

## S-1 21世紀の炭素管理に向けたアジア陸域生態系の統合的炭素収支研究

## テーマI ボトムアップ（微気象・生態学的）アプローチによる

## 陸域生態系の炭素収支解析に関する研究

## (2) 草原・農耕地生態系における炭素収支の定量的評価に関する研究

## 4) 安定同位体比を用いたC3/C4混生草原における炭素動態の解析

筑波大学大学院生命環境科学研究科

及川武久

＜研究協力者＞	独立行政法人農業環境技術研究所	莫文紅
	独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構	下田星児
	筑波大学大学院生命環境科学研究科	濱田洋平
	中国西北農林科技大学林学院	劉 建軍
	北京大学	王 妮
	(株) エックス都市研究所	横山智子

平成14～18年度合計予算額 30,660千円

(うち、平成18年度予算額 6,900千円)

※上記予算額には、間接経費 7,076千円 を含む

[要旨] 草原は世界の陸地面積の1/3、モンスーンアジアの16%を占め、年間0.5PgCの正味の炭素シンクとして機能している。森林に比べて非同化器官を維持するコストが少ない草原の方が光合成の効率という点では優れているという指摘もあり、地球規模の環境変化に対するアジア陸域生態系全域における応答を精度よく評価するためには、このような草原における炭素動態を正確に把握する必要がある。本研究では、光合成回路や生理特性が異なるC3/C4植物が混生する温帯草原において、従来の手法に炭素安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) を用いる手法を併用して炭素動態の解析を行った。対象とした草原における植生調査の結果、LAI・地上部バイオマスともに、生長初期にはC3植物の方が大きいのに対し、後期にはC4植物の方が大きくなるという、優占種の逆転現象が見られた。植生-大気間のCO<sub>2</sub>交換および土壌呼吸に対するC3/C4植物の寄与率を評価するため、従来のフラックス観測手法に $\delta^{13}\text{C}$ を併用して解析を行ったところ、植生調査の結果と同様、光合成・生態系呼吸・土壌呼吸に主に寄与する植生がC3植物からC4植物へと季節的に移行していることが明らかになった。<sup>13</sup>Cのような化学的トレーサーによる手法は、生態系内部におけるプロセスの推定に有効であり、環境変動に対して複雑な応答を示すC3/C4混生草原の炭素動態に関して、植生間の競合を含めたより詳細な解析が可能となる。また、生態系内部の素過程を記述するプロセスモデルによる炭素動態の推定やモデル内部の素過程の妥当性の検証に貢献できる。

[キーワード] C3/C4混生草原、炭素安定同位体比、GPP、RE、NEE

## 1. はじめに

草原は、世界の陸地面積の1/3、モンスーンアジア (40°N~10°S ; 60°E~180°E) の16%を占め<sup>1)</sup>、

大気に対して年間0.5PgCの正味の炭素吸収源（炭素のシンク）として機能しているとされる<sup>2)</sup>。草原生態系に蓄積する炭素の総量は陸域生態系の40.4%（うち植物体は3.9%、土壌は36.5%）を占め、森林の46.3%<sup>3)</sup>とほぼ同程度であり、特に土壌中の炭素の割合が大きいことが特徴である。グローバルの炭素動態において、森林以上に草原の炭素循環機能が重要であることを、及川<sup>4), 5)</sup>が生態系モデルを用いて繰り返し強調してきた。大気中の炭素を陸上に固定するシステムという観点から森林と草原を比較した場合、バイオマスとしての現存量は森林の方が大きい、非同化器官を維持するコストが少ない草原の方が光合成の効率という点では優れているという指摘もある<sup>6)</sup>。したがって、地球規模の環境変化に対するアジア陸域生態系全域における応答を精度よく評価するためには、このような草原における炭素動態を正確に把握する必要がある。

