 地点）、気温・湿度（4 高度）、降水量、樹冠部表面温度

「フラックス」 運動量、顕熱、潜熱、二酸化炭素（closed-path 式渦相関法、測定高度 45 m）、二酸化炭素濃度高度分布（4 高度）

「土壌フラックス」（6 地点）

「リターフォール測定」（1 月ごと）

他に、サケラートでは塔周辺で 7 割の占有率である *Hopea ferrea*, *Hydnocarpus ilicifolius*, *Memecylon ovatum* の大中小木を選んで計 90 本あまりの胸高直径を 2 月ごとに計測している。

ウ. ブキットスハルト（熱帯多雨林気候帯の二次林サイト）

インドネシアの東カリマンタン、サマリダ周辺のムラワルマン大学熱帯降雨林研究センターのブキットスハルト演習林内にある 30m 塔(南緯 0 度 50 分、東経 117 度 3 分、高度約 20m)を使用して二次林の成長段階における二酸化炭素収支の観測を行っている（図 77）。このサイトでは 1983 年のエルニーニョに伴う異常乾燥により森林が火災消失し、その後二次林の *Macaranga* 属を主にした二次林が卓越していたが、1998 年のエルニーニョによる異常乾燥で、再び消失した。消失後、材質の脆い *Macaranga* 属はすべて倒木となり、始め林床は藪状態で、何回か優占種が交替したが、1 年半後 *Macaranga* 属の稚樹が卓越し始め、消失後 4 年にして高度 10m 近くまで復活している。火災の後の地面の乾燥により枯死したフタバガキ科の高木がまだ倒れずに立木のままだになっている。サイトは小さなアップダウンのある緩やかな傾斜した地形上にある。このサイトでの観測項目を以下に示す。

「気象要素」 短波・長波放射（上向・下向）、光量子密度（樹冠上で上向と下向、林床で下向 2 地点）、日射量（上向、下向）、地温、体積含水率（2 地点）、地中熱流量（2 地点）、気温・湿度（4 高度）、降水量、樹冠部表面温度

「フラックス」 運動量、顕熱、潜熱、二酸化炭素（closed-path 式渦相関法、測定高度 14 m）、二

酸化炭素濃度高度分布（4 高度）

「土壌フラックス」（6 地点）

「地上部バイオマス測定」（年 1 回）

「リターフォール測定」（2 週間ごと）

タワー周辺で年 1 回、毎木調査を行なっている。胸高直径 10cm 以上の樹木個体の樹種および胸高直径の調査、刈り取り調査（直径、樹高測定、器官（枝、幹、葉）別重量測定）を実施し、直径と樹高の関係および直径および樹高と個体重の関係を決定する。これにより地上部のバイオマス増加量 ΔB_s が求まる。

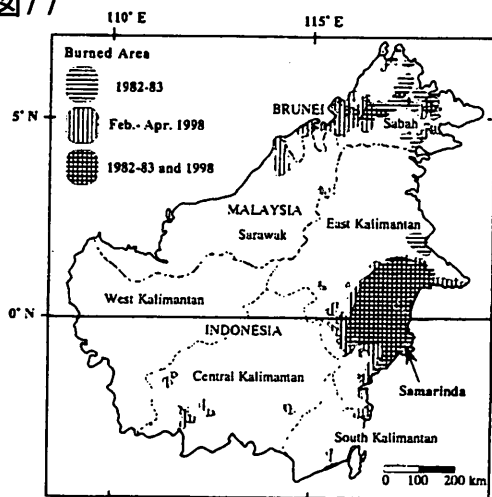
④ 結果・考察

ア. メクロン（熱帯季節林帯落葉林サイト）

混合落葉林二酸化炭素フラックスデータの2002年度の取得率はメクロンサイトで90%以上である。降水量、土壌水分量、葉面積指数LAI、生態系純交換量NEEの年変化を図78に示す。乾季雨季の季節パターンが葉面積指数LAIやNEEに明確に現れている。降水量と土壌水分量の変化から、雨季が10月頃終わり、乾季が進むにつれて、12月の年最低気温、4月の年最高気温を経て、5月頃雨季に入る。葉面積指数LAIからわかるように、雨季が始まると、約2週間で竹が急激に展葉する。落葉は乾季開始とともに徐々に始まるが、乾季中期に大量に落葉し始め、2月に葉面積指数は最低となる。NEEの2002年の年間積算値は3.7ton C/ha/yrである。ここは、竹が多く、2001後半に竹が枯死したことで、近くの樹木が倒れてギャップができたため、葉面積指数が小さくなってしまっている。ここは地形も複雑で解析のなかなか困難なサイトである。

イ. サケラート（熱帯季節林帯常緑林サイト）

図77



ブキットスハルトサイト ●印 図には
1982-83 と 1998 年のエルニーニョに伴う異常
乾燥で火災を受けた地域も示す (Mori,2000 による)²⁸⁾

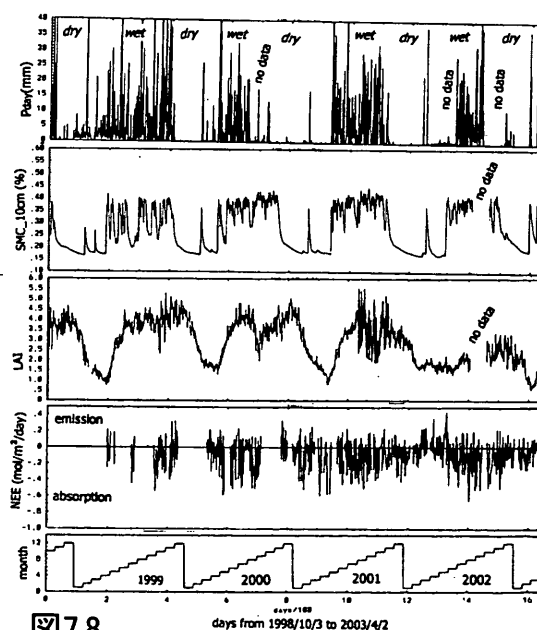


図78

メクロンの日降水量 (Pday)、深さ 10cm の土壌水分量
(SMC_10cm)、葉面積指数 (LAI)、及び NEE の日積算値

二酸化炭素フラックスデータの 2002 年度の取得率はサケラートサイトで 90% 強である。このサイ

トは乾季にも常緑で年間通して LAI=3.5-4 の森林である、常緑とはいいながら、やはり、乾季雨季の影響を受けている。図 79 に受光量 APAR と NEE の関係を示す。5-9 月の雨季、10-11 月の遷移期、12-4 月の乾季の 3 区分が可能である。遷移期から乾季になるほど光合成の活性度が落ちていることを示している。この傾向はすでにこのサイトで矢吹(1985)²⁹⁾により指摘されている。

ここ 2 年間の NEE の変化を図 80 に示す。光合成が卓越する日中と、植物および非植物呼吸が林内

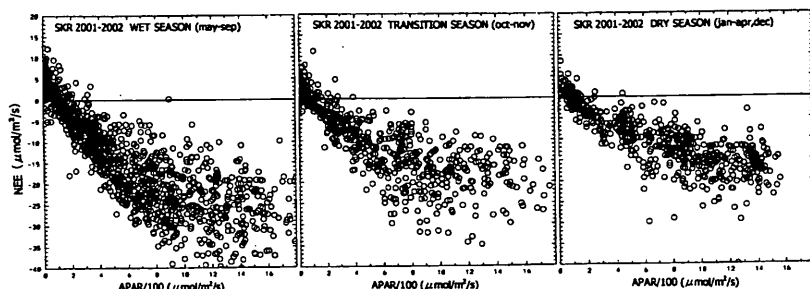
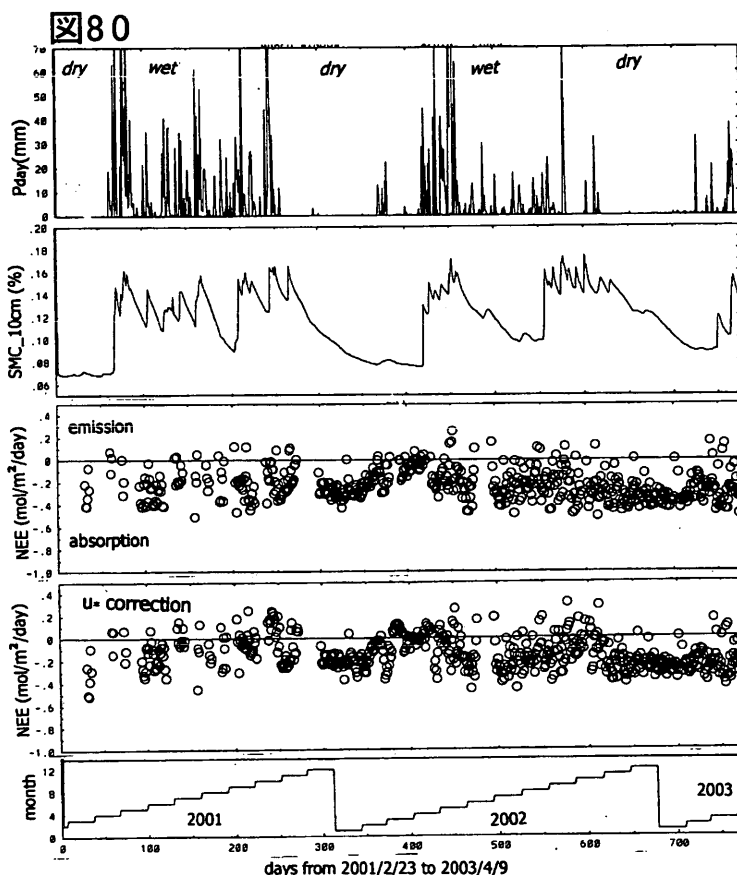


図 79

受光量 APAR と NEE の関係 左から雨季、遷移期、乾季



サケラートの日降水量 (P_{day})、深さ 10cm の土壌水分量 (SMC_{10cm})、NEE の日積算値(上段:補正なし、下段: u_c 補正)

に蓄積する夜間に分けてみると、雨季には、両者とも大きい。NEE の日積算量は雨季には日差しがあれば大きい、ないと小さい。遷移期(乾季初期)には光合成もそれほど下がらず、呼吸量は小さく、NEE は大きい。日射が強く、高温の乾季後期には NEE が小さい。

このサイトでの 2002 年度の年間の NEE 値は 10 Mg C/ha/year となった。サケラートでは樹木調査が 1985 年より行われており(Kanzaki 他,1995)³⁰⁾、ほぼ成熟林であることがわかっている。渦相関法で、

大きな NEE となった原因のひとつには、夜間に蓄積された貯留量 S_c が移流で流出している可能性がある。NEE による u_* の依存性を調べると、 u_* が大きいほど（風速が強いほどに相当）NEE は直線的に大きくなり、飽和しないように見える(図 81)。これは、風が強いと、林間に貯留した CO_2 が鉛直方向に掻き混ぜられて、測定高度まで拡散されるが、風の弱いときは、林間の CO_2 は水平方向に流れ出している可能性を示している。雨季(5-9 月)、雨季から乾季への遷移期(10-11 月)は $u_* < 0.8 \text{ m/s}$ 以下では NEE は $8 \mu \text{ mol/m}^2/\text{s}$ 、乾季には同じく $u_* < 0.8 \text{ m/s}$ 以下で NEE は $3 \mu \text{ mol/m}^2/\text{s}$ とすると、2002 年には 5.8 tonC/ha/yr ほどまでに減少する。 u_* 補正を施したときの NEE の日積算値の年変化を図に示した。2002 年の乾季の後半（3 月、4 月）には、この群落は二酸化炭素のソースになっている。しかし、NEE が成熟林であるにもかかわらず、ゼロにならない理由として、以下のことが考えられる。1) 根のみ太る、2) 木質遺体が分解されずに林床あるいは立木として存在する。3) 根が枯死しても分解しないで土中にとどまっている。4) あるいは、このサイトはシロアリが多い。シロアリの葉を食するスピードは速く、一面の落葉を一昼夜で食べつくすという。このときは、 CO_2 はメタンに変えられて、別の温暖化ガスに変形されるが、分解すべき CO_2 としては減少する可能性も棄てきれない。

