

B-1 地球温暖化に係る二酸化炭素・炭素循環に関する研究

(3) 農業生態系における炭素循環・収支の定量的解析

④草地における炭素循環・収支の定量的解析

研究代表者

草地試験場

高橋繁男

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、芝山道郎

平成5-7年度合計予算額 8,767千円

(平成7年度予算額 3,591千円)

〔要旨〕放牧草地における炭素循環機構を解明するため、炭素循環の主経路のうち、牧草根の生産量と分解消失率を測定した。牧草根の生産量は、4-6月に最大となった。分解消失率は地温をパラメータとする回帰式で近似された。

また、渦相関法により放牧草地のCO₂ガスフラックスを継続的に実測した。放牧草地のCO₂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CO₂吸収フラックスが、夜間には群落面からのCO₂放出フラックスが観測された。

1日当たりの大気-放牧草地間のCO₂収支は、冷夏であった1993年には、年間を通じて草地群落への吸収が大気への放出を上回った。1994年のCO₂収支は、猛暑であった夏期には、逆に草地から大気への放出が取り込みを上回る例がみられたが、年間を通じては大気から草地への取り込みを示す日が多く、草地がCO₂の吸収源になっている可能性があることが示唆された。

〔キーワード〕放牧草地、炭素収支、牧草根、CO₂ガスフラックス、渦相関法

1. 序

大気中のCO₂、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、極地を除く全陸域の41%を占めると言われる¹⁾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CO₂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、CO₂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、南米の深根性人工草地での例²⁾のように、CO₂の吸収源となる可能性があり、その解明が待たれる。

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 CO₂ ガスフラックスを直接測定し、草地群落-大気間の CO₂ 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

放牧草地での炭素循環量の定量的解析に必要な各経路の流速の測定を継続すると共に、放牧草地における CO₂ ガスフラックスの実測を、渦相関法により継続的に行った。

試験地の概要：

観測は、栃木県那須郡の草地試験場内の藤荷田山生態観測試験地内の放牧地で行った。藤荷田山は、標高約340mの丘陵で、その北斜面には、クリ・クヌギ・コナラ優占の森林が残され、南斜面には、アズマネザサ・ススキ優占の伐採跡地および、人工造成草地が作られている。この放牧試験地では、毎年4月-10月の間、黒毛和種および交雑種（黒毛和種×ホルスタイン種）の輪換放牧を行っている。

(1) 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、上記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。また、ガスフラックス測定時に、密閉アルカリ吸収法³⁾により、土壤呼吸速度を測定した。

(2) 放牧草地の CO₂ ガスフラックスの測定

観測は、上記放牧試験地のH3牧区（1973年不耕起造成、トールフェスク、オーチャードグラス、レッドトップ、ペレニアルライグラス、ケンタッキーブルーグラス、シロクローバー混播草地、面積0.5ha、平均傾斜度6°）において、比較的平坦な場所を選んで行った。測器は、草地植生の直上に、超音波風速計（スパン長10cm）とCO₂-H₂O変動計（赤外線吸収式、測定部スパン長20cm）を設置し、風向・風速・温度・CO₂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、CO₂ガスフラックスおよびH₂Oガスフラックス等を計算した。

4. 結果と考察

(1) 牧草根の生産量と消失率の測定（図1，図2）

草地における炭素循環を最も大きく左右するものは、草地土壤中の炭素の動態である。放牧草地の地下部現存量の季節的推移については、5月に最大、9-10月に最小となり、冬に向かい再び増加するとされている⁴⁾。今回、草地土壤への重要な炭素供給源としての根の役割に注目し、その生産量と分解による消失率を測定した。

牧草根の生産量：トールフェスク株の中心と株の周辺で、1ヶ月毎に牧草根の生産量を測定した。4-6月には、約2gDW/m²/日となり、その後低下し、9-10月には、0.6gDW/m²/日となった

(図1)。

牧草根の消失率：牧草根を土中に埋め、1ヶ月毎に掘り出し、その消失率を求めた。牧草根の消失係数は、地温との間に有意な相関が認められ、次の回帰式で示すことができた(図2)。

$$\text{消失率} = 0.00267 - 0.0005 * X \text{ (地温: } ^\circ\text{C)}$$

(2) 渦相関法による放牧草地のCO₂ガスフラックスの測定

図3aおよび図3bは、渦相関法で測定された放牧草地におけるCO₂ガスフラックス(CO₂flux)と、気温(T)、日射量(Q)、潜熱フラックス(LH)、顕熱フラックス(SH)の時間変化の例を示している。CO₂ガスフラックスのうち、破線(c-fCO₂)は、大気密度変動にともなう補正を、Webbらの式⁶⁾により行ったものである。各フラックスは、日射量を除き、いずれも上向きを正としている。

① 1993年の観測例(図3a)