ススキ (*Miscanthus sinensis*) が主な優占種であるC3/C4混生草原は、日本の中央から北部にかけて存在する<sup>7)</sup>。C3植物はC4植物に比べ、一般に光合成や成長の最適温度が低温側にあり、好適環境下では気孔コンダクタンスは大きく、蒸散で多くの水を消費するにもかかわらず最大の光合成速度は小さいという生理的特性を持つ<sup>8)</sup>。このような生態生理学的特性から、比較的冷涼な春から梅雨明け前まではC3草本が優占し、梅雨明け以降にC4草本が優占するというバイオマスの季節的な逆転現象が、我が国の草原で繰り返し認められているほか<sup>9, 10)</sup>、北米プレーリー<sup>11, 12)</sup>・アルゼンチン<sup>13)</sup>・ハンガリー<sup>14)</sup>など世界各地の温帯草原において観測されている。一方、陸域生態系における炭素動態の解明には、個々の素過程の解析を踏まえた詳細な解析が不可欠である。これらの素過程を解明する上で、安定同位体を化学トレーサーとして用いる手法が有効である。C3/C4混生草原においては特に、C3/C4植物間の光合成回路の違いのため固定される炭素の安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) に明らかな差が生じることが知られており (C3で $-25\sim-30\text{‰}$ 、C4で $-11\sim-14\text{‰}$ )、 $\text{CO}_2$ ・植物体・土壌有機物等の  $\delta^{13}\text{C}$  が生態系の炭素循環プロセスを詳細に解明する手がかりになると考えられる。

## 2. 研究目的

C3/C4植物が混生する温帯草原における両植生の動態と、それが $\text{CO}_2$ フラックスに及ぼす影響を解明する。具体的には、1) 長期的なバイオマス調査に基づき、対象とした草原におけるC3/C4植物の季節的な動態を定量的に把握する、2) 草原全体の植生と大気間の $\text{CO}_2$ フラックス観測および大気 $\text{CO}_2$ の  $\delta^{13}\text{C}$  の測定に基づき、草原全体の $\text{CO}_2$ フラックスに対するC3/C4植物の寄与率を推定する、3) 対象とした草原に成立している特徴的な群落において、土壌呼吸フラックスの推定と土壌 $\text{CO}_2$ の  $\delta^{13}\text{C}$  の測定を行い、草原全体の土壌呼吸に対する各群落およびC3/C4植物の寄与率を推定する。

## 3. 研究方法

### (1) 観測サイトの概要

観測サイトとして設定した草原は、筑波大学陸域環境研究センター (TERC) 内の気象観測圃場 ( $36^{\circ}06' \text{ N}$ 、 $140^{\circ}06' \text{ E}$ 、海拔標高27m) である (以下「実験草原」と呼ぶ)。この草原はほぼ平坦な直径160mの円形で、中心に高さ30mの気象観測タワーが設置されており、熱収支・水収支に関する気象観測が長期に渡り行われている。この地域の土壌は火山灰を母材とする典型的な淡色黒ボク土であるが<sup>15)</sup>、実験草原の土壌は気象観測圃場の造成に伴う攪乱の影響が確認されている<sup>16)</sup>。

植生は春から初夏にかけてはセイタカアワダチソウ (*Solidago altissima*) を中心としたC3植物が優占するが、夏から秋にかけては優占種がススキ (*Miscanthus sinensis*) やチガヤ (*Imperata cylindrica*) などのC4植物へ移行する<sup>17-25)</sup>。空中写真による調査の結果<sup>26)</sup>、これら3種の群落の分布はかなり不均質であり、実験草原全体の面積に占めるセイタカアワダチソウ・ススキ・チガヤの群落面積は2001年10月の時点でそれぞれ33.6%、36.1%、30.3%である。

## (2) バイオマスの季節変化<sup>17-25)</sup>

実験草原内に定置コドラート (2m×2m) を東西列40個・南北列40個設定し、月1回種別に被度・草丈を測定し、全コドラートにおける出現頻度が5%以上かつ各コドラートでの被度が0.5%以上の種について、定置コドラート外の場所で地上部の刈り取りを3ヶ所で行い、被度-乾燥重量、被度-葉面積の関係式を求め、全コドラートにおける種別の乾燥重量と葉面積を推定した。さらに、種別の葉面積指数 (LAI) と地上部バイオマスを算出した。