ウ. プキットスハルト（熱帯多雨林気候帯の二次林サイト）

図 81

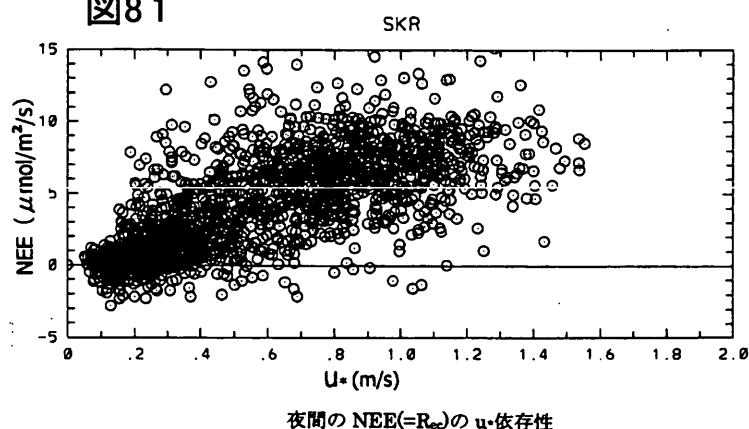


図 82

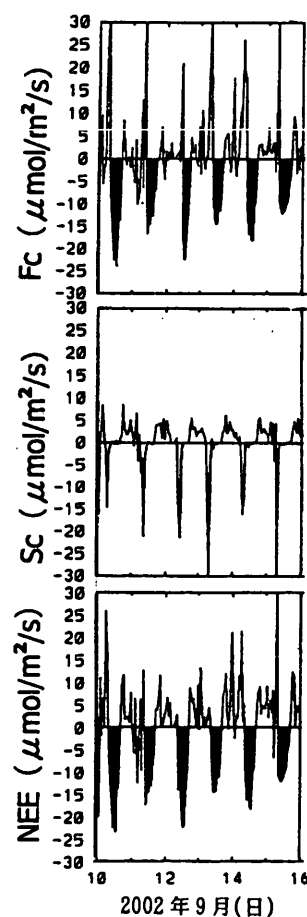
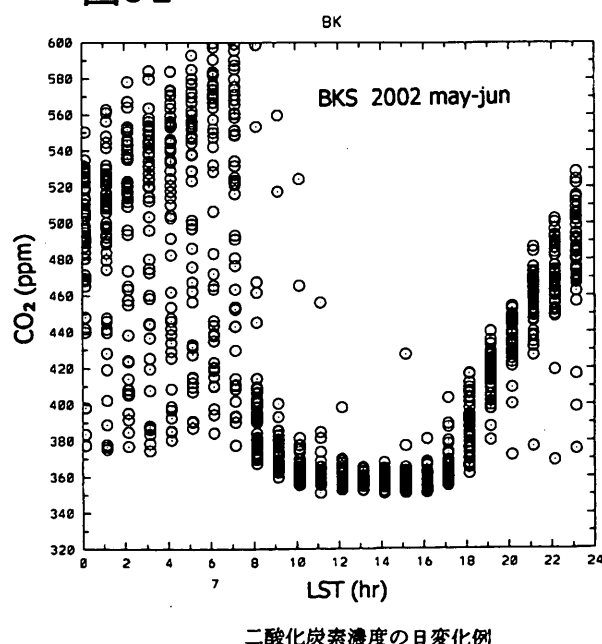


図 83

キットスハルトの
 F_c, S_c, NEE の日変化例

(ア)生態系純交換量 NEE の日変化・年変化

二酸化炭素フラックスデータの 2002 年度の取得率はブキツスハルトで 90%以上である。このサイトの CO_2 濃度の日変化を図 82 に示す。日中は 360-370ppm と全球平均に近い値でほぼ一定であるが、日没近くから増加し始め、日出時まで増加を続けて、600ppm ほどまでになることが多い。そして、日出後 1,2 時間で急激に減少して、日中の値になる。この大きな濃度変動はこのサイトの特徴である。

キャノピー上の渦相関により得られる CO_2 フラックス(F_c)、測定高度以下の CO_2 の蓄積量の時間変化(S_c)、および $F_c + S_c$ により求まる生態系純交換量 NEE の例を図 83 に示す。日出後 2 時間続く大きな F_c の上向きのフラックスは、夜間の間にキャノピー内蓄積された CO_2 が自由対流が盛んになり、その対流が卓越する層(混合層)が次第に厚くなってゆくことに伴って、下層の CO_2 が上空の小さい CO_2 濃度の大气と混合されることを示す。このとき、 CO_2 は急激に小さくなる。一方、 CO_2 の蓄積量の増減量をみると、日没後、ほぼ一定で、日出まで蓄積量が増加してゆき、日出後、急激に減少する。両者の和である、NEE には F_c 、 S_c より、日出後の急激な変化は消えている。図 85 に示すように NEE の最小値(光合成の盛んなとき)は午前 11 時—正午に現れる。個葉による光合成の最大値が 7—8 時に出現する傾向(Ishida, 1999)³¹⁾と異なる。

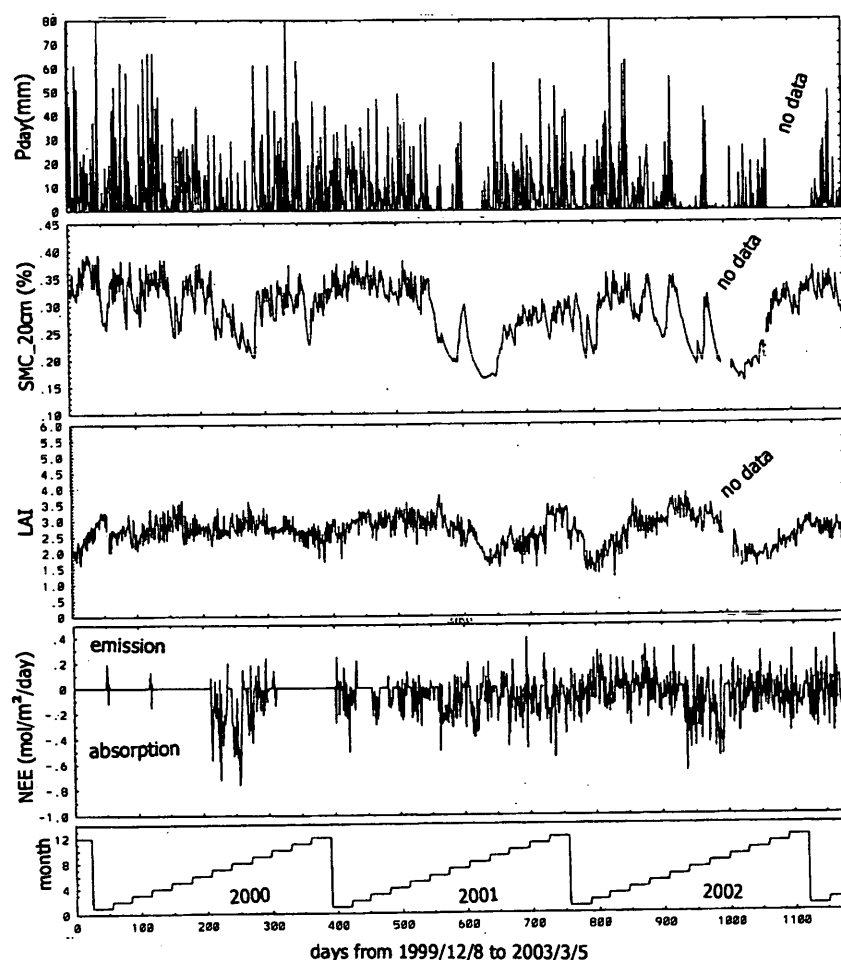


図 84 ブキツスハルトの日降水量 (P_{day})、深さ 20cm の土壌水分量 ($\text{SMC}_{20\text{cm}}$)、葉面積指数 LAI、および NEE の日積算値

ここ 2-3 年間の NEE の日日変化を図 84 に示す。2001 年度は、雨の多い、通常の熱帯多雨林気候で、

年間を通して、月月変化は小さい。この年は年積算にすると7 ton C/ha/yrであった。一方、2002年はエルニーニョによる長期間の乾燥期が6月から10月まで、断続的にあり、NEEの月月変化は激しい。年積算値は5.3トン ton C/ha/yrであった。乾季の始まりでは、豊かな葉と、豊富な光と、土壌水分が、成長障害を起こさない程度に湿っているためか、日中のNEEは大きいですが、夜間の放出も大きい。全日によると、NEEはそれほど大きくなる。乾燥が進むと、夜間の放出が急激に小さくなる。葉面積指数LAIが乾燥期後期に小さくなるのは、下層の葉が落葉するためと思われる。

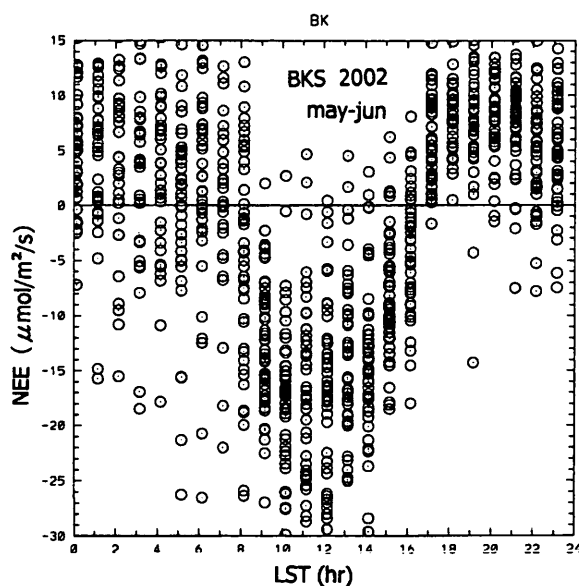


図85 生態系純交換量NEEの日変化例

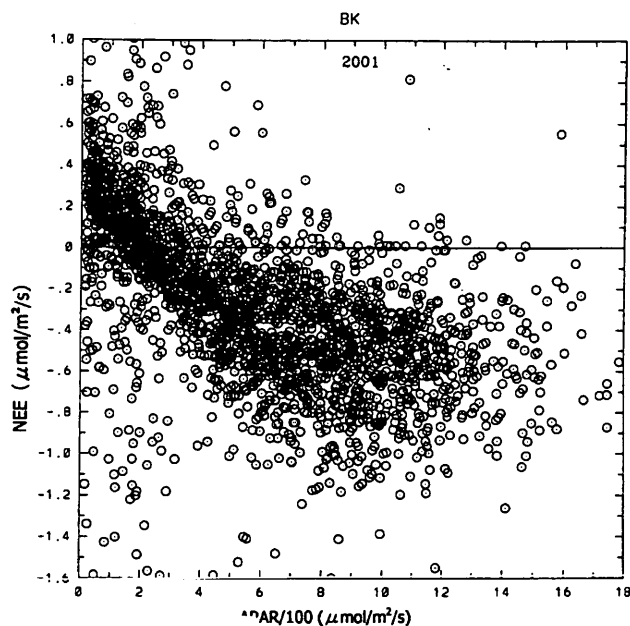


図86 受光量APARとNEEの関係

(イ)NEEと受光量APAR,飽差VPDとの関係

2002年の光合成にもっとも寄与する受光量APARと生態系純交換量NEEの関係を図86に示す。2002年はエルニーニョによる乾燥期が6月から10月まで断続的にあったため、ばらつきが大きい。受光量が大きいと強光障害で光合成は飽和してくる。受光量の大きな場合の飽差VPDとNEEの関係を図87に示す。飽差が大きいほど、すなわち乾燥しているほど、NEEは小さくなる傾向がみられる。

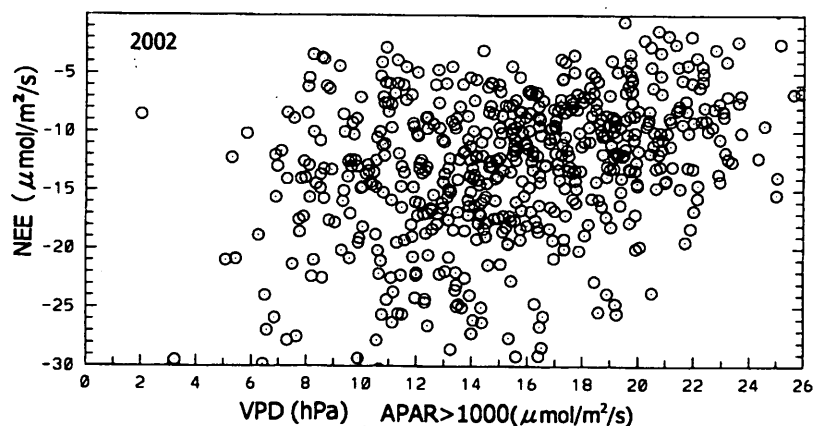


図87 飽差VPDとNEEの関係

(ウ)炭素収支分配の解析例

各地の森林の分配率を比較することにより、その森林の特徴が明らかになる。また、炭素の分配の仕方の年々変化から、群落の構成要素毎の気候変化に対する炭素吸収・排出の敏感度あるいは鈍感度が明らかになり、温暖化の進行に対する森林の応答特性に対する知見が得られる可能性が期待される。ここでは簡易的な方法で、このサイトの炭素分配を概算してみる。