1993年は、記録的な日射量不足と低温の年であった。

CO₂フラックスは、日射強度、気温、風速などにより変化したが、両測定日とも、典型的な日変動を示した。

3月16-17日は、日中は、CO₂フラックスは負となり、CO₂が下向きに輸送されて、草地群落に固定されていることを示している。午前中に、最高約0.6 mg/m²/sの吸収フラックスを示した。日没後、CO₂フラックスは、正に転じ、草地植生から大気への放出の方に傾いたが、日中に比べ、あまり大きな変動は示さなかった。この日は、日中平均約0.21 mg/m²/sの吸収フラックスを、夜間平均約0.06 mg/m²/sの放出フラックスが観測された。

6月1日~2日にかけては、CO₂フラックスは、あまり大きな日変動を示さなかったが、その傾向は3月同様で、夜間、CO₂フラックスは正で、比較的安定しており、草地群落の呼吸と土壌呼吸により、CO₂が上向きに輸送されていることを示している。日出後、CO₂フラックスは負に転じ、CO₂が下向きに輸送されて、草地群落に固定されていることを示している。この日は、日中平均約0.03 mg/m²/sの吸収フラックスを、夜間平均約0.04 mg/m²/sの放出フラックスが観測された。

3月16-17日は晴天日、6月1-2日は曇天日だったため、各フラックスは、3月16-17日の方が、より大きな日変動を示した。

② 1994年の観測例(図3b)

1994年は、前年とは対照的に、記録的な猛暑の年であった。

6月15-17日は晴天が続き、各フラックスとも典型的な日変動を示した。夜間、CO₂フラックスは正で、草地群落の呼吸と土壌呼吸によりCO₂が上向きに輸送されているものの、比較的小さな値で安定している。日出後、CO₂フラックスは負に転じ、CO₂が下向きに輸送されて、草地群落に固定、吸収されていることを示している。午前中に、最高約0.6 mg/m²/sの吸収フラックスを示した。この日は、日中平均約0.16 mg/m²/sの吸収フラックスを、夜間平均約0.14 mg/m²/sの放出フラックスが観測された。

7月14-15日も晴天日であるが、前年には見られなかったパターンを示した。日中、CO₂フラックスはわずかに負となるが、下向きの大きな輸送は示さなかった。日中の潜熱フラックスも晴天日にしてはやや低くなっていることから、高温のため群落の光合成が活発に行われなかったもの

と思われる。逆に夜間の上向きの輸送が大きく、土壌呼吸の増大を示している。この日は、日中平均約 0.05 mg/m²/s の吸収フラックスを、夜間平均約 0.06 mg/m²/s の放出フラックスが観測された。

これら観測時の CO₂ フラックスの変動幅は、晴天日の典型的な日変動を示した 1993 年の 3 月および 1994 年 6 月の観測例では、林ら⁶⁾が、ニュージーランドの草地で渦相関法により観測した時のものと、ほぼ同様であったが、曇天時の観測である 1993 年 6 月の例では、より小さく、高温時の観測となった 1994 年 7 月の例では、より大きくなった。

図 4 に、1993、1994 年に測定された CO₂ ガスフラックスの解析結果を示す。各測定日とも、日中は群落面への CO₂ 吸収フラックス（下向き）が、夜間には群落面からの CO₂ 放出フラックス（上向き）が観測された。

1993 年には、CO₂ ガスフラックスの変動幅は、8 月に最大で、約 0.38 mg/m²/s であった。4 月から 7 月にかけては、吸収フラックス、放出フラックスともに、小さくなっているが、これは、日射量不足と低温のため、草地群落の活性が低かったためと思われる（図 4 a）。

1994 年は、日中の群落への吸収フラックスは、4 月下旬から 6 月にかけて大きく、猛暑だった夏には小さくなっており、日射量不足と低温だった前年とは対照的である。夜間の放出フラックスは気温との相関が高く、CO₂ 放出に占める土壌呼吸の割合の大きいことを示している。

（3）大気－放牧草地間の CO₂ 収支

図 5 は、ガスフラックス測定時に、同時測定した土壌呼吸速度の季節変化を示している。土壌呼吸速度は、地温の上昇する夏期に、もっとも高い値を示している。

図 6 は、試験放牧草地での群落正味光合成速度（aPn）の推移を示している。群落正味光合成速度は、渦相関法から得られた CO₂ ガスフラックス（|F|）と土壌呼吸速度（SR）および牧草地下部の呼吸速度（Rr）から、次式により求められる。ここで、牧草地下部呼吸速度は、地温の指数関数で⁷⁾、土壌呼吸速度のうち、リターからの CO₂ 放出速度は、温度と含水比をパラメータとする回帰式⁸⁾で近似した。

$$a P n [\text{day}] = | F | [\text{day}] + S R [\text{day}] - R r [\text{day}]$$