## (3) 植生-大気間のCO<sub>2</sub>フラックス

### 1) 渦相関法によるCO<sub>2</sub>フラックス観測<sup>27-29)</sup>

生長期の主風向 (南東～南) に対して吹走距離が長くなるように、フラックスおよび微気象要素の観測を実験草原の中心から北北西に60mの地点に設置した。高度2.0mに設置した三次元超音波風速温度計 (DAT600、Kaijo、Japan) と赤外線ガス分析計 (LI-7500、Li-Cor、USA) を用いて、顕熱・潜熱・CO<sub>2</sub>フラックスを観測した。得られたフラックスデータに対してQC操作を行った後、昼間および夜間のCO<sub>2</sub>フラックスについてそれぞれ光合成有効放射量および気温との相関を取り、欠測補間を行ってデータセットとした。

### 2) 大気CO<sub>2</sub>の採取およびδ<sup>13</sup>Cの分析

δ<sup>13</sup>Cの分析に供する大気CO<sub>2</sub>の採取は、生長期において基本的に月1度行い、1度のサンプリングには日中3回、夜間3回で連続2日間行った。サンプリングは、渦相関法によるフラックス観測用のポール後方に設けた高さ別の採気口からチューブを伸ばし、ダイヤフラムポンプを用いて空気を吸引した。空気を除湿剤 (過塩素酸マグネシウム) のカラムに通し、毎分0.5Lの流量で4分間以上流した後、あらかじめ標準ガスを詰めておいた容積1Lのガラス製フラスコに採集した。サンプリングは2002年の5月・7月・8月・10月、2003年には5月～11月に月1度行った。採取したサンプルは、赤外線ガス分析計 (NDIR) を用いてCO<sub>2</sub>濃度を高精度に測定した。その後、(独) 産業技術総合研究所・村山研究室のCO<sub>2</sub>ガス精製ラインを用いてCO<sub>2</sub>を精製した後、質量分析計によりδ<sup>13</sup>Cを測定した。

### 3) 草原全体-大気間のCO<sub>2</sub>交換に対するC3/C4植物の寄与率の推定

大気CO<sub>2</sub>濃度の逆数とδ<sup>13</sup>Cの関係をプロットした図 (Keeling plot) を用いて、夜間と日中それぞれの回帰直線のY切片から、RE由来の同位体比 (δ<sup>13</sup>C<sub>RE</sub>) と正味CO<sub>2</sub>交換による同位体比 (δ<sup>13</sup>C<sub>NEE</sub>) を求めた。実験草原周囲の森林起源のCO<sub>2</sub>が含まれる可能性の高い時間帯に収集された大気、および平均値からの偏差が2以上の場合は除外した (それぞれ19.9%および9.3%を占めた)。日中と夜間のKeeling plotの切片 (δ<sup>13</sup>C<sub>NEE</sub>, δ<sup>13</sup>C<sub>RE</sub>) および渦相関法によるNEE, GPP, REの値を用いて、(1)式より光合成による同位体比 (δ<sup>13</sup>C<sub>GPP</sub>) を計算した。また、GPPおよびREへのC4植物の寄与率 (X<sub>C4</sub>) を(2)式、C3植物の寄与率 (X<sub>C3</sub>) を(3)式により算出できる。

$$\delta^{13}\text{C}_{NEE} \cdot NEE = \delta^{13}\text{C}_{GPP} \cdot GPP + \delta^{13}\text{C}_{RE} \cdot RE \quad (1)$$

$$X_{C4} = (\delta^{13}\text{C}_{GPP, RE} - \delta^{13}\text{C}_{C3}) / (\delta^{13}\text{C}_{C4} - \delta^{13}\text{C}_{C3}) \quad (2)$$

$$X_{C3} = (\delta^{13}\text{C}_{GPP, RE} - \delta^{13}\text{C}_{C4}) / (\delta^{13}\text{C}_{C3} - \delta^{13}\text{C}_{C4}) \quad (3)$$

ここで、 $\delta^{13}\text{C}_{C3}$ および $\delta^{13}\text{C}_{C4}$ はC3/C4植物それぞれの $\delta^{13}\text{C}$ 値（C3植物およびC4植物の平均値として-29.9‰および-11.5‰を用いた）である。