ブキツスハルトでは観測されている項目は NEP ($-NEE$ と仮定)、地上部バイオマス年増加量 ΔB_a 、リターフォール地上部 (落葉落枝量) L_a 、土壌呼吸 R_{soil} である。土壌呼吸は $R_{soil}=R_h+R_{ar}$ (第8式) で表される³²⁾。ここで、バイオマス増加分の地下部と地上部の比 $\Delta B_r/\Delta B_a$ をバイオマスのそれ ($B_r/B_a=\alpha$) と等しいと仮定した。また、植物呼吸の地下部と地上部の比 R_{ar}/R_{aa} も α に等しいと仮定した。また、リターフォールの地上部と地下部 (根の枯死量) L_r/L_a も α に等しいと仮定した。そのとき、一次の純生産量 NPP は第3式 ($NPP=\Delta B+L+C$) で被食 C が無視できるとすると、 $NPP=(1+\alpha)(\Delta B_a+L_a)$ となる。 α は一般に森林を問わず 0.2 ほどであるので、ここでは $\alpha=0.2$ と置くと、 $NPP=8.9 \text{ tonC/ha/yr}$ が得られる。第2式 ($NPP-R_h=NEP$) から非植物呼吸 R_h が求まる。また、日没から日出までの温度差が 3°C 程度と小さいので、 R_{soil} は日没観測時のそれを夜間の値と仮定した。夜間は R_{soil} は $0.05 \text{ mg CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ 日中は $0.1 \text{ mg CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ の観測値が得られている。年積算にすると R_{soil} は 6.5 tonC/ha/yr となる。第8式から根の呼吸 R_{ar} が求まる。仮定から、 R_{aa} が求まり、生態系呼吸 R_{ec} 、全生産 GPP が求まっていく。以上を、図88と表16に示した。第2,3式から求まる $NEP+R_h=\Delta B+L+C$ でこのサイトの炭素収支の特徴をみってみる。被食 C が無視できるとき、リターフォール L の分解が早い熱帯では、1年単位でみれば、 $L=R_h$ (非植物呼吸) が考えられる。そのときは、 $NEP=\Delta B$ (バイオマス増加量) となる。新植林・再植林 CDM (クリーン開発メカニズム) の場合の対照植生ベースラインともなる ΔB が渦相関法で測定できるということになる。このサイトでは $NEP=4.8, \Delta B=5.2 \text{ tonC/ha/yr}$ と似た値をとり、また、 $L=3.7, R_h=4.1 \text{ tonC/ha/yr}$ と同等であり、その仮定を支持している。ブキツスハルトでの地下部も含むバイオマス調査でも、これを否定しないデータが得られている (森川, 2002)³³⁾。このように、異なる手法を組み合わせれば、比較的容易な観測から、対象とする群落の炭素循環が推定できる。

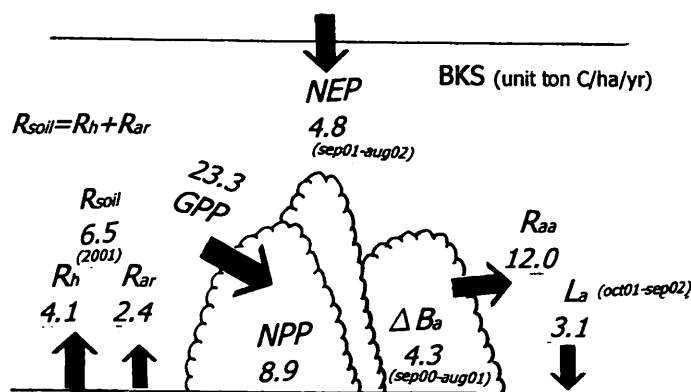


図88 ブキツスハルト若齢2次林での炭素循環

観測値: ① $NEP (= -NEE)$ 、② ΔB_a (地上部バイオマス増加量)

③ L_a (地上部リターフォール)、④ R_{soil} (土壌呼吸)

仮定: ① $\Delta B_r/\Delta B_a=0.2$ 、② $L_r/L_a=0.2$ 、③ $R_{ar}/R_{aa}=0.2$ 。

表 16 炭素収支項目 (単位 ton C / ha / yr)

NEP	Δ B_a	L_a	R_{soil}	C	Δ B_r	L_r	Δ B	L	NPP	R_h	R_{ar}	R_{aa}	R_a	R_{ec}	GPP
4.8	4.3	3.1	6.5	0	0.9	0.6	5.2	3.7	8.9	4.1	2.4	12.0	14.4	18.5	23.3

⑤ 引用文献

- 27) 蒲生稔,2003:渦相関法による生態系純生産量の測定. 熱帯林業,48
- 28) Mori,T.,2000: Effects of droughts and forest fires on Dipterocarp Forest in east Kalimantan. Rainforest Ecosystems of East Kalimantan, Ecological Studies 140, Springer,30-45.
- 29) 矢吹萬壽, 1985:植物の動態環境。朝倉書店、220pp
- 30) Kanzaki M. et al., 1995: Mosaic structure and tree growth pattern in a monodominant tropical seasonal evergreen forest in Thailand. Vegetation Science in Forestry, 495-513.
- 31) Ishida A. et al.,1999: Leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence in relation to leaf angle, azimuth, and canopy position in the tropical pioneer tree, Macaranga conifera. Tree Physiology 19:117-124.
- 32) Toma,T. et al.,2000: Dynamics of burned lowland Dipterocarp forest stands in Bukit Soeharto,East Kalimantan. Rainforest Ecosystems of East Kalimantan, Ecological Studies 140, Springer,107-119.
- 33) 森川靖,2002:植林活動による炭素固定と CDM. 環境技術 31:18-23

3. 研究成果のまとめ

本研究では東アジアモンスーン気候帯の各種生態系において7種類のフラックス観測サイトを選定して、大気と植生間のCO₂等交換量や気象の連続観測を実施し、森林、水田、牧草地など各種生態系毎の炭素収支の特徴、気象条件の差異の各生態系と大気間の交換量に及ぼす影響を調べた。高山落葉広葉樹林、富士吉田アカマツ樹林サイトでは二酸化炭素フラックスの年による違いの第1の要因は光合成有効放射が梅雨期、夏季の降水状態により年々変動するなど気温が高く生態系呼吸量の多い時期にどの程度の日射量が得られるかよること、第2に展葉を開始する時期(落葉樹林)あるいは光合成活動の休眠期間(マツ林)の変動が重要であることを解明した。また、桐生試験地ヒノキ樹林サイトでは湿潤な夏期における昼間の吸収速度のピークは初夏と変わらない値を示したが、夜間の呼吸速度が大きくなるために収支としての夏季の日積算炭素吸収量は減少していることを示した。釧路湿原および水田サイトの測定では水田では収穫時の稲藁のすき込み、収穫後のひこばえの成長、土壌呼吸は、年間の炭素収支に大きく影響するが、水移動にともなう炭素収支やメタンの放出の寄与は小さいこと、また高層湿原サイトのメタンの放出は、積雪があり地表面が凍結した冬季も継続していることが明らかになった。さらに暖地牧草地サイトでは渦相関法でのCO₂フラックス量とトウモロコシの乾物生産量の比較解析を進め、渦相関法の測定精度の検討に有力な知見が得られている。この暖地牧草地生態系における炭素吸収量は、6.94Cton/ha/yearであった。タイ熱帯季節林サイトでは熱帯季節林帯の乾季雨季の2季節という特徴のあるサイトでの貴重な観測の成果が得られつつあり、年間の二酸化炭素フラックスの値を概算して、予備的なNEE推定値(3.7 Cton/ha/year:メクロン, 5.8 Cton/ha/year:サケラート, 4.8 Cton/ha/year:ブキットスハルト)を得ている。以下に本研究による主要な成果を報告する。

(1) 年間の生態系純生産量(NEP)の推定値の不確定性について

[高山の観測からの考察]

高山サイトの年間のNEPを求める際、現在のところ最大の不確定要因は、夜間安定時の補正をどの程度行うかという事である。補正条件を変えて年間NEPを求めた結果を表17に示す。補正の有無で50-60 gC m⁻² y⁻¹の差があり、補正の程度によって約40 gC m⁻² y⁻¹の差が生じている。現時点ではどの程度の補正が正しいのか明らかではない。このためサイト間の結果の比較等を行う際には、補正方法を明示することが必須である。また、夜間の補正が年間NEPに大きな影響を及ぼすという結果は、複雑地形地でのフラックス観測の一つの特徴であり、慎重な取り扱いを必要とする点ではないかと考えられる。今後、フラックス観測結果、土壌呼吸量・光合成量観測結果などさらにはバイオマス増加量などとの比較による検討が必要になる。

表17 渦相関法で求めた年間NEP. (1)夜間安定時のデータを補正しない場合, (2)摩擦速度0.2 m s⁻¹以下のNEEを補正した場合, (3)0.5 m s⁻¹以下を補正した場合. (単位 gC m⁻² year⁻¹)

Year	1999	2000	2001
NEP_(1)	251	376	342
NEP_(2)	198	309	290
NEP_(3)	159	272	248

[桐生 の 多 層 モデル と 観 測 結 果 の 比 較]

フラックスタワー観測による年間積算 NEE(生態系純交換量)が過大評価をする問題について、NEE に関する多層モデル結果と観測による NEE の比較により考察した。図 89 に年間炭素固定量 (NEE) の観測結果(左図)とモデル推定値(右図)を示す。棒グラフの白地の部分は夜間の放出量で全体からこれを差し引いた黒地の部分が年間炭素固定量 (NEE) である。これらの図から示されるように、観測結果と NEE 推定値の土壌呼吸・温度の関係および葉呼吸・温度の関係、および個葉ガス交換モデルを含む多層モデルによる見積もりとの比較から、乱流フラックス観測値は夜間の放出がかなり小さく、この違いが、NEE の過大評価の主な原因の一つとなっていると考えられる。

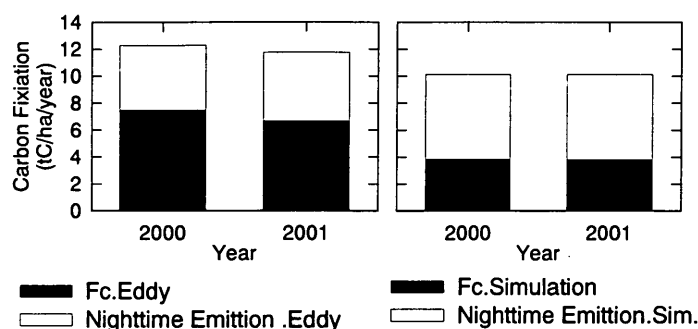


図 89 年間炭素固定量 (NEE) の観測結果(左図)とモデル推定値(右図)

(2) 長期観測結果によるNEPの季節変動・年々変動要因の解析

高山で、1993 年以降行っている空気力学的方法(2 点傾度法; Yamamoto et al., 1999)²⁾による二酸化炭素フラックスの測定結果と 1998 年以降行われている渦相関法の結果を用いて、1994~2001 年の NEP を求めることを試みた。傾度法による NEP を渦相関法と比べると、日変化・季節変化ともに振幅が系統的に小さいという差があったため、両者の相関関係を調べて補正係数を決め、

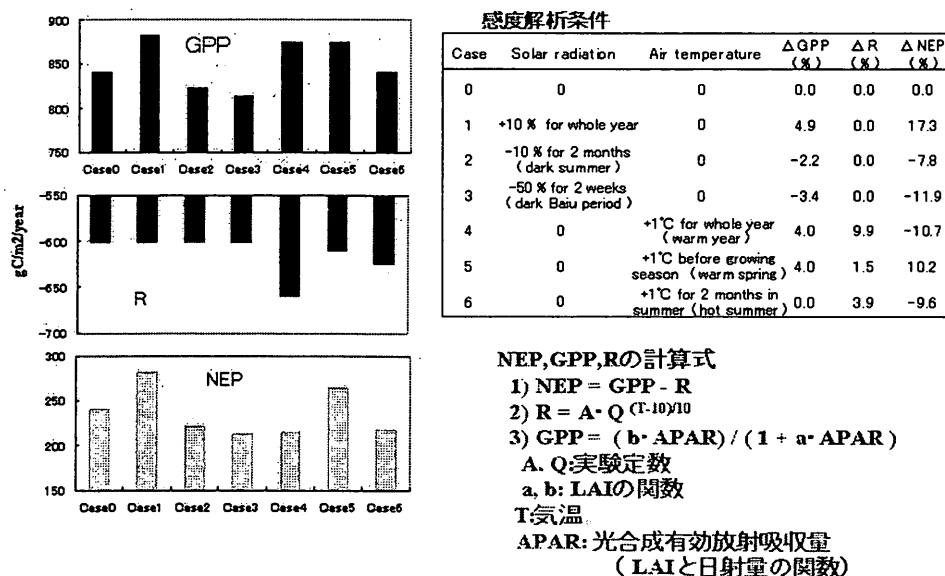


図 90 生態系純生産量(NEP)、総生産量(GPP)、呼吸量(R)と年平均気温、日射量の関係の感度解析

傾度法の結果が渦相関法に合うよう補正した。傾度法と渦相関法で求めた NEP の季節変化・年々変化から 8 年間の年間 NEP は平均 $224 \pm 82 \text{ gC m}^{-2}$ であること、年によって 100 gC m^{-2} 以上の大きな違いがあることなどが分かった。図 90 は生態系純生産量(NEP)、総生産量(GPP)、呼吸量(R)と平均気温、日射量の関係についての感度解析結果で基準(コントロール)ケース 0 から日射量を変えたケース 1～3、平均気温を変えたケース 4～6 についての GPP、R、NEP の変化量を示したものである。これから梅雨の日射の条件(梅雨がウェット型かドライ型か)、夏季日射条件(冷夏型かどうか)、春季の気温条件(暖春型かどうか)などによる年々変動要因の影響が強いことが示唆される。

