

中国青海省高山草原における CO₂ フラックスと環境要因

CO₂ Flux and Environmental Factors in an Alpine Grassland in Qinghai, China

加藤知道*・古 松**・杜 明遠***・李 英年****・趙 新全****・唐 艷鴻**・及川武久*****

Tomomichi KATO*, Song GU**, Mingyuan DU***, Yingnian LI****,
Xingquan ZHAO****, Yanhong TANG** and Takehisa OIKAWA*****

I はじめに

人間活動の結果、地球大気の CO₂ 濃度は上昇し続けており、陸上生態系の炭素動態に大きな影響を及ぼしているものと思われ、その動態の解明は急務の問題である。その中でも、東アジアの陸地面積の約三分の一を占める草原生態系は、アジア陸域、ひいては地球レベルの炭素収支において重要な鍵となっている。特に、青海ーチベット高原の高山草原生態系は、土壌の炭素蓄積密度が高く、炭素のシンクである可能性が高い。しかし、これまで東アジアの高山草原生態系の炭素動態に関する研究は乏しく、CO₂ フラックスについての観測が行われた例もほとんどない。

そこで、本研究では青海ーチベット高原の北東部に位置する中国青海省海北地区の高山草原(Fig. 1)で、CO₂ フラックスと環境要因を測定し、草原植生ー大気間における炭素動態のモニタリングを試みた。そして、本報では、現在(2002 年 5 月)も継続中

である観測データの中から、2001 年 8 月 9 日~10 月 8 日の 2 カ月間の CO₂ フラックスと環境要因(特に、光・温度)との関係を解析した結果を報告する。

本研究の対象地域は、祁連山山脈の支稜である大坂山と冷龍嶺が南北に聳え立つ平均海拔 3200 m の高地にあるため、年平均気温は-2℃前後と低く、年降水量も 500~600 mm と決して多くはない。しかし、日射量は高く、植物の生長期間である 5 月~9 月の間の気温も高く、年降水量の約 80%がこの時期に降るため、生物に有害な B 領域紫外線(UV-B)量が多いことを除けば、この地域は植物の成長に適した環境にある(Fig. 2)。

また、調査地は低矮性のカヤツリグサ科の C3 草本である矮嵩草(*Kobresia humilis*)、高山嵩草(*K. pygmaea*)、藏嵩草(*K. tibetica*)などや、金露梅(*Potentilla fruticosa*)という低木が優占している。これらの植物は、気温が上昇し始める 5 月より成長を開始し、気温と降水量の高い 7・8 月に最大現存量を示し、10 月中に地上部がすべて枯死する(Fig. 2)。また、この草原の多年生植物は翌年の春の成長

* 筑波大学生物科学研究科

** (独) 国立環境研究所

*** (独) 農業環境技術研究所

**** 中国科学院西北高原生物研究所

***** 筑波大学生物科学系

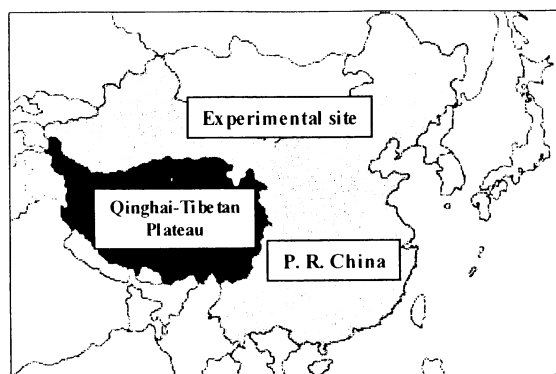


Fig. 1. Location map of the experimental site.

開始期に備えて、成長期の間に地下部に糖分を蓄えるため、貯蔵器官としての根がよく発達しており、そのことは高山草原生態系の特徴でもある(李・周, 1998).