群落正味光合成速度は、4 月下旬～6 月中旬と、8 月中旬～下旬に高く、ふたつのピークを示した。

同試験放牧草地での、積み上げ法により算出された群落正味光合成速度は、寒地型牧草のスプリングフラッシュを反映して、初夏に大きなピークを示すが、渦相関法と土壌呼吸速度測定から算出した群落正味光合成速度は、むしろ後半のピークに高い値を示した。図 4 b で、日中の群落への CO₂ 吸収フラックスが、4 月下旬から 6 月にかけて大きな値となり、草地植生への活発な CO₂ の固定、吸収を示しているにもかかわらず、8 月中～下旬の群落正味光合成速度が初夏を上回る算出結果となったのは、この時期の土壌呼吸量が大きく、牧草地下部現存量が、春に比べて小さいためである。特に、土壌呼吸量は、測定時、測定場所によるばらつきが大きく、その評価には慎重を要すると思われる。

図7は、渦相関法による測定から得られた、一日当たりの大気-放牧草地間のCO₂収支(草地から大気への放出が正)を示している。

1993年は、1例(6/2)を除き、±0から、最大約7.10 g/m²/day(11/17)の、草地への取り込みがみられ、草地がCO₂の吸収源になっている可能性があることが示唆された。特に、秋期に草地へのCO₂の取り込みが大きかった。

1994年も、夏期を除けば、草地植生への取り込みが、大気への放出を上回った日が多く、最大約9.91 g/m²/day(4/30)の、草地への取り込みがみられた。夏期には、快晴時より、むしろ曇天時にCO₂収支が±0からわずかに草地への取り込みへ傾く傾向があった。異常高温時に、収支が逆になるのは、植生の蒸散が抑制され、草地によるCO₂の同化能が低下する一方、地温の上昇に伴い、土壌呼吸のうち、土壌有機物とリターの分解速度が高くなるためと思われる。しかし、スプリングフラッシュ時の草地へのCO₂の取り込みは高い値を示し、年間を通じては、やはり、草地がCO₂の吸収源になっている可能性があることを示している。

5. 今後の問題点

(1) 渦相関法による草地のCO₂ガスフラックスの測定は、降雨時のデータが取得できないという制約がある。年間を通じての大気-草地間のCO₂収支を実測するためには、渦相関法による詳細な観測と並行して、傾度法などの従来法による通年観測が必要である。

(2) シミュレーションモデルについては、プロトタイプ的なものを提示するに留まった。また、メタンガスについては、未検討のままである。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. 引用文献

- 1) Thornthwaite, C. W. (1948): An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, **38**:55-94.
- 2) Fisher, M. J., Rao, I. M., Ayarza, M. A., Lascano, C. E., Sanz, J. I., Thomas, R. J. and Vera, R. R. (1994): Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature*, **371**:236-238.
- 3) 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.
- 4) 高橋繁男・大久保忠旦・秋山 侃(1980): 放牧草地の地下部現存量の季節的推移. *草地試研報* **16**:24-30.
- 5) Webb, E. K., Pearman, G. I. and Leuning, R. (1985): Correlation of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **106**:85-100.
- 6) 林 陽生・Green, S.・Prendergast, P.・Green, A.・McAneney, J. (1993): 草地上の二酸化炭素および水蒸気フラックスの観測. 農業気象学会1993年度大会講要: 270-271.
- 7) 桐田博充・斎藤吉満・西村格(1979): 生産環境の成立機構の解明. 3. 草地生態系におけるエネルギーと物質の流れ. (1)放牧草地の植生・土壌系における土壌有機物の供給・分解と蓄積.

グリーンエネルギー計画成果シリーズ、Ⅲ系（生産環境）112-122. 農林水産技術会議事務局.

8) 桐田博充・奥 俊樹・高橋繁男・築城幹典(1994): 地球の温暖化(現象解明). B-6.(1)②草地における炭素循環系の定量的解析に関する研究. 地球環境研究総合推進費平成4年度終了研究成果報告集. 108-114.

[研究発表の状況]

学会発表:

奥 俊樹、桐田博充、高橋繁男、芝山道郎(1994): 放牧草地における CO₂ フラックスの観測.

1994年度日本農業気象学会講演要旨: 338-339.

高橋繁男・奥 俊樹(1994): 放牧草地における牧草根の生産量と分解消失率の測定. 日草誌, 40(別): 35-36.

奥 俊樹、桐田博充、高橋繁男、芝山道郎(1994): 放牧草地における二酸化炭素収支 - 渦相関法による CO₂ フラックスの観測. 日草誌, 40(別): 343-344.

奥 俊樹、高橋繁男、芝山道郎(1996): 放牧草地における CO₂ フラックスの観測 - 1994年、猛暑の年の放牧草地の二酸化炭素収支 -. 日草誌42(別), 395-399.