(3) 常緑針葉樹林：アカマツ林、富士吉田の NEE 季節変動の特徴と年々変動

富士吉田のアカマツ林では、森林から大気へ CO_2 が連続して放出(正の NEE)される期間は、ほぼ 1 月中旬から 3 月上旬までで、その値は $2\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 程度であった。これより、アカマツ林は落葉広葉樹林に比べて、休眠期間が短いことが推察される。それ以外の期間は概ね森林によって CO_2 が吸収され、気温が低く呼吸量が少ない 4 月上旬から 6 月上旬に大きな CO_2 吸収量(負の NEE)が観測された。 CO_2 吸収量は 6 月上旬に約 $15\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ に達し、それ以降、気温の上昇による生態系呼吸量の増加にともなって、森林の正味 CO_2 吸収量は減少した。この間、気温は比較的緩やかに変化しているのに対し日射量の変動は大きく、日中の NEE の大きな変動は主に日射量の変化によると考えられた。

2001 年、2002 年の日全天日射量(Sd)、日平均気温(Ta)と、顕熱(H)・潜熱(LE)フラックス、NEE の日平均値、AMeDAS 河口湖の日降水量等の関係、年による差異を解析した(図 91)。2000 年を基準に 2001 年を比較すると、降水量は約 425mm の増加、年全天日射量はほぼ等しく、年平均気温は約 0.4°C 低下した。NEE は約 2.5% の減少にとどまったが、その季節変化パターンは両年で大きく異なった。2001 年は梅雨期(6 月)の CO_2 吸収量の減少が 2000 年ほど顕著ではないのに対して、7 月～8 月の吸収量は逆に 2000 年よりかなり少なく、2001 年は 9 月の CO_2 吸収量の減少が顕著であった。冬季の休眠期間は 2001 年が 2000 年より約 1 か月長かった。常緑針葉樹林サイトの富士吉田試験地では、NEE は気温や日射量の変動をそのまま反映する。気温が高い時期(生態系呼吸量の多い時期)にどの程度の日射量が得られるか、休眠期間がどの程度の長さになるかが、年間の CO_2 吸収量に大きく影響することが分かった。

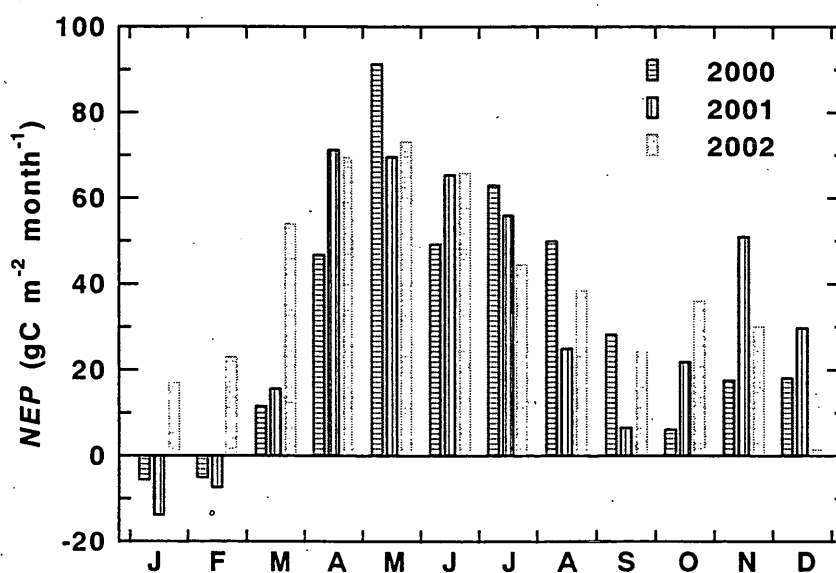


図 91 年別、月別の生態系純生産量(NEP=-NEE)

日本の代表的な森林生態系の一つであるアカマツ林でのタワーフラックス観測からは年間の NEE の値とその季節内変動、年々変動が詳細に解析され、さらに森林微気象、各種フラックスデータがデータベース化された。また、同時に森林群落内の炭素収支要素のうち、土壌呼吸量に関するデータ、生態学的な成長量調査結果から、積み上げ法による年間の純一次生産量が解析された。生態系の炭素収支パーティショニングのために使用可能なデータが蓄積された。これらから、森林群落（あるいはその構成要素）の炭素収支量、および季節変動、年々変動の大きさが示され、その要因が明らかとなった。

（４）水田（岡山八浜農場）における炭素収支季節変化と水田管理

八浜農場では、5月中旬に稲粃が播種され、約2週間後に発芽する。6月中旬に水稻の高さは0.15mになり、灌漑水が導入される。7月下旬までの水稻の成長は著しい。8月下旬には出穂し、9月中旬に平均草高は1mに達する。10月下旬に稲は収穫され、0.15mの刈り株が残される。したがって、地表面は6月から10月までの5ヶ月間は水稻群落で覆われ、11月から翌年の5月までの7ヶ月間は0.15mの稲の切り株が残されていた。1999–2002年のCO₂フラックスの季節変化を比較すると年次変動は小さいので、CO₂フラックスを月別に平均したNEEの変化を図92に示す。その季節変化の特徴は次のようにまとめられる。

- ① 6月下旬から7月下旬にかけて、水稻の生育状態を反映して鉛直下向きのCO₂フラックスの増加が顕著。
- ② 8月上旬から9月中旬までは、 $-0.15 \sim -0.25 \text{ mgm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ で推移。
- ③ 9月下旬から10月上旬にかけて、水稻群落のCO₂取り込み量は低下。10月下旬にはCO₂フラックスが上向きとなる。
- ④ 水稻収穫後、圃場はCO₂を放出。
- ⑤ 水稻生育時のCO₂吸収量は灌漑水の有無で異なる。
- ⑥ 裸地状態時のCO₂放出量は地表面温度の上昇と共に増加。
- ⑦ 八浜農場での年間の炭素収支は水稻生育時5ヶ月間のCO₂吸収量： 1.88 kgm^{-2} 、裸地状態時7ヶ月間のCO₂放出量： 1.00 kgm^{-2} となり耕作地は年間CO₂を $0.88 \text{ gm}^{-2} \text{ y}^{-1}$ の割合で固定。

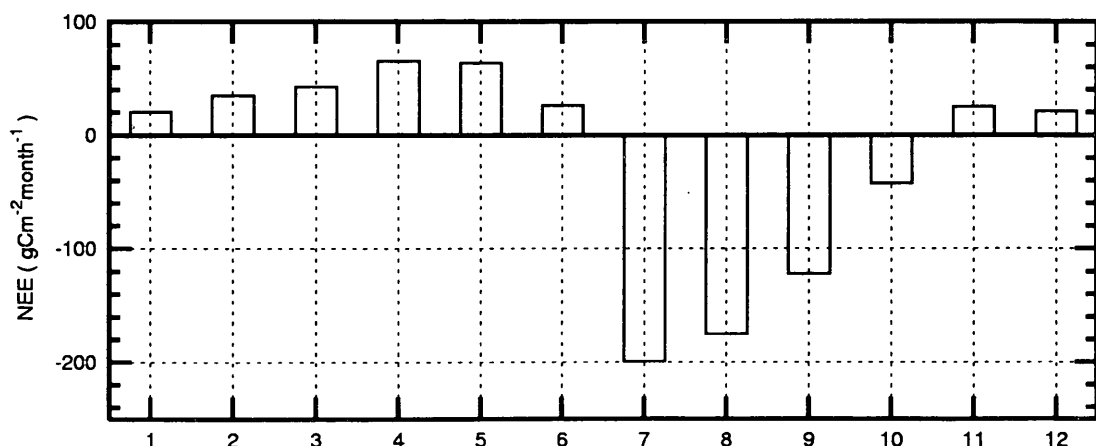


図 92 水田（岡山）サイトでの NEE の月平均値の季節変化

(5) 水田（つくば市真瀬）におけるメタンフラックスと水田管理

メタンフラックス、土壌温度、土壌水分の季節変化を図 93 に示す。メタンの放出量は移植後徐々に増加し、中干し前に最初のピークを示した。放出量は中干し時に一時的に減少した後、再び増加し、落水まで大きな放出が続いた。2001 年は 9 月初めに水稻の収穫が行われたが、その後も降雨が多く、水田が湛水状態となる場合が多かったので、9 月上、中旬でも大きな放出量が観測された。移植日から 9 月末までのフラックスの積算値は、2001 年が $7.2 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2}$ (5.4 g C m^{-2})、2002 年（9 月 24 日まで）が $8.3 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2}$ (6.2 g C m^{-2}) であった。

メタン放出量は年間で $5 \sim 6 \text{ g C m}^{-2}$ と小さく、年間の炭素収支を評価する場合には溶存態炭素収支とともに無視できる大きさであった。ただし、地球温暖化指数（GWP、積算期間 100 年）を用いて CO_2 に換算すると、メタン放出量は $42 \sim 50 \text{ g C m}^{-2}$ に相当し、 CO_2 収支（NEE）に比べて無視できない大きさとなる。本研究の対象とした水田では数年毎に厩肥が投入されるが、これを除外して年間の炭素収支を比較すると、2001 年は 103 g C m^{-2} 、2002 年は 156 g C m^{-2} と、両年とも生態系から炭素が流出するという結果になった。

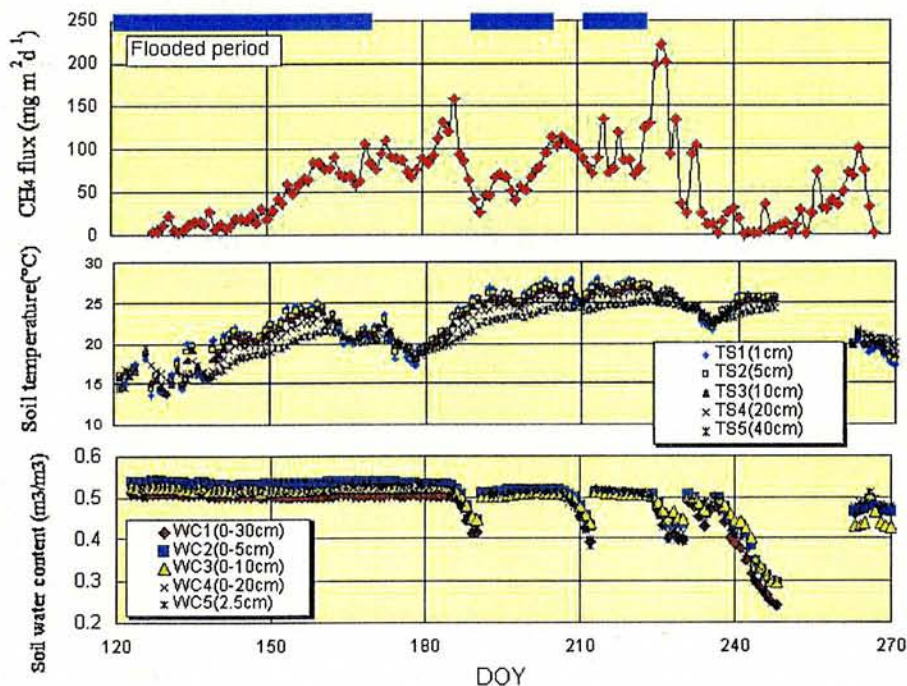


図93 メタンフラックス、土壌温度、土壌水分の季節変化と灌水管理

(6) 湿原サイトの CO_2 およびメタンフラックスの季節変化の関係

釧路赤沼サイトでは、4 月中旬の消雪直後からメタンが放出され、吸収 CO_2 フラックスの増加とともに、メタンフラックスも増加した（図 94）。 CO_2 フラックスは、10 月にはゼロから放出に転じたが、メタンの放出は地表面が凍結した冬季（積雪 $5 \sim 10 \text{ cm}$ ）も続いた。メタンの年間放出量を評価するうえで、冬季のフラックスは無視できない。釧路温根内サイトの夏季の CO_2 吸収量は、LAI の違いと湛水条件を反映して、赤沼サイトの約 2 倍であった。

