

(1) 農林生態系における炭素循環機構の解明に関する研究

② 草地における炭素循環系の定量的解析に関する研究

研究代表者 草地試験場 桐田博充

農林水産省 草地試験場

生態部 生態システム研究室 奥 俊樹、高橋繁男、築城幹典  
生態部 草地生態研究室 桐田博充

研究期間 平成3年度～4年度  
平成3－4年度合計予算額 11,714千円

[要旨] 放牧草地における炭素循環機構を解明するため、放牧草地における炭素循環コンパートメントモデルを検討し、炭素循環の主経路を決定した。放牧草地のエネルギー循環モデルを基本に、炭素量の変動を予測するプロトタイプモデルによるシミュレーションの結果、年間収支では、草地から大気への二酸化炭素の放出が、大気から草地への取り込みを上回った。また、放牧草地の主要な二酸化炭素放出経路である土壌呼吸と、温度および含水比との関係を検討し、地表面からの  $\text{CO}_2$  放出速度は、地温の指数関数で、リターからの  $\text{CO}_2$  放出速度は、温度と含水比をパラメータとする回帰式で近似した。

また、渦相関法により放牧草地の  $\text{CO}_2$  ガスフラックスを実測した。放牧草地の  $\text{CO}_2$  フラックスは日射強度、気温、風速などにより変化したが、日中には群落面への  $\text{CO}_2$  吸収フラックスが、夜間には群落面からの  $\text{CO}_2$  放出フラックスが観測され、晴天時の放牧草地では、大気-草地群落間の1日の二酸化炭素収支は、草地群落への吸収が大気への放出を上回った。

[キーワード] 放牧草地 炭素収支 土壌呼吸 シミュレーションモデル 渦相関法

1. 序

大気中の二酸化炭素、メタン等温室効果ガスの濃度は、地圏、水圏、生物圏との循環の中でその平衡を保ってきたが、人口の急激な増加による化石燃料の消費、森林の減少、農業生産の拡大等によって、そのバランスが崩れ、濃度が上昇しつつある。このような状況下で、草地生態系の炭素収支を解明し、温室効果に対する関与を明らかにするとともに、さらに環境変化が草地生態系の炭素収支に及ぼす影響を定量的に評価する必要がある。

人工草地は、その造成時には、前植生の破壊にともなって、一時的に二酸化炭素の放出源となると推察される。しかし、その後、定着・維持されていけば、多年性草本群落である草地は、地下部現存量が地上部現存量に比して大きく、地下部から土壌への有機物移行量も大きいなど、二酸化炭素の放出源と考えられる裸地や畑地と異なる炭素循環系を持つため、二酸化炭素の吸収源である可能性がある。また、家畜を放牧している草地から発生するメタンガスの温室効果は二酸化炭素に比べ非常に大きいと言われている。したがって、メタンも含めた草地生態系の炭素循環

を定量的に解明する必要がある。

## 2. 研究の目的

反芻家畜を含めた草地生態系における炭素循環の各経路の流速を測定し、それらのデータに基づき炭素循環シミュレーションモデルを作成し、①草地生態系における炭素収支および温室効果に対する関与の程度、②地球温暖化等の環境変化が草地生態系の炭素収支に及ぼす影響を明らかにする。

また、渦相関法によって放牧草地の二酸化炭素ガスフラックスを直接測定し、草地群落-大気間の二酸化炭素収支のデータを用いて、シミュレーションモデルの適合性を検証する。

## 3. 研究方法

(1) 放牧草地における炭素循環コンパートメントモデルを検討し、炭素循環の主経路を決定した(図1)。

(2) 放牧草地での炭素循環量の定量的解析に必要なデータを得るため、草地試験場藤荷田山放牧試験地において、定期的にサンプリングを実施し、牧草地上部・地下部現存量、リター量、被食量等を測定した。