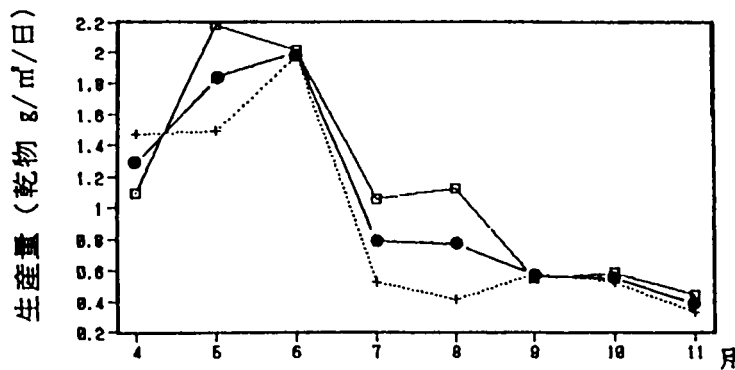


図 1 根の生産量の季節変化

□ 株の中心、+ 株周辺、● 平均

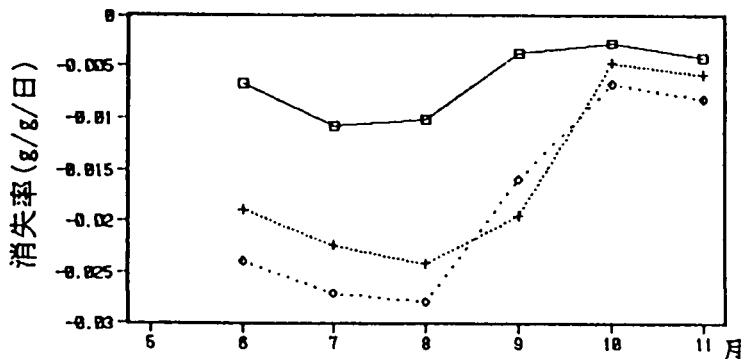


図 2 短期設置による牧草根の消失率

□ 地中に埋めた牧草根
+ 地中に埋めた地上枯死体
◇ 地表に置いた地上枯死体

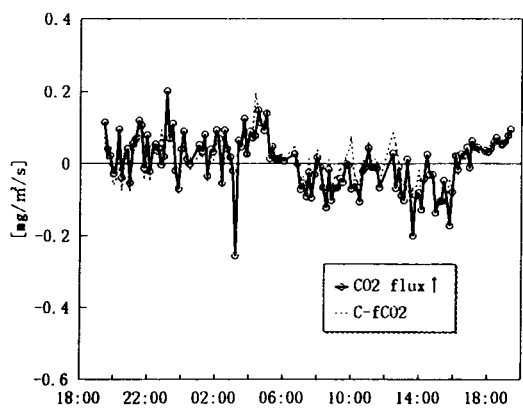
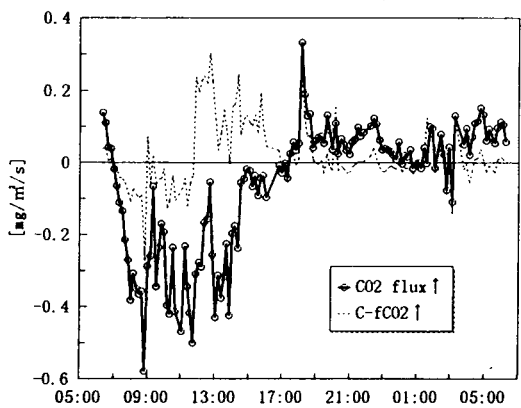
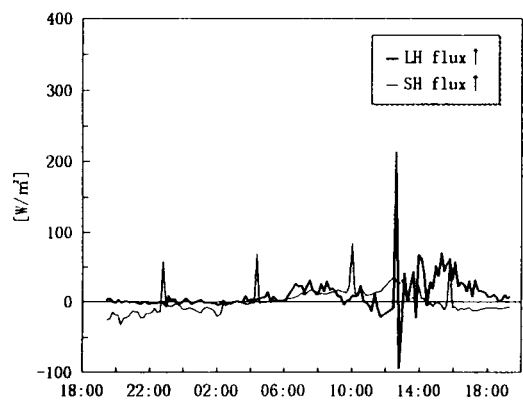
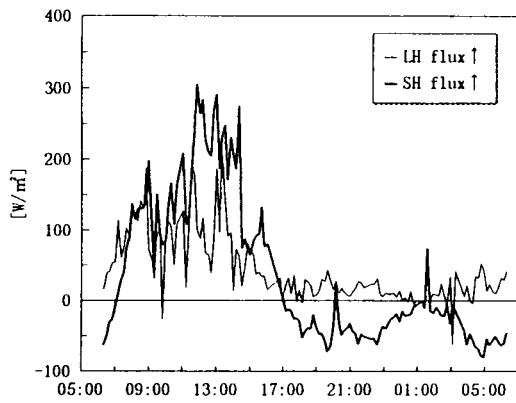
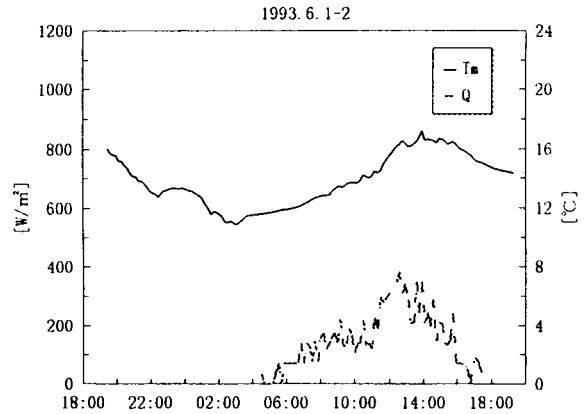
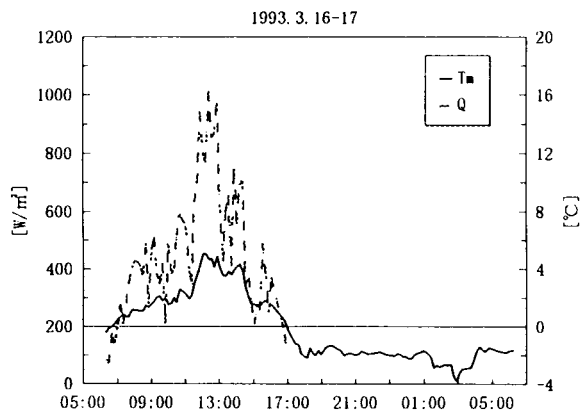