II 方法

CO₂フラックスと環境要因の観測は、中国科学院西北高原生物研究所の海北高寒草甸生態系統定位站(37°29'N・37°45'N, 101°12'E・101°23'E, 3250 m a.s.l.; Fig. 1)において、2001年8月9日から開始し、現在(2002年5月)も継続中である。観測項目はTable 1に示している。観測地は、フラックス観測に必要とされる十分に広く、水平様なフェッチが確保されている。CO₂フラックスは、超音波風速計(CSAT (CSI: Campbell Scientific Inc., UT, USA))と赤外線 CO₂/H₂O ガス分析計(CS-7500 (CSI))を用いて、渦相関法で観測した。AC電源は、中国科学院のステーションより供給され、すべての観測データは、デジタルマイクロロガー(CR23X: CSI)とアナログマルチプレクサー (AM416: CSI)を用いて15分間隔で記録した。

また、観測地点周辺の植生バイオマスとLAI(葉面積指数)を、2001年8月20日に測定した。その結果、植生バイオマスは乾重で地上部が347.8 g m⁻²に対して、地下部が1892.8 g m⁻²と非常に大きく、高山帯における多年生草本群落の特徴をよく表していた。そして、LAIは3.08であった。

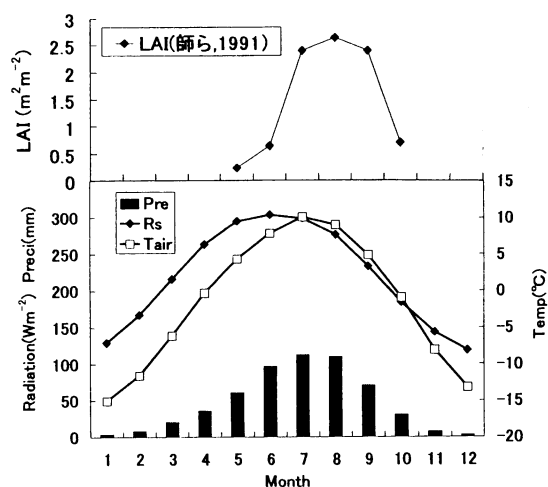


Fig. 2. 20 years-averaged (1981-2000) interannual changes of precipitation (Pre), radiation (Rs), air temperature (Tair) and LAI at the Haibei Research Station, CAS.

III CO₂フラックスの計算と欠測データの補完

CO₂濃度と鉛直風速のデータは、CR23Xに10Hzの間隔で測定した後、その共分散を15分ごとに計算し、結果を内部メモリーに記録した。そして、データ回収後、WPL補正(Webb *et al.*, 1980)を施し、その値をCO₂フラックスとした。

日単位のCO₂フラックス収支の計算に際して、CO₂濃度や鉛直風速は、降雨や早朝の結露等によって正確な値が測定できずCO₂フラックスFCO₂が極端な値を示すことが多かったため、以下のような手順で異常値を除去し、そのデータを補完した。

手順1. FCO₂の日変化をよく観察した上で、正常範囲を-1.5~1.0 mgCO₂m⁻²s⁻¹であると恣意的に設定し、それ以外のデータを非現実的な異常値として除去する。

手順2. 欠測データの補完

- 1点の不連続的な欠測 → 前後データの平均を内挿
- 2点以上の連続的な欠測 → 次のb-1, b-2で示す(1)・(2)式よりR(生態系呼吸量)とGPP(一次

Table 1. Instruments and installation height.