#### （４）群落別の土壌呼吸フラックス

##### １）拡散法による土壌呼吸フラックスの推定

土壌呼吸フラックスの定点観測には、草本が極めて密に繁茂しているため地上部の植生を攪乱するチャンパー法を用いず、拡散法による間接的な手法を用いた。実験草原における主要な3種類の群落（セイタカアワダチソウ・チガヤ・ススキ）を代表する地点を選定し、2006年3月～11月の毎月中旬に土壌中の $\text{CO}_2$ 濃度・地温・体積含水率を測定した。土壌空気は自作した多深度型土壌空気採取管を用いて深度50cmまでの各深度から採取し、ガスクロマトグラフィーによって $\text{CO}_2$ 濃度を測定した。土壌呼吸速度はFickの拡散式にしたがい、対象とするガスの濃度勾配と拡散係数の積で与えられるとした。 $\text{CO}_2$ の濃度勾配は地表面から深度5cmおよび10cmにかけての平均的な勾配を与えた。土壌中のガス拡散係数は、遅沢式拡散係数測定装置による実測<sup>30)</sup>と気相率との関係をTroeh式<sup>31)</sup>で回帰し、深度5cmにおける群落ごとの気相率から推定した。

##### ２）土壌呼吸に占めるC3/C4植物の寄与率の推定

2006年3月～11月の奇数月の下旬に、分析に必要な量の土壌空気を採取し $\text{CO}_2$ の濃度および $\delta^{13}\text{C}$ を測定した。 $\delta^{13}\text{C}$ の分析には、(独)産業技術総合研究所・村山研究室の同位体比質量分析計およびガス精製ラインを使用した。土壌呼吸として大気中に放出される $\text{CO}_2$ の $\delta^{13}\text{C}$ はKeeling Plotから推定した。この際、大気 $\text{CO}_2$ の濃度および $\delta^{13}\text{C}$ の点を通るように回帰直線を引き、得られたY切片からさらに $^{12}\text{CO}_2$ と $^{13}\text{CO}_2$ の拡散係数の違いに起因する4.4‰を差し引いた。また、空中写真から得られた3種の群落の面積比に基づいて加重平均し、草原全体での土壌呼吸の $\delta^{13}\text{C}$ を概算した。

## ４．結果・考察

### （１）バイオマスの季節変化

過去に調査された地上部バイオマスの季節変化を集計し、データベースに提供した(図1)。年による絶対量の差はあるが、実験草原のLAIは生長初期にはC3植物の方が大きいのに対し、後期にはC4植物の方が大きくなった。地上部バイオマスについても同様の結果が得られた。