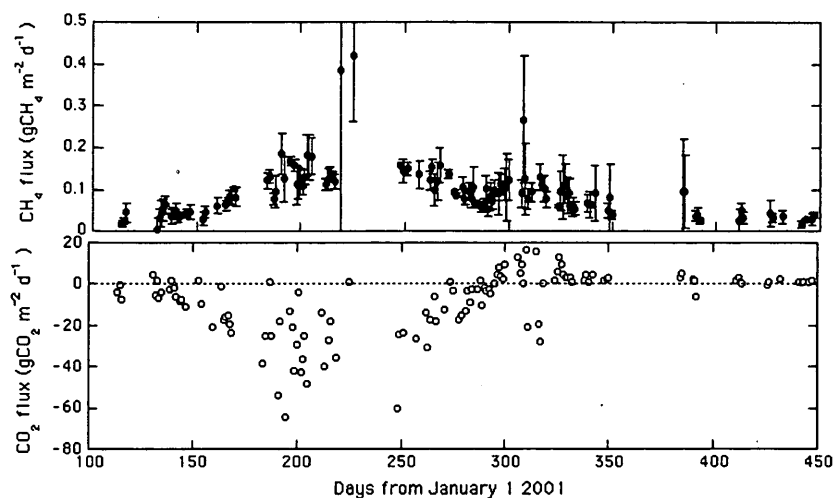


図 94 釧路赤沼サイトの
日合計メタン、CO₂ フラッ
クスの季節変化。メタンフ
ラックスは傾度法による。

(7) 暖地牧草地サイトでのフラックス観測による CO₂ 固定量と乾物収穫量との関係

牧草飼料畑のイタリアンライグラスについて CO₂ フラックス通年観測を行い、乾物収穫量との関係 (図 95) を調べた。その播種から生育期間中での CO₂ 固定量は乾物平均増加量と良く一致し、80 日経過での群落の乾物重増加量が 666g_m⁻² に対し、フラックスから求めた CO₂ 固定量は 500g_m⁻² であった。また、3 月 31 日までに固定した CO₂ は、乾物重が 1145g_m⁻² に対し、585g_m⁻² で小さかった。

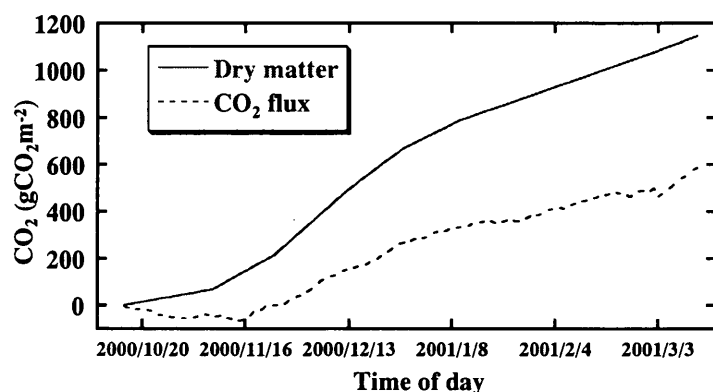


図 95 牧草地に
おける CO₂ 固定
量と乾物重の関係

(8) 熱帯多雨林での炭素収支分配の解析例

各地の森林の分配率を比較することにより、その森林の特徴が明らかになる。また、炭素分配の仕方の年々変化から、群落の構成要素毎の気候変化に対する炭素吸収・排出の敏感度あるいは鈍感度が明らかになり、温暖化の進行に対する森林の応答特性に対する知見が得られる可能性が期待される。ここでは簡易的な方法で、このサイトの炭素分配を概算してみた。

ブキツスハルトでは観測されている項目は NEP (-NEE と仮定)、地上部バイオマス年増加量 ΔB 、リターフォール地上部 (落葉落枝量) L_a 、土壌呼吸 R_{soil} である。ここで、バイオマス増加分の地下部と地上部の比 $\Delta B_r / \Delta B_a$ をバイオマスのそれ ($B_r / B_a = \alpha$) と等しい、ま

た植物呼吸の地下部と地上部の比も α に等しいと仮定した。また、リターフォールの地上部と地下部（根の枯死量） L_r/L_a も α に等しいと仮定した。そのとき、一次の純生産量 NPP は $NPP = \Delta B + L + C$ で表され被食 C が無視できるとすると、 $NPP = (1 + \alpha)(\Delta B_a + L_a)$ となる。ここでは $\alpha = 0.2$ と置くと、 $NPP = 8.9 \text{ tonC/ha/yr}$ が得られる。 NPP から非植物呼吸 R_h を差し引くと NEP であるから、 NPP と NEP から非植物呼吸 R_h が求まる。また、日没から日出までの温度差が 3°C 程度と小さいので、 R_{soil} は日没観測時のそれを夜間の値と仮定した。夜間は R_{soil} は $0.05 \text{ mg CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ 日中は $0.1 \text{ mg CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ の観測値が得られている。年積算にすると R_{soil} は 6.5 tonC/ha/yr となる。 R_{soil} と非植物呼吸 R_h から根の呼吸 R_{ar} が求まる。仮定から、 R_{aa} が求まり、生態系呼吸 R_{ec} 、全生産 GPP が求まっていく。これらの結果から、このサイトの炭素収支の特徴をみてる。被食 C が無視できるとき、リターフォール L の分解が早い熱帯では、1年単位でみれば、 $L = R_h$ (非植物呼吸) が考えられる。そのときは、 $NEP = \Delta B$ (バイオマス増加量) となる。新植林・再植林 CDM (クリーン開発メカニズム) の場合の対照植生ベースラインともなる ΔB が渦相関法で測定できるということになる。このサイトでは $NEP = 4.8, \Delta B = 5.2 \text{ tonC/ha/yr}$ と似た値をとり、また、 $L = 3.7, R_h = 4.1 \text{ tonC/ha/yr}$ と同等であり、その仮定を支持している。ブキツスハルトでの地下部も含むバイオマス調査でも、これを否定しないデータが得られている（森川，2002）³²⁾。このように、異なる手法を組み合わせれば、比較的容易な観測から、対象とする群落の炭素循環が推定できることが示された。

4. 今後の課題

本研究により各種生態系での各サイトでの CO_2 交換量の季節変化、 NEE の年間積算値、その年々変動が解明され、各サイトでの NEE の $APAR$ 、気温、土壌水分などとの関係式が求められた。これらのデータ、成果のデータベース化を図った。これらのデータの共有化と総合的解析を今後さらに進めたい。さらに東アジア領域でのデータの集積を推進し、AsiaFlux・FLUXNET に反映させたい。

具体的な検討課題としては以下が挙げられる。

(1) 総合的解析による成果のとりまとめと成果の発信

- ・各種温帯森林での結果の相互比較、炭素収支の特徴の取りまとめ
- ・フラックス観測解析結果と生態系調査との比較検討
- ・農耕地の温室効果ガス収支とバイオマス炭素蓄積調査の関係の解析
- ・高山、富士吉田の各サイトにおける長期観測結果による気候年々変化の変動の解析
- ・ NEE の算定での CO_2 貯留量の扱い、夜間安定時の扱いについての定量的検討

(2) 本研究の成果のデータベース化と今後の炭素収支研究への貢献

- ・統合データ構築に向けた既存データのデータベース化：高山、富士吉田、川越、岡山水田、つくば水田サイト

(3) 統合的データベース構築にあたっての検討課題の整理

- ・オープンとクローズドタイプのフラックス測定結果の差異、年間積算値への影響
- ・データ品質管理手法（データ除去法、欠損データの補完法などの影響）の検討
- ・原データをすべて集積して、統一的な解析スキームでデータ QC、欠測補完過程、全データ解析保存するシステムの検討

5. 国際共同研究等の状況

本研究は東アジアでのフラックス観測と連携し、FLUXNET、AsiaFlux、AmeriFluxなどの観測ネットワークの活動の一環として進めてきた。以下に国際共同の状況を報告し、今後の展開に活かしたい。

(1) タワーフラックス観測結果の相互比較を容易にするため、同一サイトにおいて日米それぞれの方法で測定したフラックスを比較し、観測・解析手法間での差異を定量化する必要がある。

2001年8月、AsiaFluxとAmeriFluxの森林総研、産総研など合計5つの研究機関が参加して、北海道苫小牧市においてフラックス測定手法に関する国際比較観測を実施した。参加機関の日本での代表的なフラックス測定装置を使つてのこの国際比較で良好な比較結果を得た。

(2) タイ国での観測のため、タイ国家研究評議会NRCTの承認を得て観測を実施している。観測にあたってはタイ王室林野局RFD流域部と共同研究体制をとっている。

インドネシア国での観測のため、インドネシア科学院LIPIの承認を得ている。観測にあたってはムラワルマン大学熱帯降雨林研究センターPPHTと共同研究体制をとっている。

(3) 東アジアで最大の水田面積を占める中国では、イネームギの二毛作が行われている地域が多く、本研究の対象とした水稲単作水田とは炭素収支、エネルギー収支が異なることが予想される。モンスーンアジアの水田の炭素収支を評価するうえでは、本研究と同様の観測を中国の二毛作水田で実施することが重要である。このため、2002年10月に、日中環境保護合同協力協定に基づく共同研究「長期フラックスモニタリングによる東アジア農業生態系の炭素収支の把握」(カウンターパート：中国科学院大気物理研究所)を提案し、採択された。これに基づき2003年2月には共同研究の具体的内容を協議して、大気物理研究所は2003年秋より、中国揚子江流域(Wuxi郊外, 31°37'N, 120°28'E)の二毛作水田で観測を開始する予定であり、今後はAsiaFluxとも連携しながら、この観測点での研究協力を進めていく予定である。

(4) 科学技術振興調整費による国際共同研究「地球環境変化に伴う北極域陸域生態系の温室効果ガス収支の変動解明とデータの統合化に関する研究」(2000-2001年)で、アラスカ北極海沿岸の湿地(ツンドラ)を対象として本研究と同様の研究を実施している米国San Diego State大学のW.C.Oechel教授と、アラスカ州Barrowで共同観測を実施した。2002年以降は、日米地球環境リエゾン会合に基づく国際共同研究「CO₂濃度上昇による地球温暖化が自然および農業生態系に及ぼす影響評価」(コンタクトパーソン：Oechel教授)のなかで、共同研究を継続している。

6. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<学術誌（査読あり）>

- (1) N. Saigusa, S. Yamamoto, S. Murayama, H. Kondo, M. Gamo : Proceedings of International Workshop for Advanced Flux Network and Flux Evaluation, Sapporo, 145-148, (2001)
“A long-term flux measurement over a cool-temperate deciduous forest by the eddy covariance method”
- (2) S. Yamamoto, N. Saigusa, S. Murayama, H. Kondo: Proceedings of International Workshop for Advanced Flux Network and Flux Evaluation, Sapporo, 5-10, (2001) “A long-term results of flux measurement from a temperate deciduous forest site (Takayama)”
- (3) A. Miyata, R. Leuning, O.T. Denmead, J. Kim and Y. Harazono: Agric. Forest Meteorol., 102(4), 287-303 (2000). “Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field.”
- (4) Y. Harazono, C. Suzuki, Md. A. Baten, A. Miyata : Bulletin of the Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba, 1 Supplement , 67-70 (2001) “Greenhouse gas budget of Japanese rice field as an AsianFlux Network site under recent field management.”
- (5) A. Miyata, Y. Harazono, J. Kim, H. Terai, H. Takahashi, F. Nishio: Proceedings of International Workshop for Advanced Flux Network and Flux Evaluation, 27-29 Sep. 2000, Sapporo, Japan, 29-32 (2001) “Carbon dioxide and methane fluxes at Kushiro Mire. “
- (6) T. Iwata, E. Ohtaki, T. Kishida, K. Nishimura, Y. Higuchi: Proceedings of International Workshop for Advanced Flux Network and Flux Evaluation, 27-29 Sep. 2000, Sapporo, Japan, 33-37 (2001) “Seasonal variations of CO₂ flux over cultivated field in western Japan.”
- (7) T. Kishida, T. Iwata, T. Miura, E. Ohtaki, K. Nishimura, Y. Higuchi, A. Ohtou Y. Harazono, and A. Miyata: J. Agric. Meteorol. Japan, 57, 117-126 (2001) “Factors Affecting the Diurnal Variation of Carbon Dioxide Concentration in Standing Water in a Rice Field”
- (8) Y. Ohtani, Y. Mizoguchi, T. Watanabe, Y. Yasuda, M. Okano: International Workshop for Advanced Flux Network and Flux Evaluation. 129-132 (2001) “Seasonal change of CO₂ flux above an evergreen needle leaf forest in temperate region, Fujiyoshida, Japan” .
- (9) A. Miyata, Y. Harazono, J. Kim, H. Terai, F. Takahashii, Nishio, Proceedings of International Workshop for Advanced Flux Network and Flux Evaluation, 27-29 Sep. 2000, Sapporo, Japan, 29-32. (Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, CGER-M-011-2001) (2001) “Carbon dioxide and methane fluxes at Kushiro Mire.”
- (10) H. Kondo, N. Saigusa, S. Murayama and S. Yamamoto: Journal of the Meteorological Society of Japan, 79, 11-21. 2001 “A numerical simulation of the daily variation of CO₂ in the central part of Japan”