Meteorological elements	Instruments	Height (m)
Wind velocity and air temperature	Sonic anemometer (CSAT/CSI)	2.2
CO ₂ , H ₂ O concentration	CO ₂ /H ₂ O infrared gas analyzer (CS-7500/CSI)	2.2
Short wave and long wave radiations from the sky and the ground	Radiometer (CNR-1/Kipp & Zonen)	1.5
Air temperatures and humidity	Termo-hygrometer (HMP45C/Vaisala)	2.2, 1.1
Wind speed	Cup anemometer (034A-L and 014A /R. M. Young)	2.2, 1.1
Soil moisture	TDR sensor (CS615/CSI)	-0.05, -0.2, -0.5
Soil temperature	Thermocouple	-0.025, -0.05, -0.1, -0.2, -0.3, -0.4, -0.5, -0.6, -0.7
Soil surface temperature	Thermistor probe (107/CSI)	0 (3 points)
Soil heat flux	Heat plate (HFT-3/CSI)	-0.02 (3 points)
Precipitation	Tipping bucket rain gage (TE525MM/CSI)	0.5
PPFD	Quantum sensor (LI-190SB/Li-Cor)	1.5
UV-A	Ultra violet radiometer (PD204A/Macam)	1.5
UV-B	Ultra violet radiometer (PD204B/Macam)	1.5

の総生産量)を推定し, その残差(NEE)を FCO_2 として外挿

IV 結果と考察

1 CO₂ フラックスの日変化

解析にあたって, 8月9日～10月8日までの2ヶ月間の観測期間を約15日間ごとの4期間に分けた。すなわち,

第Ⅰ期: 8月9日～8月23日.

第Ⅱ期: 8月24日～9月8日.

第Ⅲ期: 9月9日～9月23日.

第Ⅳ期: 9月24日～10月8日.

Fig. 3は, それぞれの期間について平均したCO₂フラックス FCO_2 の日変化を表している。まず, 第Ⅰ期では, FCO_2 は未明から早朝にかけて0.15～0.05 mgCO₂ m⁻²s⁻¹のCO₂放出の値をとり, 8時ごろ(北京標準時間)の日の出とともに一気に吸収に転じ, 値は負の方向に急激に増大した。そして, 12時～13時にかけて-0.7 mgCO₂ m⁻²s⁻¹前後の最大値をとり, その後減少し20時ごろに再び負に転じ0.15～0.05 mgCO₂ m⁻²s⁻¹の放出となった。このような日変化パターンは, 日照時間の違いによる多少の時間的なずれはあったが, すべての期間について共通であり, 特に第Ⅱ期については FCO_2 値もほぼ同等であった。そして, 第Ⅲ期の日中のCO₂吸収速度は, それ以前と比べて若干減少した程度であったが, 9月下旬以降の第Ⅳ期では大幅に減少した。Fig. 4は, Fig. 3に示した FCO_2 値をPAR(光合成有効放射量)に対してプロットしたものである。第Ⅰ期～第Ⅲ期では, FCO_2 値はPARに対して直角双曲線的に増大

b-1) R の推定: 15日間ごとに, 夜間の FCO_2 と地温(-5cm)との関係について, 指数関数的な回帰曲線である次式を作成する。但し, u^* が0.2 ms⁻¹以上のデータのみを使用し, 弱風時の大きくばらついたフラックスを排除した。

$$R = a \exp(bT_{soil}) = FCO_2 \quad (1)$$

ここで, R は生態系呼吸量(mgCO₂m⁻²s⁻¹), T_{soil} は地温(°C), a, b は各期間の固有値である。

b-2) GPP の推定: 15日間ごとに, 日中の GPP を計算し, PARとの関係について直角双曲線的な回帰曲線である次式を作成する。

$$GPP = R - NEE = \frac{\phi P_{max} PAR}{P_{max} + \phi PAR} \quad (2)$$

ここで, GPP は一次の総生産量(mgCO₂m⁻²s⁻¹), NEE は生態系CO₂ガス交換量(= FCO_2), ϕ は直角双曲線式の初期勾配(mgCO₂ μmolphoton⁻¹), P_{max} は最大 GPP (mgCO₂m⁻²s⁻¹), PAR は光合成有効光量子束密度(μmolphotonm⁻²s⁻¹)である。