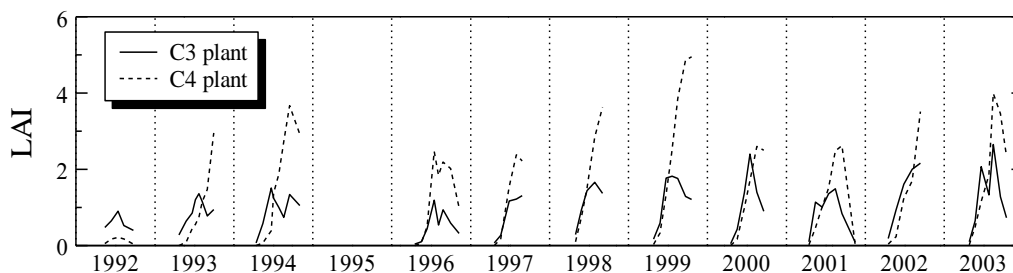


図 1 実験草原におけるLAIの経年変化

## (2) NEE・GPP・REの季節変化および年々変化

2001～2003年の年間CO<sub>2</sub>交換量を表 1に示す。NEEは5月から7月まで正の値を示す一方、8月以降は1 gC m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>以下となった。2003年は8月には、草原がCO<sub>2</sub>の吸収源から放出源に移行した。GPPは植生の増加とともに増加し、7月下旬から8月上旬にピーク（18～22 gC m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>）に達した。本草原では、光合成有効放射量の増加にしたがってGPPが増加する期間には、REも気温上昇にしたがって増加した。このため、各年の日中NEEは約5%の差しかなく、夜間NEEの差はほとんどなかった。本C3/C4混生草原サイト(Tsukuba)のGPPは、同じ日本のTakayamaの森林や中国のQinghai-Tibetanの高山草原よりLAIが大きく、GPPは3～5倍程度であった(表 2)。またTsukubaサイトは、C3植物と高温での光合成速度の大きいC4植物が混生しているため、生長期間が長期化すると同時に生産力がおおきくなったと考えられる。したがって、Little Washita、Oklahomaのプレーリー草原より最大LAIと年間GPPが大きく、世界の半乾燥地域に分布する草原よりもむしろ熱帯森林に近い炭素吸収能力を示した。

表 1 GPP・RE・NEEの年々変化

year	Rn (MJ m <sup>-2</sup> )	LE (MJ m <sup>-2</sup> )	GPP (gC m <sup>-2</sup> )	RE (gC m <sup>-2</sup> )	NEEtotal (gC m <sup>-2</sup> )
2001	2517	1650	2573	-2562	11
2002	2576	1753	2698	-2632	66
2003	2261	1514	2491	-2454	37

表 2 植生タイプ別の年間GPPの比較

Site	Type	Maximum		GPP (g C m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )	Source
		(Latitude, longitude)	LAI		
Manaus	Tropical rain forest		5.9	3249	Malhi et al., 1997
Takayama	Deciduous forest	(36.1°N, 137.3°E)	3.5	875	Saigusa et al., 2002
Little Washita	Prairie	(49.4°N, 112.6°W)	0.5	542	Meyers, 2001
Oklahoma	Tallgrass prairie	(36.6°N, 96.4°W)	2.9	1715	Suyker et al., 2003
Qinghai-Tibetan	Alpine meadow	(37.3°N, 101.2°E)	3.8	575	Kato et al., 2004
Tsukuba	C3/C4 grassland	(36.1°N, 140.1°E)	4.0-6.7	2491-2698	This study

## (3) GPP・REに対するC3/C4寄与率の季節変化

2003年に観測された $\delta^{13}C_{GPP}$ および $\delta^{13}C_{RE}$ は、生長期間が進むにつれてとも徐々に増加し、9月には約-19‰で最大に達した。この傾向はC4植物起源のCO<sub>2</sub>フラックス割合の増加を反映しており、バイオマス・LAIにおけるC4植物の占める割合の季節変化におおむね一致した。実験草原における成長期間(4月中旬～11月上旬)のGPPへのC3/C4植物の寄与率はそれぞれ63.7%、36.3%、REへのC3/C4植物の寄与率はそれぞれ52.3%、47.7%と推定された(図 2)。

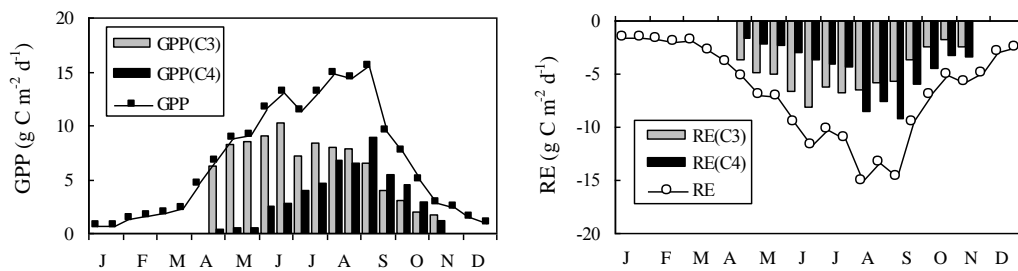


図2 C3/C4植物のGPP（左）およびRE（右）に対する寄与率の季節変化（2003年）

#### （4）群落別の土壌呼吸とC3/C4植物の寄与率

拡散法で求められた土壌呼吸のフラックスは、実験草原においてチャンバー法を用いて過去に測定された値<sup>32, 33)</sup>とほぼ同様の値を示した。群落間の違いを見ると、セイタカアワダチソウ群落とススキ群落はほぼ同様の変化を示したが、6月以前は前者が、7月以降は後者がやや上回る結果を示し、チガヤ群落では年間を通じて他の2つを大きく下回った。 $\delta^{13}\text{C}$ については、群落別の季節変化の傾向は明瞭ではないが、草原全体では5月～11月にかけてC3寄りの値からC4寄りの値へ変化する傾向が認められた（図3）。これらの傾向は、バイオマスや植生-大気間の $\text{CO}_2$ 交換に見られるC3/C4植物間の競合関係と同様であった。