### (3) 放牧草地の CO<sub>2</sub> ガスフラックスの測定

観測は、草地試験場藤荷田山放牧試験地H3牧区(面積0.5ha)において、比較的平坦な場所を選んで行った。草地植生上約1mの高度に、超音波風速計(スパン長20cm)とCO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O変動計(赤外線吸収式、測定部スパン長20cm)を設置し、風速・温度・二酸化炭素濃度・水蒸気濃度の変動成分等を測定した。乱流データは、A/D変換後、10Hzでサンプリングし、平均化時間10分間として、ガスフラックスを計算した。

## 4. 結果と考察

(1) 放牧草地について構築したエネルギー循環モデル<sup>1)</sup>を基本とし、炭素循環コンパートメントモデルに従って、各コンパートメントの炭素量の変動を日単位で予測するプロトタイプモデルを作成した。

### ①モデルの概要

ア. このモデルで採用した放牧条件は以下の通りである。(7)オーチャードグラス、トールフェスクが優占する造成草地に、黒毛和種去勢牛7頭(平均体重175kg)を放牧する。(イ)4月17日に放牧を開始し、10月30日に終了する。(ウ)4牧区(各牧区0.5haで総面積は2ha)を、各牧区1週間滞牧し、順次転牧する。

イ. エネルギー循環モデルに、土壌有機物およびリターの分解速度、糞の分解速度、根の呼吸速度および牛の呼吸速度を組み込み、大気から草地への二酸化炭素の取り込みを負、草地から大気への放出を正として、二酸化炭素収支を試算した。なお、リター、腐植、糞などの分解には、その水分含量が大きく影響すると考えられるが、このモデルでは、年間を通じて水分含量は一定とし、分解速度は、気温のみの関数とした。

$$\begin{aligned} \cdot \text{牧草の純生産} &= -\text{光合成によるCO}_2\text{の取り込み}[\text{日射量、葉面積の関数}] \\ &\quad + \text{呼吸によるCO}_2\text{放出}[\text{植物現存量、気温の関数}] \end{aligned}$$

- ・立枯れとリターの分解 = 立枯れ量 × 分解速度[気温の関数]
- ・糞の分解 = 糞量 × 分解速度[気温の関数]
- ・腐植の分解 = 土壌表面からのCO<sub>2</sub>放出速度[気温の関数]  
- 牧草地下部量 × 根の呼吸速度[気温の関数]
- ・牛の呼吸 = 呼吸速度[体重、採食速度の関数]

## ②モデルによる炭素収支の予測

シミュレーションの結果を図2に示す。放牧草地の二酸化炭素の収支は、春と秋には大気から草地への二酸化炭素の取り込みが大きく（負の収支）、夏期には大気への放出（正の収支）が大きいという計算結果になった。年間収支では、草地から大気への二酸化炭素の放出が、大気から草地への取り込みを上回り、326 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/year の大気への放出と算出され、二酸化炭素放出量の大半を土壌呼吸が占めると予測された。

## (2) 土壌呼吸速度の解析

既存のデータを用いて土壌呼吸と温度、水分含量の関係について検討した。

### ①調査地

草地試験場藤荷田山放牧試験地の、草地造成方法・施肥条件の異なる次の5牧区で得られた土壌呼吸と地温、水分含量のデータを用いた。CO<sub>2</sub>放出速度は、密閉アルカリ吸収法で測定されたものである<sup>3)</sup>。

- ・L1、H1牧区(耕起造成、少肥区)；H2牧区(耕起造成、多肥区)；H3牧区(不耕起造成、少肥区)；H4牧区(不耕起造成、多肥区)