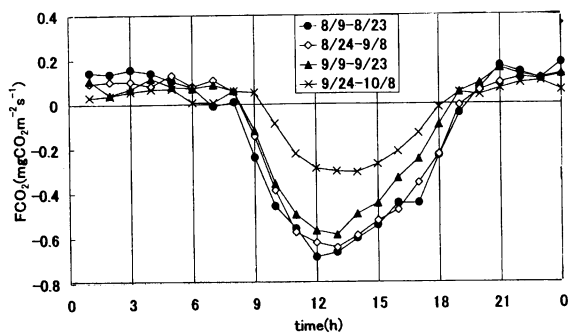


Fig. 3. Daily changes of CO_2 fluxes (FCO_2) averaged for four periods.

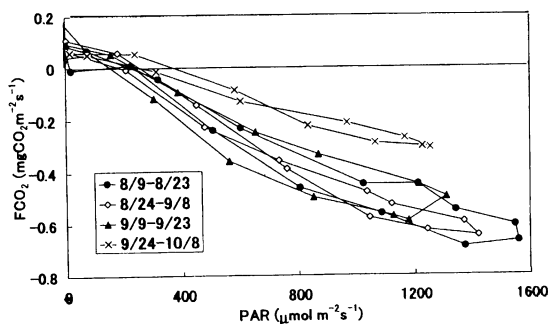


Fig. 4. Relationship between photosynthetically active radiation (PAR) and CO_2 fluxes (FCO_2) averaged for four periods.

し、どの期間もほぼ同程度の値をとった。一方、最後の第Ⅳ期では、PAR 増加に対する FCO_2 値は減少し、その関係も直線的になった。また、第Ⅰ期～第Ⅲ期では、午前中に比べて午後の FCO_2 値は同一の PAR で比較すると減少した。そこで、その原因を明らかにするために、第Ⅰ期における FCO_2 と日射、飽差、潜熱輸送量の日変化について調べ、Fig. 5 に示した。その結果、16 時ごろの極大に向かって増大している大気飽差に対して、潜熱輸送量は 12 時ごろより継続して高い値を保っており、気孔コンダクタンスが減少していることが示唆された。すなわち、午後の FCO_2 の低下は気孔開度の減少が原因であると考えられる。過去の研究で、一部の植物種において午後に気孔コンダクタンスが低下する 16 時ごろ

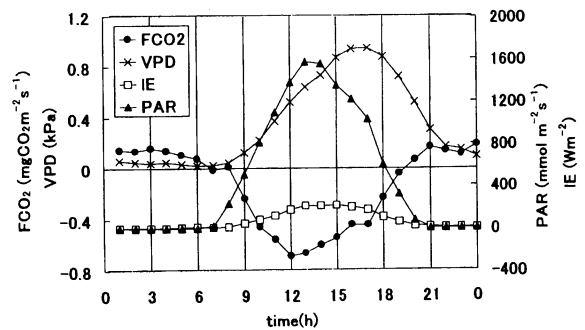


Fig. 5. Daily changes of CO_2 fluxes (FCO_2), PAR, vapor pressure deficit (VPD), latent heat flux (IE) averaged for 8/9-8/23.

の極大に向かって増大している大気飽差に対して、潜熱輸送量は 12 時ごろより継続して高い値を保っており、気孔コンダクタンスが減少していることが示唆された。すなわち、午後の FCO_2 の低下は気孔開度の減少が原因であると考えられる。同地域を対象とした過去の研究で、一部の植物種において午後に気孔コンダクタンスが低下することが報告されており(李・周, 1998), これを裏付けるものと言える。

以上より、海北地区の草原生態系における CO_2 フラックスの日変化は、光強度の変化に強く依存していることが明らかになった。また、その吸収速度は 8 月上旬～9 月中旬の間で高く、PAR の高い 8 月中には特に高い値を示した。一方、9 月下旬になると、PAR の変化に対する CO_2 吸収速度は急激に低下した。このことは葉の光合成活性の低下や枯死が主な要因であると推察される。さらに、一部のデータで見られた午後の光に対する CO_2 吸収率の低下は、大気飽差の過剰増大に対する気孔閉鎖により CO_2 交換速度が低下したことが原因であると考えられる。