図3a 草地でのCO₂ガス、顕熱(LH)、潜熱(SH)フラックスと気温(T_m)、日射量(Q)の時間変化 (1993年 3, 6月測定時)

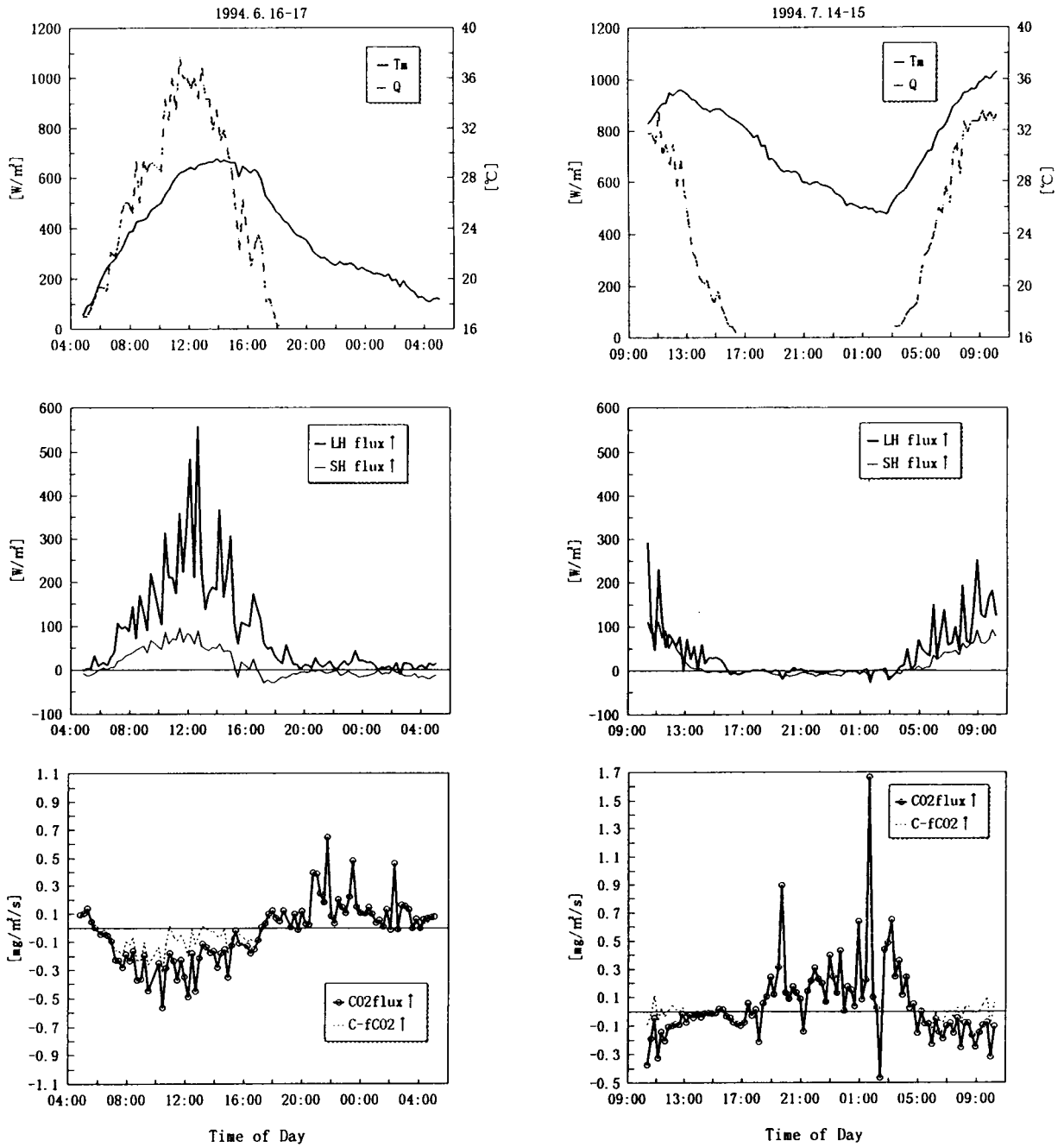


図3b 草地での CO_2 ガス、顕熱(LH)、潜熱(SH)フラックスと気温(T_m)、日射量(Q)の時間変化(1994年6、7月測定時)