### ②地表面からのCO<sub>2</sub>放出速度(土壌有機物の分解+牧草地下部の呼吸)

地表面からのCO<sub>2</sub>放出速度(SRM: g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/day)は、主に土壌微生物と牧草根系の呼吸速度によって決まる。特に前者は土壌水分含量の影響を受けると考えられ、土壌の含水比を含めて解析したが、今回の解析では、地表面からのCO<sub>2</sub>放出速度は主に地温に依存し、深さ5cmの日平均地温(T<sub>0</sub>: °C)の指数関数で近似された。すなわち、

$$SRM = SRM_0 \cdot \exp(\alpha \cdot T_0) \quad \dots (1)$$

T<sub>0</sub>=0のときのCO<sub>2</sub>放出速度SRM<sub>0</sub>(g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/day)と温度係数α(1/°C)は、牧区間で大きな差がなかったが、土壌含水比の高い耕起造成区で、やや相関が低かった。また、低温で高含水比のときに近似が悪くなる傾向がみられた。全牧区のデータから、

$$SRM = 3.371 \cdot \exp(0.068 \cdot T_0) \quad (\text{寄与率 } 0.774) \quad \dots (1)'$$

を得た。

H1牧区における地表面からのCO<sub>2</sub>放出速度と地温との関係を図3に示した。

### ②リターからのCO<sub>2</sub>放出速度(A<sub>0</sub>層の分解)

森林のリターの分解に関しては、含水比の平方根に比例するとしたWitkampの近似式<sup>3)</sup>や、最適含水比で最大値を持つ放物線で近似される中根の近似式<sup>4)</sup>がある。牧草リターからのCO<sub>2</sub>放出速度(SRL: g CO<sub>2</sub>/kg/day)も、温度(T: °C)だけでなく、含水比(W: 乾重ベース)の影響を強く受ける。Wを含む次の回帰式で近似した。

$$SRL = 1.264 \cdot \exp(0.065 \cdot T) \cdot W^{1.224} \quad (\text{自由度2重調整済み寄与率 } 0.7831) \quad \dots (2)$$

(2)式によるリターからのCO<sub>2</sub>放出速度と、温度、含水比の関係を図4に示す。

前記の中根の式では、含水比  $W=3$  で最大値を持つが、牧草リターは、含水比  $0 < W < 5.5$  の範囲で、そのような最大値を取らなかった。しかし、含水比  $W > 3$  のデータ数が少なく、高水分リターの分解に関しては、さらに検討する必要がある。

(2)式による推定値は、 $CO_2$  放出速度が小さい領域で測定値との一致が良くなかった (図5)。

(3) 藤荷田山放牧草地における  $CO_2$  ガスフラックスの測定結果を図6に示す。

$CO_2$  フラックスは日射強度、気温、風速などにより変化したが、11月中旬に行った測定では、日中は群落面への  $CO_2$  吸収フラックス (下向き) として約  $0.456 \text{ g/m}^2/\text{hr}$  (最大値 約  $1.24 \text{ g/m}^2/\text{hr}$ )、夜間には群落面からの  $CO_2$  放出フラックス (上向き) として約  $0.211 \text{ g/m}^2/\text{hr}$  (最大値 約  $1.41 \text{ g/m}^2/\text{hr}$ ) が観測された。この日の積算値は、群落面への  $CO_2$  吸収として、約  $0.86 \text{ g CO}_2/\text{m}^2$  であった。他日行った測定を含め、晴天時の放牧草地では、大気-草地群落間の1日の二酸化炭素収支は、草地群落への吸収が大気への放出を上回った。

一方、放牧草地の炭素循環を表すプロトタイプモデルによるシミュレーションでは、前述のように、夏期の大気への二酸化炭素放出が大きく、年間収支では草地から大気への放出が、大気から草地への取り込みを上回っている。今後、様々な条件のもとで、渦相関法による  $CO_2$  ガスフラックスの測定データを蓄積する必要がある。

また、同時期に測定した採草地での測定結果を図7に示す。

採草地A1では、日中、群落面への  $CO_2$  吸収フラックス (下向き) として約  $1.410 \text{ g/m}^2/\text{hr}$ 、採草地B4では、夜間、群落面からの  $CO_2$  放出フラックス (上向き) として約  $0.141 \text{ g/m}^2/\text{hr}$  が測定された。