2 CO_2 フラックスと環境要因の季節変化

Fig. 6 (上図) は、観測期間中における、 CO_2 吸収量としての NEP (生態系純生産量) の日中 (NEPday) と夜間 (NEPnight), そして合計値 (NEPtotal) の経日変化を示し、Fig. 6 (中図) は PAR,

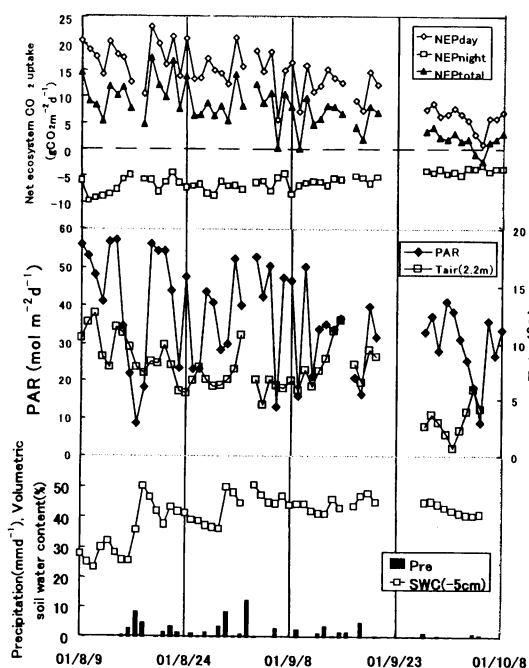


Fig. 6. Seasonal changes of daytime NEP (NEPday), nighttime NEP (NEPnight) and daily NEP (NEPtotal) (upper figure), accumulative photosynthetically active radiation (PAR) and air temperature (Tair) (middle figure), precipitation (Pre) and volumetric soil water content (SWC) (lower figure).

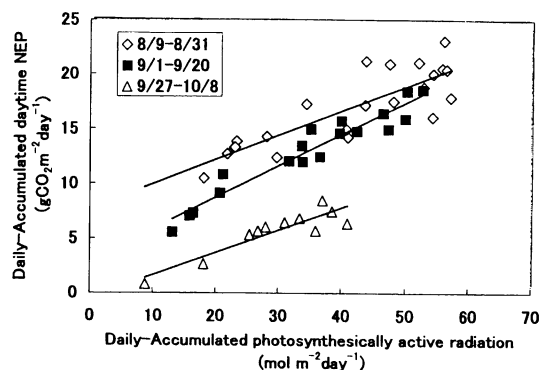


Fig. 7. Relationship between accumulative photosynthetically active radiation (PAR) and daytime net ecosystem production (NEPday) of the experimental period.

平均気温(Tair), Fig. 6 (下図) は降水量(Pre)と土壌水分量(SWC)の変化を示している。まず, NEPday は8月中旬に $20 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 前後の期間中最大値を示し, その値は PAR の季節変化に対応しながら減少していき, 10月5日に $0.8 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の最小値を示した。また, NEPnight は8月上旬に $-10 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 程度の負の最大値を示し, 秋に向かうにつれて減少していき, やはり10月5日に $-3.2 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の最小値を示した。そして, NEPtotal は8月19日に $17 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の最大値, 10月5日に $-2.5 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の最小値を示した。NEP の季節変化の傾向は, 気温の低下とともに NEPday, NEPnight, NEPtotal いずれもが0に近くなっていき, 降水があり PAR が激減すると, 日中の吸収量が減り日積