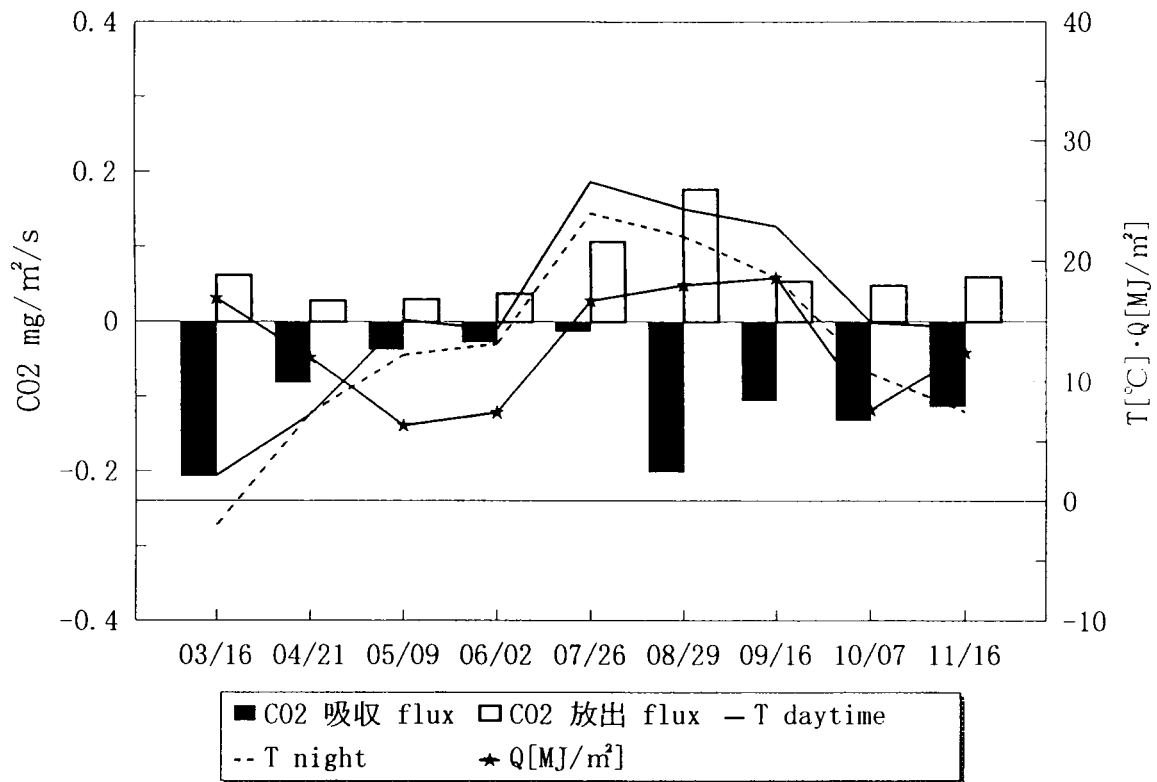


図4a CO₂ 吸収・放出フラックスと気温・積算日射量の推移 (1993年)