これら草地における  $CO_2$  フラックスの変動幅は、水稻群落<sup>(5)</sup> (夏期)、大豆群落<sup>(6)</sup> (夏期) におけるものに比べ、やや小さい。

(4) 上記  $CO_2$  フラックス測定値および土壌呼吸速度・リター量の平均データ (表1) から、この日の藤荷田山放牧地における群落正味光合成速度 ( $A_{PN}$ ) を試算した。

(群落正味光合成速度) = (  $CO_2$  吸収フラックス ) + (土壌呼吸速度) =  $0.671 \text{ (} CO_2 \text{ g/m}^2/\text{hr)}$

1974~1982年の藤荷田山放牧草地での刈り取り調査から得られた積み上げ法による11月の平均群落正味光合成速度は、約  $0.178 \text{ CO}_2 \text{ g/m}^2/\text{hr}$  であり、渦相関法により算出した値は、これを上回るが、晴天日のデータであることを考慮すれば、ほぼ妥当な値と言える。

## 5. 今後の問題点

(1) 渦相関法による草地の二酸化炭素ガスフラックスの実測は、気象に左右され、雨天時測定ができないなどの制約がある。また、フラックスデータの補正の問題があり、放牧草地の潜熱・顕熱フラックス等も加味したデータの解析が必要である。

(2) メタンガスについては、未検討である。メタン収支を含めた放牧草地の炭素循環系を解析し、炭素循環シミュレーションモデルを作成するためには、放牧草地でのメタン収支データが必要である。

## 6. 参考文献

- 1) Shiyomi, M., Takahashi, S., Akiyama, T. & Hakamata, T. (1983) A system model for short and long term prediction of grazing pasture productivity. Bull. Natl. Grassl. Res. Inst. 26:17-20.
- 2) 桐田博充(1971)野外における土壌呼吸の測定—密閉吸収法の検討IV. スポンジを利用した密閉吸収法の開発. 日生態会誌 21:119-127.
- 3) Witkamp, M. (1966) Decomposition of leaf litter in relation to environment, microflora and microbial respiration. Ecology 47:194-201.
- 4) Nakane, K., Tsubota, H. & Yamamoto, M. (1984) Cycling of soil carbon in a Japanese red pine forest. I. Before a clear-felling. Bot. Mag. Tokyo 97:39-60.
- (5) 大滝英治(1992)大気境界層における炭酸ガス輸送の測定. 土壌の物理性 65:3-9.
- (6) 原園芳信、山田千絵、岡野通明(1991)ダイズ群落におけるCO<sub>2</sub>ガスフラックス. 1991年度農業気象学会講演要旨

## 7. 研究発表の状況

奥 俊樹、桐田博充、高橋繁男、芝山道郎：放牧草地におけるCO<sub>2</sub>フラックスの観測  
1994年度 農業気象学会（予定）

表1. モデルによる二酸化炭素収支の計算結果

	牧草の 純生産	牧草の 枯死部分解	糞の 分解	土壌腐植 の分解	牛の 呼吸	草地から大気への 二酸化炭素放出
CO <sub>2</sub> の年間収支	-1950	790	186	1150	150	326

(CO<sub>2</sub> g/m<sup>2</sup>/year)

(草地から大気への放出を正とする)

表2. 渦相関法から群落正味光合成速度を得るために必要な諸量 (CO<sub>2</sub> g/m<sup>2</sup>/hr)

(A)	(B)	(C)	(D)	(E)=(C)+(D)
CO <sub>2</sub> 吸収 flux (下向き)	CO <sub>2</sub> 放出 flux (上向き)	地表面からの CO <sub>2</sub> 放出速度	リターからの CO <sub>2</sub> 放出速度	土壌呼吸速度 (上向き)
0.456	0.211	0.208	0.007	0.215