- (11) S. Saigusa, S. Yamamoto, S. Murayama, H. Kondo, Y. Fujinuma, and T. Hirano: Extended abstracts, Sixth International Carbon Dioxide Conference, Vol.1, 329-331 (2001).
- (12) T. Kishida, T. Iwata, T. Miura, E. Ohtaki, K. Nishimura, Y. Higuchi, A. Ohtou, Y. Harazono, and A. Miyata: J. Agric. Meteorol., 57, 117-126 (2001).
- (13) N. Saigusa, S. Yamamoto, S. Murayama, H. Kondo, and N. Nishimura: Agricultural and Forest Meteorology, 112, 203-215 (2002) "Gross primary production and net ecosystem production of a cool-temperate deciduous forest estimated by the eddy covariance method."
- (14) J. Hong, J. Kim, A. Miyata and Y. Harazono: J. Geophys. Res. 107, D22, 4623, (2002) "Basic characteristics of canopy turbulence in a homogeneous rice paddy"
- (15) K. Takagi, A. Miyata, Y. Harazono, N. Ota, M. Yoshimoto, M. Komine: Agric. Forest Meteorol. 115, 173-181 (2003) "An alternative approach to determine zero-plane displacement and its application to a lotus paddy field"
- (16) 平田竜一・寺山明宏・鈴木義則・大場和彦・黒瀬義孝・丸山篤志:九州の農業気象、II (9)、p15-16 (2000) 「暖地牧草畑における夏の CO₂ フラックス観測」
- (17) 谷 誠: 森林科学、28, 23-27 (2000) 「森林消失の気候に及ぼす影響を展望する」
- (18) 谷 誠: 科学、71, 23-27 (2001) 「熱帯雨林は地球の肺か」
- (19) 大谷義一: 森林科学、33, 10-17 (2001) 「二酸化炭素フラックス」
- (20) 杉浦裕義、大場和彦、黒瀬義孝、丸山篤志、真木太一:九州の農業気象、2 (10)、9-12 (2001) .
- (21) 鰐谷憲、文字信貴・山口浩司: 農業気象 57, 93-99, (2001) 「REA 法による CO₂ フラックス長期観測システムの開発 -密度変動補正法の検討を含む-
- (22) 杉浦裕義・大場和彦・黒瀬義孝・丸山篤志・真木太一・筑紫二郎:九州の農業気象、II (10)、5-8 (2001) 「暖地トウモロコシ畑の熱収支について」.
- (23) 中井裕一郎、三枝信子、平野高司、ロバートエバンス、大谷義一、平田竜一、鳥山敦、北村兼三、鈴木覚、山本晋: 水文・水資源学会誌、15 (6)、665-672. (2002) 「2001 年 8 月、苫小牧と札幌で行われた日米フラックス比較観測」
- (24) 中本恭子・新美洋・大場和彦:九州の農業気象、II (11)、23-24 (2002) 「家畜スラリー施用飼料畑における土壌面 CO₂ フラックスについて」
- (25) 高梨聡、小杉緑子、谷誠、大手信人、矢野雅人、田中広樹、田中克典: 水文・水資源学会誌 15, 268-283 (2003) 「ヒノキ林における降雨中および降雨後の蒸発散過程」
- (26) 蒲生稔: 熱帯林業, 48 (2003) 「渦相関法による生態系純生産量の測定」.
- (27) 原蘭芳信・平野高司・三枝信子・大谷義一・宮田明・大滝英治・文字信貴: 農業気象、59 (1): 69-80 (2003) 「地球環境研究におけるフラックス長期観測の役割と最近の動向」

<学術誌 (査読なし)>

- (1) Y. Harazono, C. Suzuki, Md. A. Baten, A. Miyata: Bulletin of the Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba, 1 Supplement, 67-70 (2001) "Greenhouse gas budget of Japanese rice field as an AsianFlux Network site under recent field management"
- (2) Y. Ohtani, Y. Mizoguchi, T. Watanabe, Y. Yasuda and M. Toda: Sixth Int'l Carbon Dioxide

- Conf. Extended Abstract Vol.1, 469-472 (2001) “Carbon dioxide flux above and evergreen needle leaf forest in a temperate region of Japan” .
- (3) T. Iwata, E. Ohtaki, T. Kishida, K. Nishimura, Y. Higuchi: Proceedings of International Workshop for Advanced Flux Network and Flux Evaluation, 27-29 Sep. 2000, Sapporo, Japan, 33-37 (2001) “Seasonal variations of CO₂ flux over cultivated field in western Japan”
 - (4) A. Miyata, Md. A. Baten, T. Yamada, H. Nagai, Y. Harazono, C. Takamura: Proceedings of the 2nd International Workshop on Advanced Flux Network and Flux Evaluation, 9-11 January 2002, Jeju, Korea, 46 (2002) “Budgets of carbon and greenhouse gases at a customarily cultivated rice paddy in central Japan during the 2001 growing season”
 - (5) T. Yamada, A. Miyata, Y. Harazono, Md. A. Baten and Y. Harazono: Proceedings of the 2nd International Workshop on Advanced Flux Network and Flux Evaluation, 9-11 January 2002, Jeju, Korea, 87-88 (2002) “Plant and soil respiration in paddy field”
 - (6) Y. Harazono, Md. A. Baten, C. Takamura, A. Miyata: Proceedings of the 2nd International Workshop on Advanced Flux Network and Flux Evaluation, 9-11 January 2002, Jeju, Korea, 14-15 (2002) “Effect of field management on CO₂ budget of rice field in central Japan”
 - (7) K. Ono, A. Miyata, T. Himono, Y. Harazono, Proceedings of the 2nd International Workshop on Advanced Flux Network and Flux Evaluation, 9-11 January 2002, Jeju, Korea, 94-95 (2002) “Seasonal variations of CO₂ flux and energy balance of three different communities in Kushiro marsh, Japan”
 - (8) H. Nagai, A. Miyata, Md. A. Baten, G. Han, T. Yamada, K. Ono, M. Yoshimoto, Y. Harazono, N. Tase, Y. Hamada, S. Ootsu: Proceedings of the 2nd International Workshop on Advanced Flux Network and Flux Evaluation, 9-11 January 2002, Jeju, Korea, 19-20 (2002) “Heat budget problem considering for the storage term in the water body of the paddy field”
 - (9) Y. Ohtani: Farming Japan, 37(1):13-17 (2003) “An introduction to the FFPRI FluxNet: Long-term observation of forest-atmosphere CO₂ exchange in different types of forests in Japan”
 - (10) 三枝信子: 気象研究ノート, vol.199, pp.124-129 (2001) 「オープンパス型とクローズドパス型の赤外分析計を用いたフラックス観測の比較, 微量気体のフラックス」
 - (11) 山本晋: 気象研究ノート, 199, 227-234 (2001) 「グローバルフラックス測定網/FLUXNET計画」
 - (12) 岩田 徹, 大滝英治: 気象研究ノート, 199, 105-114 (2001) 「微量気体のフラックスーCO₂ フラックスー, 地表面フラックス測定法 (塚本修・文字信貴編)」
 - (13) 宮田明, 原蘭芳信, 気象研究ノート, 199, 114-119 (2001) 「メタンフラックスの測定」
 - (14) 宮田明, 原蘭芳信: 平成 12 年度気象環境研究会資料集, 農業環境技術研究所, 17-30 (2001) 「地上からみた農業生態系と温暖化ガス」
 - (15) 大谷義一: 平成 12 年度気象環境研究会—陸域生態系における温室効果ガスのモニタリングとモデル—, 37-41, 農業環境技術研究所 (2001) 「地上観測からみた森林生態系と温室効果ガス」
 - (16) 高木健太郎・溝口康子・鈴木智恵子: 生物と気象, 1, 23 (2001) 「AsiaFlux ワークショップ 2000 報告」

- (17) 大谷義一：現代林業，415，54-56（2001）「森林総研フラックスネットで CO₂ 吸収量を測定」
- (18) 大谷義一・溝口康子・渡辺力・安田幸生・戸田求：関東の農業気象，28:35-40（2002）「乱流変動法による森林生態系純生産量の測定ー富士吉田アカマツ林ー」
- (19) 大谷義一：日本農業気象学会フラックス観測・評価部会「フラックス観測の最近の進歩」：37-41（2002）「CO₂ フラックスの長期観測における欠測データの補間」
- (20) 大谷義一：林業技術，727:16-19（2002）「森林の CO₂ 吸収量の測定ーフラックス観測ネットワークー」
- (21) 岩田 徹：陸域生態系における二酸化炭素のフラックス観測の実際（Asia Flux 運営委員会編），CGER-A008-2002，国立環境研究所地球環境研究センター，p 32-48（2003）「渦関連法によるフラックス解析の実際」

<書籍>

- (1) 三枝信子：地球環境調査計測事典（第1巻 陸上編），竹内均監修，フジテクノシステム，792-803（2002）「植物群落の水・熱・CO₂ フラックス測定法」

<報告書類等>

- (1) 野尻 淳司，岩田徹，大滝英治，原菌芳信，宮田明：岡山大学環境計測共同利用施設年報しぶかわ 21，p15-23（2000）「水稻群落上でのメタンフラックス」.
- (2) 宮田明，山田智康：日本農業気象学会フラックス観測・評価研究部会編，フラックス観測の最近の進歩，17-21（2002）「微量気体のフラックス」
- (3) 大谷義一：独立行政法人森林総合研究所研究成果発表会講演要旨集，（2002）「森林の CO₂ 吸収量をタワーではかる」
- (4) 宮田明：平成 13 年度農業環境技術研究所年報，39-42（2003）「農業生態系における CO₂ フラックスの長期観測」

（2）口頭発表

- (1) N. Saigusa, S. Yamamoto, S. Murayama, H. Kondo: American Meteorological Society, 24th Conference on Agricultural and Forest Meteorology, 210-211, Davis, USA (2000) "Gross primary production and net ecosystem exchange of a cool-temperate deciduous forest estimated by the eddy covariance method".
- (2) N. Saigusa, S. Yamamoto, S. Murayama, H. Kondo: International workshop for Advanced Flux Network and Flux evaluation, 74, 27-29, September, Sapporo (2000) "A long-term flux measurement over a cool-temperate deciduous forest by the eddy covariance method".
- (3) A. Miyata et al.: Quebec 2000: Millennium Wetland Event (2000) "Micrometeorological measurements of carbon dioxide and methane exchanges at Kushiro Mire, Japan."
- (4) Y. Harazono, A. Miyata, N. Ota, C. Takamura, C. Suzuki: The 24th Conference on Agriculture and Forest Meteorology, Davis, USA (2000), "Greenhouse gas budget at Japanese rice paddy as an AsiaFlux Network site"