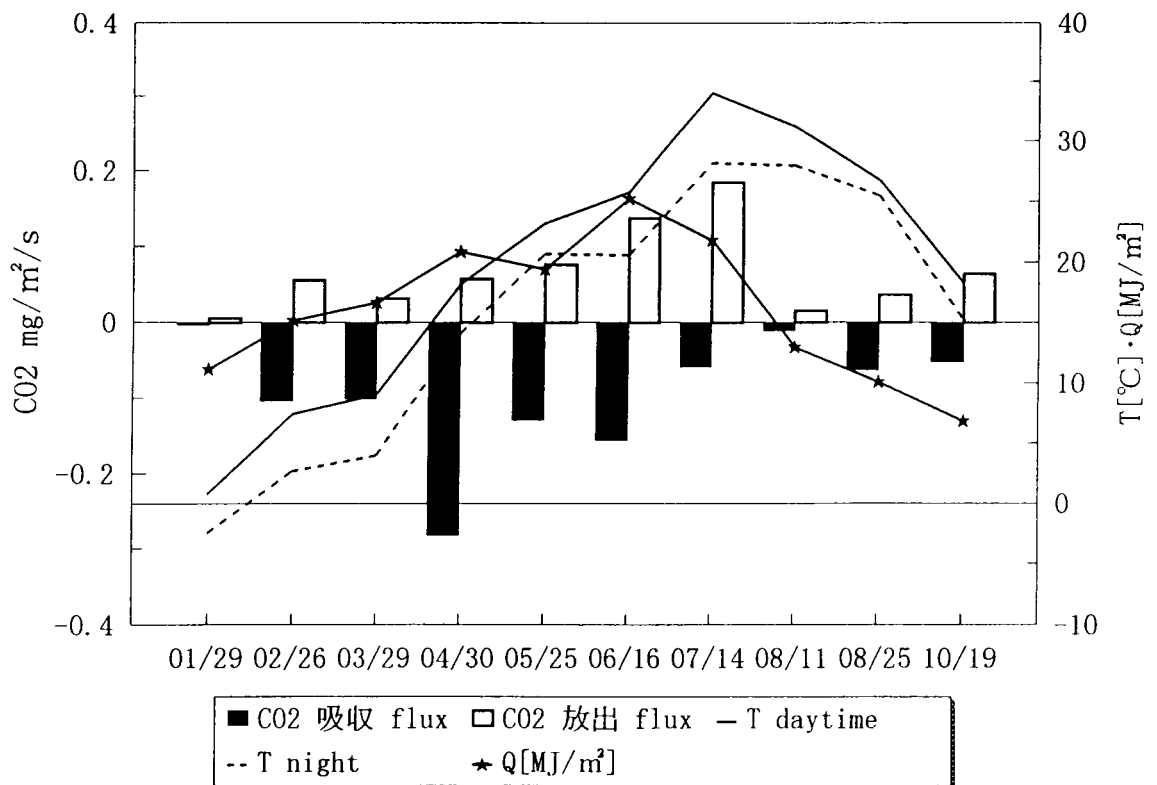


図4b CO₂ 吸収・放出フラックスと気温・積算日射量の推移 (1994年)

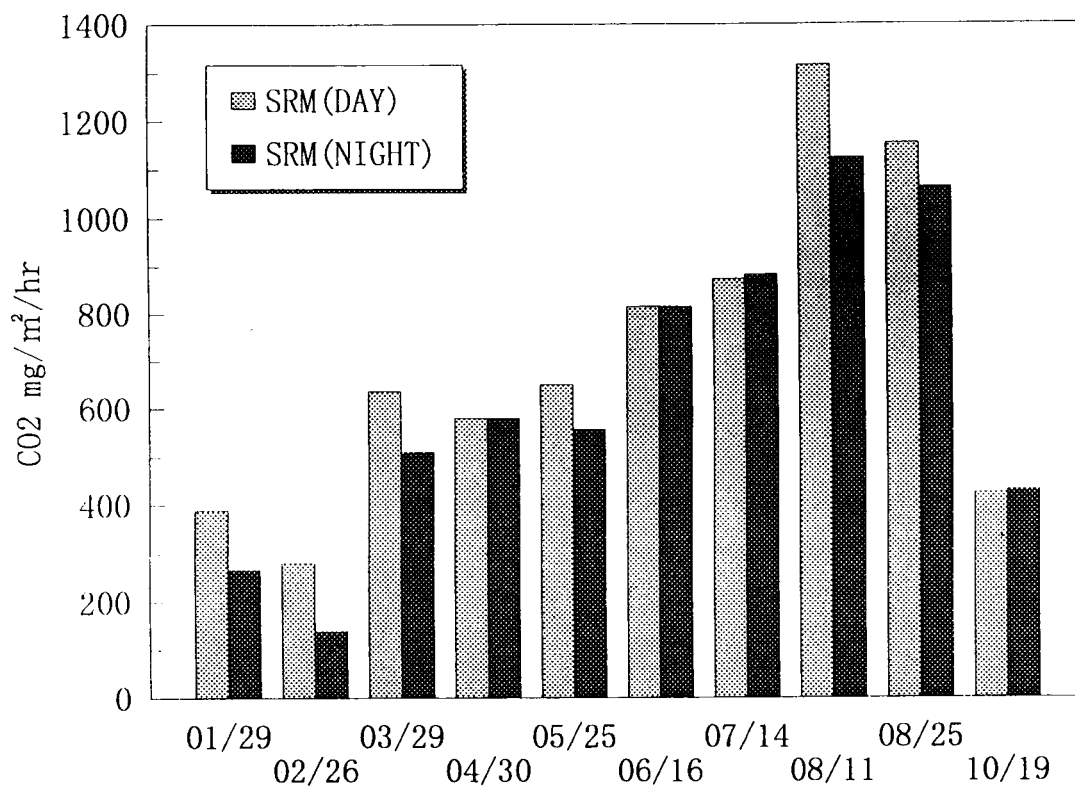


図5 放牧草地の土壌呼吸速度(SRM)の推移(1994年)