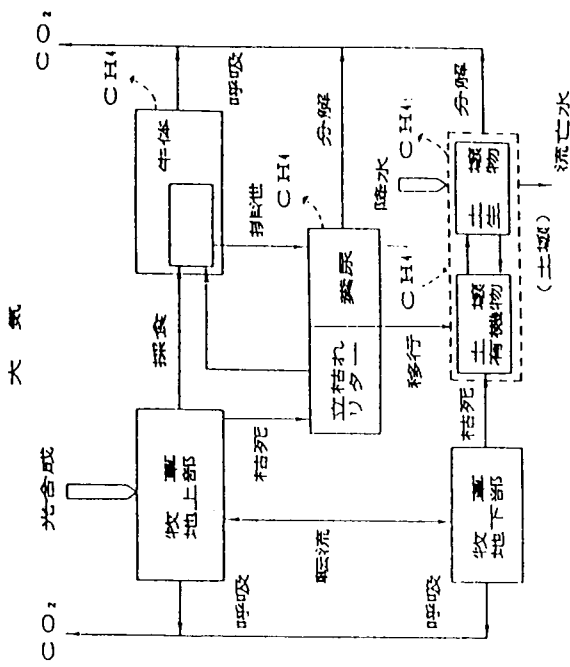


図1 放牧草地における炭素（二酸化炭素およびメタン）の流れ

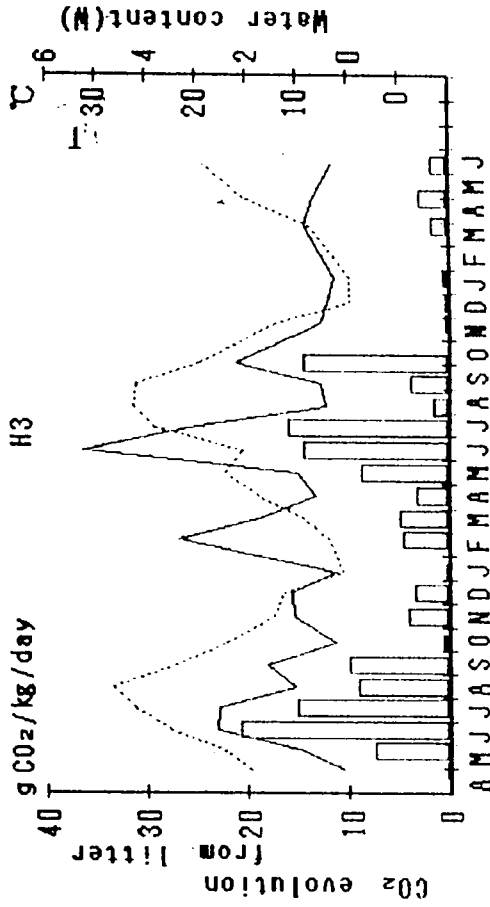


図2 リターからのCO<sub>2</sub>放出速度・温度・含水比の推移 (H3牧区)

— : 含水比 (W、乾重ベース)  
 - - - : 温度 (T)  
 □ : リターからのCO<sub>2</sub>放出速度

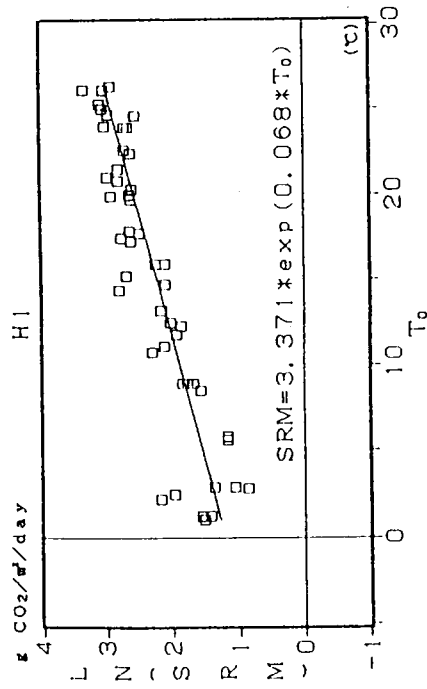


図3 地表面からのCO<sub>2</sub>放出速度と地温の関係 (H1牧区、1983.6-1986.6)