- (5) A. Miyata, Y. Harazono, J. Kim: Quebec 2000: Millennium Wetland Event (2000)
“Micrometeorological measurements of carbon dioxide and methane exchanges at Kushiro mire, Japan”
- (6) N. Saigusa: The 9th Japan-US Workshop on Global Change, Carbon Cycle Management in Terrestrial Ecosystem, Mita Tokyo (2001) “Long-term measurements over forest ecosystems in Japan”
- (7) N. Saigusa, S. Yamamoto, S. Murayama, H. Kondo, Y. Fujinuma, and T. Hirano: Sixth International Carbon Dioxide Conference, Extended Abstract, TE26, Sendai (2001)
- (8) S. Yamamoto, N. Saigusa, Y. Harazono, Y. Fujinuma, G. Inoue, T. Hirano, and Y. Fukushima: Extended Abstract, Sixth International Carbon Dioxide Conference, Sendai, 404-407.
- (9) H. Kondo, N. Saigusa, S. Murayama, S. Yamamoto, 2001: Extended Abstract, 6th International CO₂ conference, 98-99 (2001)
- (10) S. Yamamoto, N. Saigusa, Y. Ohtani, Y. Fujinuma, Gen Inoue, Takashi Hirano and Yoshihiro Fukushima: EOS, Trans., AGU, 82, B41A-03, 2001.12. (2001) “Present Status of Asia Flux Network and a View Toward the Future”
- (11) N. Saigusa, S. Yamamoto, S. Murayama, M. Gamo, H. Kondo, et al: AGU Fall meeting, B42D-02 (2001).
- (12) Y. Ohtani, Y. Mizoguchi, T. Watanabe, Y. Yasuda and M. Toda: Sixth Int'l Carbon Dioxide Conf. Extended Abstract Vol.1, 469-472 (2001)
- (13) Y. Ohtani, T. Watanabe, Y. Mizoguchi, Y. Yasuda, M. Toda, M. Okano, Y. Nakai, K. Kitamura, S. Suzuki, T. Saito, Y. Kominami, K. Tamai, T. Miyama, Y. Goto and T. Shimizu: Long-term carbon dioxide exchange measurement above Japanese forests by FFPRI FluxNet., EOS Trans., AGU, 82, F218 (B51A-0172). (2001)
- (14) Y. Ohtani, Y. Mizoguchi, T. Watanabe, M. Okano, Y. Yasuda, M. Toda, Y. Chiba, T. Kawasaki, M. Araki, T. Ohtsuka, Y. Abe, T. Nakano, S. Mariko, : Flux Observation Activities and Sites in Japan -Fujiyoshida Forest Meteorology Research Site-, CGER-Report M010-2001, Center for Global Environmental Research, 134-135 (2001)
- (15) Md. A. Baten, A. Miyata, Y. Harazono: Sixth International Carbon Dioxide Conference, Sendai, Japan (2001) “Differences in CO₂ exchange at rice field of Kanto, Japan by yearly different climate”
- (16) R. Hirata, K. Ohba et al: 6th International Carbon Dioxide Conference, 387-390 (2001)
- (17) H. Iwashita, N. Saigusa, S. Murayama, S. Yamamoto, A. Barr, and K. Higuchi: AsiaFlux Workshop, Korea (2002)
- (18) T. Iwata. and E. Ohtaki: Proceedings of the 2nd International Workshop on Advanced Flux Network and Flux Evaluation, 9-11 January 2002, Jeju, Korea, p30 (2002) “Long-term Measurements of CO₂ Flux over a Cultivated Field in Western Japan”
- (19) H. Wang, N. Saigusa, S. Yamamoto, Y. Fujinuma, and T. Hirano: Asia Flux Workshop, Korea (2002)
- (20) Y. Ohtani, T. Shimizu, Y. Mizoguchi, T. Watanabe, Y. Yasuda, M. Toda, A. Shimizu and

- H. Daimaru: Behavior of winter net ecosystem CO₂ exchange of warm- and cool-temperate coniferous forests in Japan. Proc. 2nd Asia FLux WS., 44 (2002)
- (21) S. Yamamoto, N. Saigusa, Y. Ohtani, A. Miyata, Y. Fujinuma, Gen Inoue, Takashi Hirano and Yoshihiro Fukushima: The Asia Flux Network: Present Activity and Its Extension. Proc. 2nd Asia -Flux WS., 3-4 (2002)
- (22) N. Saigusa, S. Yamamoto, S. Murayama, and H. Kondo: Abstracts for International Symposium at Gifu University, Evaluation of Terrestrial Carbon Storage and Dynamics by In-situ and Remote Sensing measurements, 62-66. (Invited oral presentation: 13th November 2002, Gifu, Japan) (2002) "Seasonal and inter-annual variation of Gross primary production and net ecosystem exchange at a cool temperate deciduous forest in Takayama"
- (23) Md. A. Baten, A. Miyata and Y. Harazono: Sixth International Carbon Dioxide Conference, Sendai (2001)
- (24) Y. Harazono, Md. A. Baten, C. Takamura and A. Miyata: The 2nd International Workshop on Advanced Flux Network and Flux Evaluation, Jeju, Korea (2002).
- (25) A. Miyata, Md. A. Baten, T. Yamada, H. Nagai, Y. Harazono and C. Takamura: The 2nd International Workshop on Advanced Flux Network and Flux Evaluation, Jeju, Korea (2002)
- (26) T. Iwata, and E. Ohtaki: The 2nd International Workshop on Advanced Flux Network and Flux Evaluation, Jeju, Korea (2002)
- (27) T. Yamada, A. Miyata, Y. Harazono, Md. A. Baten and Y. Harazono: The 2nd International Workshop on Advanced Flux Network and Flux Evaluation, Jeju, Korea (2002)
- (28) K. Ono, A. Miyata, T. Himono and Y. Harazono: The 2nd International Workshop on Advanced Flux Network and Flux Evaluation, Jeju, Korea (2002)
- (29) H. Nagai, A. Miyata, Md. A. Baten, G. Han, T. Yamada, K. Ono, M. Yoshimoto, Y. Harazono, N. Tase, Y. Hamada and S. Ootsu: The 2nd International Workshop on Advanced Flux Network and Flux Evaluation, Jeju, Korea (2002).
- (30) S. Yamamoto: FLUXNET 2002, Synthesis Workshop (2002) "Seasonal Variations of CO₂, H₂O and Heat Fluxes at the Typical Forests in East Asia"
- (31) S. Yamamoto: 8th Int. Congress of Ecology (2002) "Measurement Results of Long-term CO₂ flux at Asia Flux Forest-sites"
- (32) S. Yamamoto: Asia Flux: Circum-Pacific Workshop (2002) "Overview and Preliminary Results"
- (33) G. A. Alexandrov, Y. Yamagata, N. Saigusa, T. Oikawa: The continental carbon cycle, 19-21 March 2003 Lisbon, Portugal CarboEurope office (2003) "TsuBiMo vs Asia Flux: A case study of Takayama. Joint CarboEurope/GCP conference".
- (34) S. Yamamoto et al.: 8th International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to the Air Quality (2003) "Measurement Results of Long-Term CO₂ Flux at Asia Flux Forest-Sites"
- (35) 三枝信子・近藤裕昭・村山昌平・山本晋: 日本気象学会講演要旨集, P216 (つくば)

- (2000) 「夜間のCO₂フラックス観測に及ぼす斜面下降流の影響」
- (36) 三枝信子・蒲生稔・山本晋・村山昌平・近藤裕昭：日本気象学会講演要旨集、(京都) (2000)
「日本の落葉樹林帯における生育期間の年々変動」
- (37) 高村近子，原園芳信，宮田明，太田尚寿，小林義和，鈴木智恵子，田瀬則雄：日本農業気象学会 (2000) 「つくば地域の水田における非耕作期間を含む CO₂ フラックスの特性」
- (38) 鈴木智恵子，高村近子，宮田明，原園芳信：日本気象学会 2000 年秋季大会 (2000) 水田における CH₄ フラックスの季節変化
- (39) 宮田明他：日本農業気象学会 2000 年度大会 (2000) 「釧路湿原の熱収支」
- (40) 桧物聖他：日本農業気象学会 2000 年度大会 (2000) 「釧路湿原における CO₂ フラックスの季節変化」
- (41) 磯山修一他：日本気象学会 2000 年秋季大会 (2000) 「水田灌漑水中の二酸化炭素分圧の動態」
- (42) 青木佳之他：日本気象学会 2000 年秋季大会 (2000) 「岡山県南部における二酸化炭素フラックスの長期連続観測」
- (43) 野尻淳司他：日本気象学会関西支部例会 (2000) 「大気植物間の CO₂ 交換」
- (44) 岩田拓記他：日本気象学会関西支部例会 (2000) 「岡山市における CO₂ 濃度変化」
- (45) 妹尾圭一郎他：日本気象学会関西支部例会 (2000) 「地中温度の日変化」
- (46) 大谷義一・溝口康子・渡辺力・安田幸生・岡野通明・田辺裕美・中野隆志・大塚俊之・鞠子茂・安部良子：日農気講要 2000, 90-91 (2000) 「温帯アカマツ林における CO₂ フラックスの季節変化」
- (47) 大谷義一・溝口康子・渡辺力・安田幸生・岡野通明：日本気象学会 2000 春季講予, 116 (2000) 「森林総研 FluxNet による CO₂ フラックス観測-温帯常緑針葉樹林サイト-」
- (48) 蒲生 稔他：日本気象学会秋季大会 (2000) 「フェノロジー (植物季節) の気候変化 (展葉前線について)」
- (49) 平田竜一・寺山明宏・鈴木義則・大場和彦・黒瀬義孝・丸山篤志：九州の農業気象、II (9)、p15-16 (2000) 「暖地牧草畑における夏季の CO₂ フラックス観測」
- (50) 平田竜一・寺山明宏・杉浦裕義・鈴木義則・大場和彦・黒瀬義孝・丸山篤志：日本農業気象・生物環境調節合同大会講要、p160-161 (2000) 「冬作牧草地における微気象特性 (I) 風速と気温の鉛直分布について」
- (51) 平田竜一・寺山明宏・杉浦裕義・鈴木義則・大場和彦・黒瀬義孝・丸山篤志：日本農業気象・生物環境調節合同大会講要、p162-163 (2000) 「冬作牧草地における微気象特性 (II) 熱収支特性について」
- (52) 平田竜一・寺山明宏・杉浦裕義・鈴木義則・大場和彦・黒瀬義孝・丸山篤志：日本農業気象・生物環境調節合同大会講要、p164-165 (2000) 「冬作牧草地における微気象特性 (III) CO₂ フラックスについて」
- (53) 宮本尚規，岩田徹，青木佳之，大滝英治：日本農業気象学会中国・四国支部会誌 12, p56-59, 2000 年 11 月，倉敷 (2000) 「岡山県南部耕作地における乱流観測」
- (54) 青木佳之，磯山修一，岩田徹，大滝英治：日本気象学会秋季大会講演予稿集 P330, p34-37 2000 年 11 月，京都 (2000) 「岡山県南部における二酸化炭素フラックスの長期連続観測」
- (55) 磯山修一，太田努，青木佳之，岩田徹，大滝英治：日本気象学会秋季大会講演予稿集 P328 ,

- p34-37, 2000 年 11 月, 京都 (2000) 「水田灌漑水中の二酸化炭素分圧の動態」
- (56) 宮田明, 太田尚寿, 原藺芳信, 石井慎太郎, 桧物聖, 神明子, 三浦二郎, 高橋英紀: 日本農業気象学会 2000 年度大会 (2000) 「釧路湿原の熱収支」
- (57) 桧物聖, 宮田明, 原藺芳信, 太田尚寿, 石井慎太郎, 三浦二郎, 神明子: 日本農業気象学会 2000 年度大会 (2000) 「釧路湿原における CO₂ フラックスの季節変化」
- (58) 宮田明: 第 3 回 CEReS 環境リモートセンシングシンポジウム (2000) 「釧路湿原におけるガスフラックスの観測」
- (59) 三枝信子他: 日本気象学会秋季大会 (2001) 「日本の落葉樹林帯における生育期間の年々変動」
- (60) 三枝信子・蒲生稔・山本晋・村山昌平・近藤裕昭: 日本生態学会講演要旨集, H106 (熊本) (2001) 「冷温帯落葉広葉樹林における生育期間の年々変動」
- (61) 三枝信子・山本晋・村山昌平・近藤裕昭: 日本気象学会講演予稿集, P167 (札幌). (2002) 「冷温帯落葉広葉樹林における生態系純生産量の長期変動」
- (62) Y. Harazono et al.: 日本気象学会春季大会 (2001) “Effects of heavy autumn rain on energy and CO₂ exchange over rice field.”
- (63) Md. A. Baten et al.: 農業環境工学関連 4 学会 2001 年合同大会 (2001) “Changes of microclimate and fluxes by high precipitation after rice harvest in 2000”
- (64) 岩田 徹他: 農業環境工学関連 4 学会 2001 年合同大会 (2001) 「岡山地方の耕作地における CO₂ 交換の季節変化」
- (65) 桧物聖他: 農業環境工学関連 4 学会 2001 年合同大会 (2001) 「釧路湿原におけるメタンフラックスの季節変化」
- (66) 大谷義一・溝口康子・渡辺 力・安田幸生・岡野通明: 112 回日本林学会学術講演集, 361 (2001) 「温帯アカマツ天然林における CO₂ 吸収量の季節変化」
- (67) 大谷義一・溝口康子・渡辺 力・安田幸生・戸田 求・岡野通明: 農業工学関連 4 学会 2001 年合同大会講演要旨, 282 (2001) 「温帯アカマツ天然林の正味 CO₂ 交換量」
- (68) 大谷義一: 現代林業, 415, 54-56 (2001) 「森林総研フラックスネットで CO₂ 吸収量を測定」
- (69) 片山辰也他: 第 112 回日本林学会 (2001) 「ボーエン比法等複数の手法を用いたヒノキ林のエネルギー-交換特性の比較・解析」
- (70) 小杉賢一朗他: 第 112 回日本林学会 (2001) 「土壌水分条件がヒノキ林の蒸散に及ぼす影響」
- (71) 道家 樹他: 農業環境工学関連 4 学会 2001 年合同大会 (2001) 「REA 法による CO₂ フラックスの長期観測」
- (72) 鰐谷 憲他: 農業環境工学関連 4 学会 2001 年合同大会 (2001) 「2 高度切替クロードパス法による森林 CO₂ フラックスの測定」
- (73) 平田竜一他: 2001 年度農業環境工学関連 4 学会合同大会 (2001) 「暖地牧草畑における CO₂ フラックス特性」
- (74) 蒲生 稔他: 日本気象学会春季大会講演要旨集, (東京) P245 (2001) 「落葉樹林帯のフェノロジー気候変化(展葉前線について)」
- (75) 三枝信子・山本晋・近藤裕昭・村山昌平・藤沼康実・平野高司: 日本気象学会 2001 (2001)
- (76) 蒲生稔, 林正康, Samreong Panuthai: 日本気象学会秋季大会講演予稿集 C305 (2001)