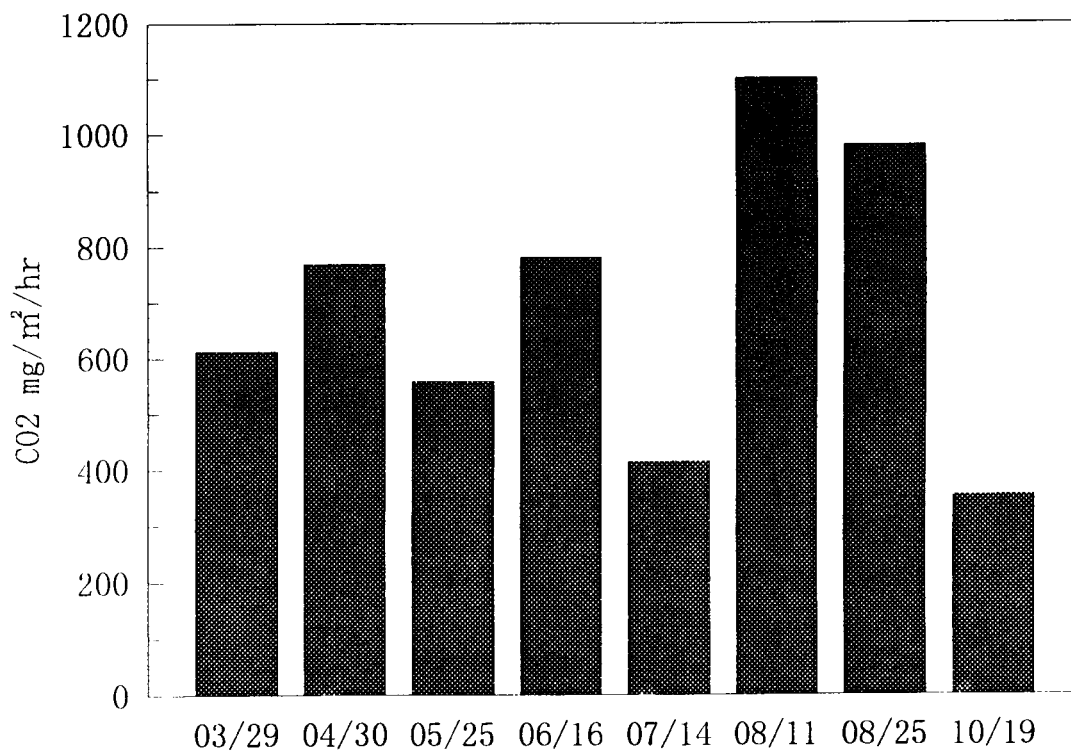


図6 渦相関法により算出した群落純光合成速度の推移(1994年)

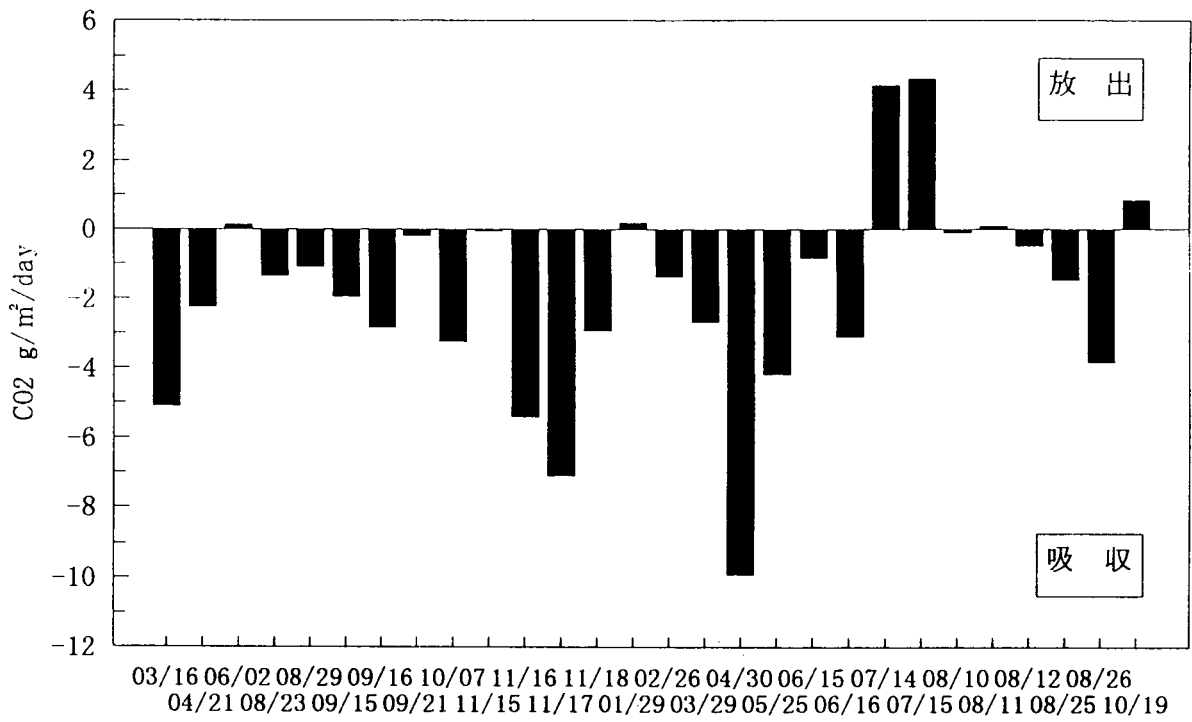


図7 放牧草地のCO₂収支 (1993-1994)