算値は0に近くなった。また, 観測期間中, 土壌水分量は30%以上の高い値を保ち, 植物に水ストレスが生じた可能性は低いと考えられる。

Fig. 7 は PAR と NEPday の関係を表している。いずれの期間でも NEPday は PAR に対して直線的に増大し, 各期間の回帰直線の傾きにはそれほどの差は見られなかった。しかし, 同量の PAR に対する NEPday の値は8月-9月中旬は同程度であったが, 10月には大きく低下した。

Fig. 8 (上図) は, 夜間の平均地温に対する, 夜間の平均 CO₂ 放出フラックスを示している。夏から秋に向かって地温が次第に低下していくのに伴い, CO₂ フラックスは指数関数的に減少し, 温度依存性の指標である Q_{10} は2.14であった。また, Fig. 8 (下図) は夜間の土壌水分に対する夜間の平均 CO₂ 放出フラックスを示しているが, それには一定の関係がみられず, 高い土壌水分状態が土壌呼吸を制限する要因にならなかったと思われる。

以上により, 海北地区の草原生態系における CO₂ フラックスの季節変化は, 日積算 PAR 量の変化に強く依存していることが明らかになり, 観測期間中は正味で CO₂ を吸収していることがわかった。また, PAR に対する生態系の CO₂ 吸収能力は8月上旬から9月中旬にかけては同程度であったが, 9月下旬

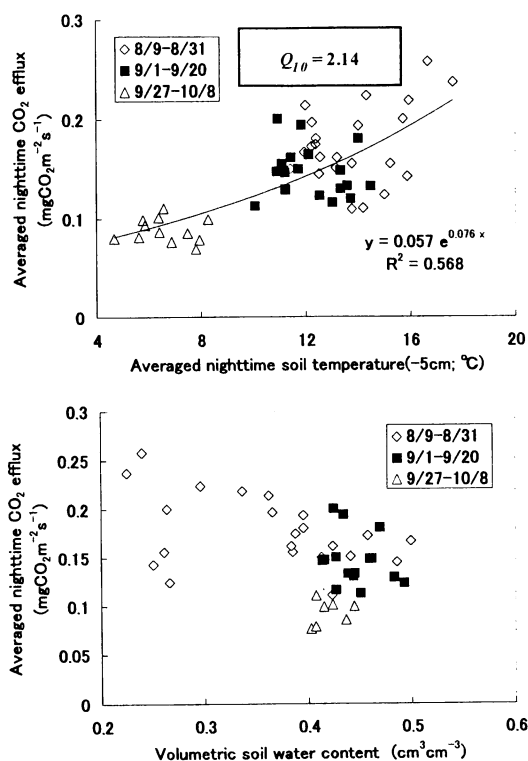


Fig. 8. Relationship between daily-averaged nighttime ecosystem CO₂ efflux and soil temperature (upper figure), soil water content (lower figure) of the experimental period.

以降になると急激に低下し、葉の枯死や各植物の光合成活性が低下していることが推察された。また、夜間の CO₂ 放出量は地温に依存していた。そして、土壌水分は観測期間中高く維持され、土壌呼吸を抑えるような現象は見られなかった。

V おわりに

2001年8月から10月初めにかけての観測結果によると、この高山草原生態系は CO₂ を吸収しており、観測期間において「炭素のシンク」であった。そしてその程度は、主に PAR に依存していた。

謝辞

本研究は、環境省地球環境研究推進費「温帯高山草原生態系における炭素動態と温暖化影響の解明に関する研究」(代表者:唐 艶鴻)によって行われた。

文献

- 李文華・周興民(1998): 青藏高原生態系統及優化利用模式, 広東科技出版社: 442P.
- 師生波・賁桂英・韓發(1991): 矮嵩草草甸植物群落生長的初步研究. 中国科学院高寒草甸生態系統定位站編著. 高寒草甸生態系統(3), 北京科学出版社, 69-74.
- Webb, E.K., Pearman, G.I. and Leuning, R. (1980) : Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transport. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 106, 85-100.