SRM : 地表面からのCO<sub>2</sub>放出速度 (g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/day)  
 T<sub>0</sub> : 地温 (°C)

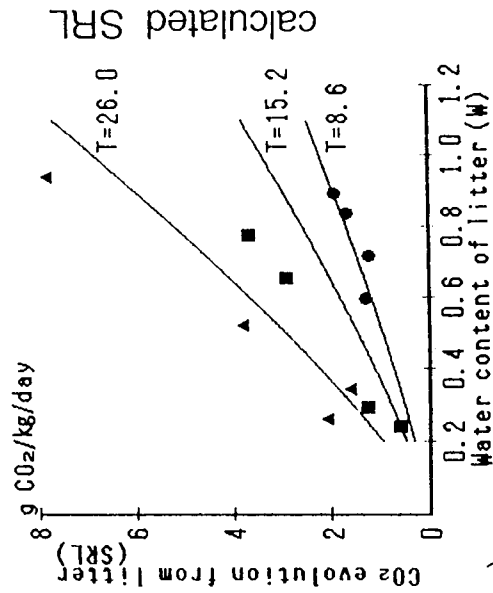


図4 リターからのCO<sub>2</sub>放出速度と含水比、温度の関係  
 $SRL=1.264 \cdot \exp(0.065 \cdot T) \cdot W^{1.24}$  ..... (2)  
 SRL : リターからのCO<sub>2</sub>放出速度 (g CO<sub>2</sub>/kg/day)  
 W : 含水比 (乾重ベース)  
 T : 測定温度 (°C)