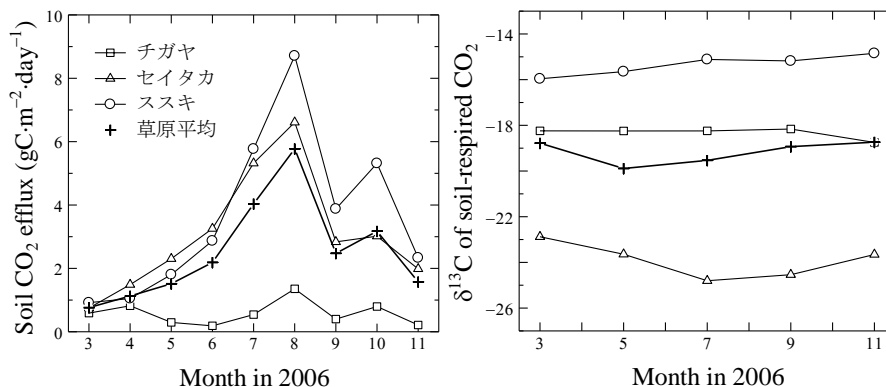


図3 群落別および実験草原全体についての土壌呼吸のフラックス（左）および $\delta^{13}\text{C}$ （右）

### 5. 本研究により得られた成果

#### （1）科学的意義

本研究では、従来の生態学的手法（バイオマス調査）・微気象学的手法（渦相関法によるフラックス観測）に加えて、化学的トレーサー（炭素安定同位体比）による手法を併用した。これによって、異なる光合成回路や生理特性を持つ植生が混在するために環境変動に対して複雑な応答を示すことが予想される温帯草原の炭素動態に関して、植生間の競合を含めたより詳細な解析が可能となる。また、生態系内部の素過程を記述するプロセスモデル（例えばSim-CYCLE）による炭素フラックスの推定値やモデル内部の素過程の妥当性の検証に貢献することができる。

#### （2）地球環境政策への貢献

炭素フラックスの推定や将来予測に用いられる、陸域生態系についてのプロセスモデルの検証に寄与することを通して、東アジア湿潤気候特有の暖温帯高草型草原生態系における炭素収支の推定値の精度向上を可能にする。その成果はさらに、国際的な炭素管理計画の策定ならびに政府間レベルの協議の基盤的知見となることが期待される。本研究で得られた成果は今後、学術誌等での公表およびシンポジウムでの発表を通じ、成果の広報・普及に努める。