「熱帯季節林における二酸化炭素収支観測」

- (77) 岩下広和, 三枝信子, 村山昌平, 山本晋, A. Barr, K. Higuchi: 日本気象学会 2001 年秋季大会, B366 (2001)
- (78) Y. Harazono, Md. A. Baten, C. Suzuki and A. Miyata: 日本気象学会 2001 年春季大会 (2001)
- (79) Md. A. Baten, C. Suzuki, A. Miyata and Y. Harazono: 農業環境工学関連 4 学会 2001 年合同大会 (2001)
- (80) 岩田徹, 大滝英治: 農業環境工学関連 4 学会 2001 年合同大会, 2001 年 6 月, つくば市 (2001)
「岡山地方の耕作地における CO₂ 交換の季節変化」
- (81) 猪原幸子, 岩田徹, 大滝英治: 日本農業気象学会中国・四国支部会誌 14, p60-63, 2001 年 11 月, 高松 (2001) 「水稻群落上でのメタンフラックス」
- (82) 牛川希望, 岩田徹, 大滝英治, 西村勝利: 日本農業気象学会中国・四国支部大会講演要旨集, p64-67, 2001 年 11 月, 高松 (2001) 「耕作地における CO₂ フラックスの長期変化特性」.
- (83) 桧物聖, 宮田明, 原菌芳信, 神明子, 伏見元, 谷山明守: 農業環境工学関連 4 学会 2001 年合同大会 (2001)
- (84) 猪原幸子, 岩田徹, 大滝英治: 日本農業気象学会中国・四国支部例会 (2001).
- (85) 牛川希望, 岩田徹, 大滝英治, 西村勝利: 日本農業気象学会中国・四国支部例会 (2001)
- (86) 杉賢一朗・村上靖典・小杉緑子・谷誠: 水文・水資源学会 2001 年研究発表会要旨集、245-246 (2001)
- (87) 高木健太郎・溝口康子・鈴木智恵子: 生物と気象, 1, 23 (2001) 「Asia Flux ワークショップ 2000 報告」
- (88) 道家樹・鰐谷憲・植山雅仁・文字信貴: 農業環境工学関連 4 学会 2001 年合同大会講演要旨, p.151 (2001)
- (89) 平田竜一・鈴木義則・大場和彦・黒瀬義孝・丸山篤志: 農業環境工学関連 4 学会 2001 年合同大会講要、p192. (2001) 「暖地牧草畑における CO₂ フラックス特性」
- (90) 片山辰弥、田中広樹、小杉緑子、立花克朗、谷誠: 第 112 回日本林学会大会 (2001) 「ボーエン比法等複数の手法を用いたヒノキ林のエネルギー交換特性の比較・解析」
- (91) 桧物聖, 宮田明, 原菌芳信, 神明子, 伏見元, 谷山明守: 農業環境工学関連 4 学会 2001 年合同大会 (2001) 「釧路湿原におけるメタンフラックスの季節変化」
- (92) 宮田明: 第 4 回 CERes 環境リモートセンシングシンポジウム (2001) 「湿原の蒸発散量とエネルギー収支, 炭素フラックスのリージョナル規模での推定手法の開発」
- (93) 和田卓巳・谷誠・矢野雅人・田中広樹・小杉緑子: 113 回日本林学会学術講演集、147 (2002)
- (94) 高梨聡・小杉緑子・谷誠・田中広樹・矢野雅人・大手信人: 113 回日本林学会学術講演集、700、(2002)
- (95) 和田卓巳、谷誠、矢野雅人、田中広樹、小杉緑子: 第 113 回日本林学会大会, (2002) 「ヒノキ林の樹体貯熱量の実測と解析」
- (96) 田中成斗、谷誠、田中広樹、小杉緑子: 第 113 回日本林学会大会, (2002) 「芝生及び森林における乱流フラックス特性の比較」
- (97) 高梨聡、小杉緑子、谷誠、田中広樹、矢野雅人、大手信人: 第 113 回日本林学会大会, (2002)

「ヒノキ林における降雨中および降雨後の蒸発散過程」

- (98) 平田竜一・大場和彦・黒瀬義孝・丸山篤志・中本恭子・杉浦裕義・柳博・鈴木義則・真木太一：農業環境工学関連 4 学会 2002 年合同大会講要、p299 (2002)「飼料作物畑における CO₂ フラックス特性」
- (99) 杉浦裕義・筑紫二郎・大場和彦・黒瀬義孝・丸山篤志：農業環境工学関連 4 学会 2002 年合同大会講要、p50 (2002)「イタリアンライグラス畑の蒸発散特性」
- (100) 蒲生稔、前田高尚、藤間剛、林正康、澤本卓治、鶴田治雄、石田厚、Deddy Hadriyanto、Mansur Fatawi、Warsudi：日本気象学会春季大会講演予稿集 P236 (2002)「熱帯多雨林の二次林における二酸化炭素収支観測 (その 4)」
- (101) 蒲生稔、前田高尚、藤間剛、林正康、石田厚、Samreong Panuthai、Deddy Hadriyanto：日本気象学会秋季大会講演予稿集 A109 (2002)「熱帯林 (熱帯多雨林、熱帯季節林) における生態系生産量の概算」
- (102) 山本 晋：環境省一般公開シンポジウム (2002)「フラックス野外観測による森林生態系炭素固定量の解明」
- (103) 山本 晋：大気環境学会年会 (2002)「フラックス野外観測による大気と陸面間の熱・物質交換の研究」
- (104) 宮田明、山田智康、Md. A. Baten、間野正美、原蘭芳信、矢頭秀幸、檜山哲哉、永井秀幸、高村近子、W.C. Oechel：農業環境工学関連 4 学会 2002 年合同大会 (2002)「傾度法によるメタンフラックスモニタリングの問題点」
- (105) 大谷義一・渡辺力・溝口康子・安田幸生・岡野通明・中井裕一郎・北村兼三・鈴木寛・齋藤武史・小南裕志・玉井幸治・深山貴文・後藤義明・清水貴範・戸田求：2002 年 CGER フラックスリサーチミーティング:P-53 (2002)「森林総研フラックス観測ネットワークのアクティビティー—我が国の多様な森林生態系における NEE の連続観測—」
- (106) 大谷義一・渡辺力・溝口康子・安田幸生・戸田求：2002 年 CGER フラックスリサーチミーティング:P-54、(2002)「CO₂ フラックスと貯留変化量測定による夜間の森林生態系呼吸量の測定」
- (107) 山田智康、Md. A. Baten、高村近子、宮田明、原蘭芳信：農業環境工学関連 4 学会 2002 年合同大会 (2002)「慣行栽培水田における夜間 CO₂ フラックスの植物呼吸・土壌呼吸への分離評価」
- (108) 永井秀幸、宮田明、Md. A. Baten、H. G. Han、山田智康、小野圭介、原蘭芳信：農業環境工学関連 4 学会 2002 年合同大会 (2002)「渦相関法におけるトレンド除去法の比較検討」
- (109) 永井秀幸、宮田明、M. A. Baten、G. H. Han、吉越恆、山田智康、小野圭介、高村近子、斉藤誠、原蘭芳信：2002 年 CGER フラックスリサーチミーティング (2002)「非線形回帰法を用いて欠測値補完された真瀬水田アジアフラックスサイトでの生態系 CO₂ 交換量について」牛川希望、近藤文義、大滝英治、2002：岡山県の耕作地における大気—植生間の二酸化炭素交換の季節変化。土木学会中国支部研究発表会講演要旨集、VII-26、2002 年 5 月、岡山。
- (110) 松良俊輔、猪原幸子、大滝英治：土木学会中国支部研究発表会講演要旨集、VII-27、2002 年 5 月、岡山 (2002)「大気—植生間の二酸化炭素交換の日変化の評価」

- (111) 楊冬梅, 三浦健志, 岩田徹, 大滝英治: 日本気象学会関西支部中国地区例会講演要旨集 97, p34-37, 2002 年 11 月, 岡山. (2002)「水田での熱収支」
- (112) 伊勢田絵美, 岩田徹, 大滝英治: 日本農業気象学会中国・四国支部大会講演要旨集, p46-4, 2002 年 11 月, 福山 (2002)「二酸化炭素の無次元勾配」
- (113) 松本雄大, 三浦健志, 岩田徹, 大滝英治: 日本農業気象学会中国・四国支部大会講演要旨集, p34-36, 2002 年 11 月, 福山 (2002)「稲群落上での二酸化炭素と水蒸気フラックス(1)」.
- (114) 大西和人, 三浦健志, 岩田徹, 大滝英治: 日本農業気象学会中国・四国支部大会講演要旨集, p37-39, 2002 年 11 月, 福山 (2002)「稲群落上での二酸化炭素と水蒸気フラックス(2)」.
- (115) 宮田明, 間野正美, 原蘭芳信, 小野圭介: 日本気象学会 2002 年度春季大会 (2002)「低温環境でのオープンパス型赤外線ガス分析計の動作特性」
- (116) 小野圭介, 宮田明, Md. A. Baten, 間野正美, 原蘭芳信: 農業環境工学関連 4 学会 2002 年合同大会 (2002)「各種湿地生態系におけるアルベドと PAR 反射率の季節変化」
- (117) 宮田明: 第 5 回環境リモートセンシングシンポジウム (2002)「湿原のエネルギー収支, 炭素収支のリージョナル規模での推定手法の開発」
- (118) 蒲生稔, 前田高尚, 藤間剛, 林正康, 石田厚, Samreong Panuthai, Deddy Hadriyanto: 日本気象学会春季大会講演予稿集 P221 (2003)「熱帯林生態系における渦相関法による生態系純交換量NEEの測定」
- (119) 三枝信子・山本晋・村山昌平・近藤裕昭: 日本生態学会第 50 回大会 (つくば) PB2-015 (2003)「微気象学的方法によって測定された冷温帯林における生態系純生産量の年々変動」
- (120) 和田卓己, 谷誠, 小杉緑子, 高梨聡: 第 114 回日本林学会大会(2003)「ヒノキ林における群落内貯熱量各項の算定」
- (121) 山田智康, 永井秀幸, 斉藤誠, 宮田明, 原蘭芳信: 日本生態学会大会 (2003)「水田上の CO₂ フラックス観測による生態系呼吸要素および総光合成量の評価」
- (122) 小野圭介, 宮田明, 斎藤 誠, 原蘭芳信, 2003 年度日本気象学会春季大会 (2003)「Open-path IRGA の校正と機種間比較」

(3) 出願特許
なし

(4) 受賞等

- ①山本 晋: 大気環境学会 学術賞、第 43 回大気環境学会年会、2002 年 9 月 12 日

(5) 一般への公表・報道等

- ① NHKおはよう北海道 (2002 年 10 月 18 日, 低層湿原観測点の観測内容について 3 分間ほど紹介)
- ② プレスリリース「森林総研フラックスネット」(2000.5.31)
- ③ M. Gamo, T.Toma, D. Hadriyanto, M. Fatai, 2002-2003: LIPI 報告書 (第 1 四半期、第二四半期、第 3 四半期、終了)
- ④ M. Gamo, and S. Panuthai NRCT 報告書: 2002 年 4 月、2002 年 10 月、2003 年 4 月)

Home Page <http://staff.aist.go.jp/old-gamo/>

7. 成果の政策的な寄与・貢献について

本研究で得られたデータは、「陸域生態系における温室効果ガスフラックスのデータベース」によって(独)産総研 先端情報計算センターにて公開中である。このデータベースは、(独)農業環境技術研究所、岡山大学等とともに推進する分散型データベースシステム（エコシステムデータベース）の一環である。（<http://www.aist.go.jp/RIODB/PXECO/>）

さらに、Asia Flux の活動を通じて、成果の普及、観測データの公開を行う予定である。