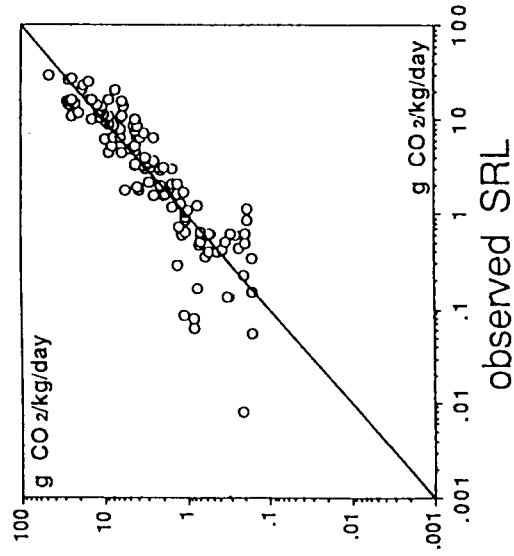


図5 (2)式による推定値と測定値との比較

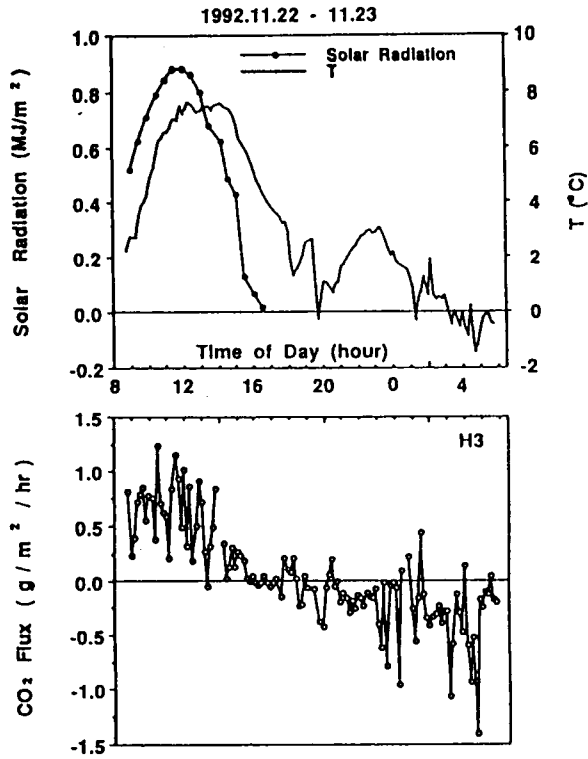


図6 藤荷田山放牧草地 (H3 牧区) での CO<sub>2</sub> フラックスと日射量、気温の時間変化

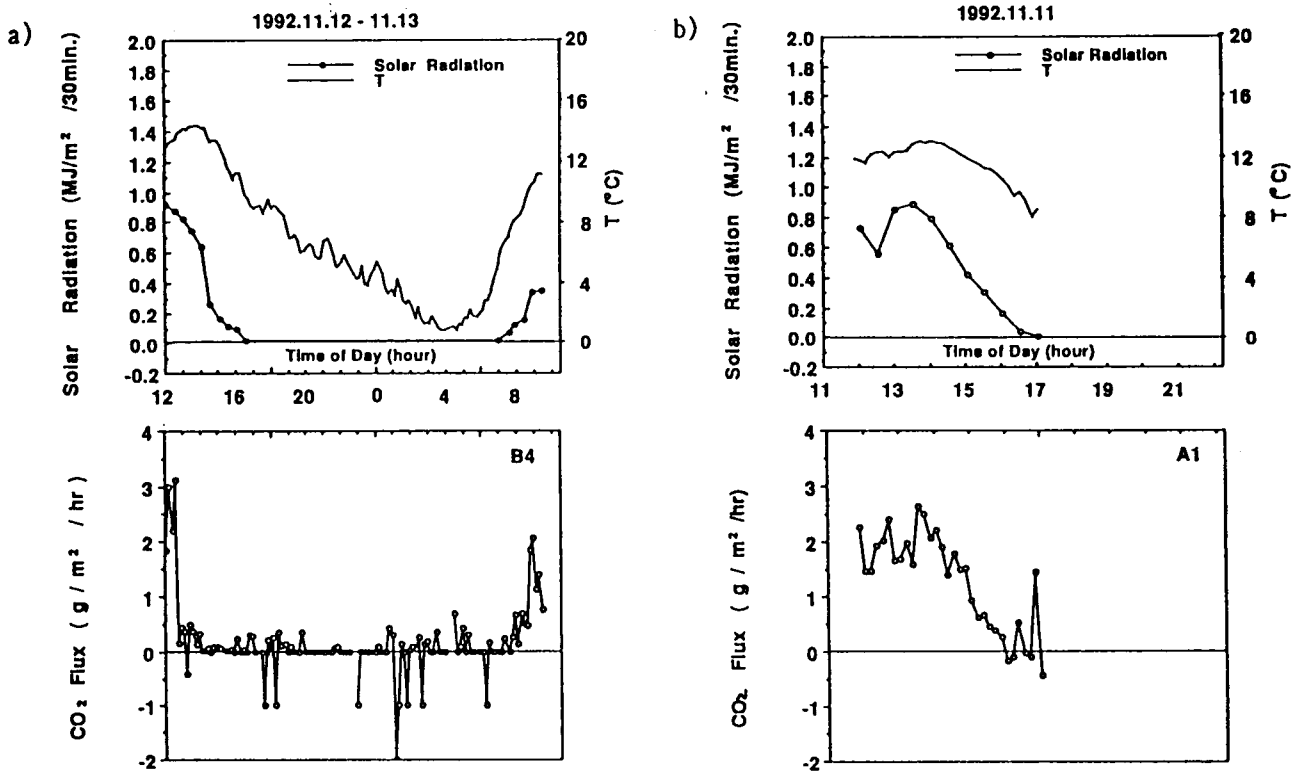


図7 採草地での CO<sub>2</sub> フラックスと日射量、気温の時間変化 a) B4 牧区 b) A1 牧区