## 6. 引用文献

- 1) Oikawa, T., and Ito, A. (2001): Modeling carbon dynamics of terrestrial ecosystem in monsoon Asia. In: Matsuno, T. and Kida, H. (eds.), Present and Future of Modeling Global Environmental Change: Towards Integrated Modeling. Terra Scientific Publishing, Tokyo, 207-219.
- 2) Scurlock, J. M. O. and Hall, D. O. (1998): The global carbon sink: a grassland perspective. *Global Change Biology*, 4, 229-233.
- 3) Watson, R. T., Noble, I. R., Bolin, B., Ravindranath, N. H., Verardo, D. J. and Dokken, D. J. (2000): Land Use, Land-Use Change, and Forestry: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK, 375 p.
- 4) Oikawa, T. (1990): Modelling Primary Production of Plant Communities. In: Kawanabe et al. (eds) Ecology for Tomorrow. *Physiological Ecology Japan*, 27 (Special Number), 63-80.
- 5) Oikawa T., (1993): Comparison of ecological characteristics between forest and grassland ecosystems based on a dry-matter production model. *Journal of Environmental Sciences (Kyungpook National University)*, 7, 67-78.
- 6) 渡辺 力 (2005): 陸上生態系の躍進的理解に向けて—及川教授からの手紙—, *AsiaFlux Newsletter*, 14, 1-4.
- 7) Yamamoto, Y., Saito, Y., Kirita, H., Hayashi, H. and Nishimura, N. (1997): Ordination of vegetation of *Miscanthus*-type grassland under some artificial pressure. *Grassland Science*, 42, 307-314.
- 8) Jones, H. G. (1992): *Plants and Microclimate*, 2nd ed. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 428 p.
- 9) Saigusa, N., Oikawa, T. and Liu, S. (1998): Seasonal variation of exchange of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O between a grassland and atmosphere: An experimental study. *Agric. For. Meteorol.*, 89, 131-139.
- 10) Mo, W., Nishimura, N., Soga, Y., Yamada, K. and Yoneyama, T. (2004): Distribution of C3 and C4 plants and changes in plant and soil carbon isotope ratios with altitude in the Kirigamine grassland, Japan. *Grassland Science*, (in press).
- 11) Monson, R. K. and Williams, G. J. III (1982): A correlation between photosynthetic temperature adaptation and seasonal phenology patterns in the shortgrass prairie. *Oecologia*, 54, 58-62.
- 12) Monson, R. K., Littlejohn, R. O. and Williams, G. J. III (1983): Photosynthetic adaptation

- to temperature in four species from Colorado shortgrass steppe: a physiological model for coexistence. *Oecologia*, 58, 43-51.
- 13) Cavagnaro, J.B. (1988): Distribution of C3 and C4 grasses at different altitudes in temperature arid region of Argentina. *Oecologia*, 76, 273-277.
  - 14) Kalapos, T. (1991) C3 and C4 grasses of Hungary: Environmental requirements, phenology and role in the vegetation. *Abstracta Botanica*, 15, 83-88.
  - 15) 安井弓子、及川武久 (1993) : 筑波大学構内アカマツ林床における土壌呼吸速度と微気象環境の日変化・季節変化特性, 筑波大学水理実験センター報告, 18, 77-91.
  - 16) 濱田洋平、A.R. インドラ F.、田中 正 (1998) : 筑波大学水理実験センター内のアカマツ林および熱収支・水収支観測圃場における土壌の物理特性, 筑波大学水理実験センター報告, 23, 1-10.
  - 17) 劉 厦、及川武久 (1993) : 水理実験センター草原生態系の現存量の種別の季節変化と環境条件, 筑波大学水理実験センター報告, 18, 69-75.
  - 18) 赤沢孝之、及川武久 (1995) : 水理実験センター草原生態系における主要植物種の現存量の季節変化とその生態学的解析, 筑波大学水理実験センター報告, 20, 69-77.
  - 19) 田中克季、及川武久 (1998) : 水理実験センター内円形圃場草原におけるC3・C4植物のLAIの季節変化 (1996、1997) , 筑波大学水理実験センター報告, 23, 87-89.
  - 20) 田中克季、及川武久 (1999) : C3/C4植物が混生した水理実験センター内円形草原圃場におけるバイオマスとLAIの季節変化特性, 筑波大学水理実験センター報告, 24, 121-124.
  - 21) 横山智子、及川武久 (2001) : 水理実験センター圃場における1999年のC3/C4混生草原のLAIとバイオマスの季節変化, 筑波大学陸域環境研究センター報告, 1, 67-71.
  - 22) 横山智子、及川武久 (2002) : 陸域環境研究センター圃場における2000年のC3/C4混生草原のLAIとバイオマスの季節変化, 筑波大学陸域環境研究センター報告, 2, 37-39.
  - 23) 井柵史彦、莫 文紅、加藤美恵子、及川武久 (2002) : 陸域環境研究センター圃場における2001年のC3/C4混生草原のLAIと地上部バイオマスの季節変化, 筑波大学陸域環境研究センター報告, 3, 17-25.
  - 24) 莫 文紅、井柵史彦、横山智子、及川武久 (2003) : 陸域環境研究センター圃場における2002年のC3/C4混生草原のLAIと地上部バイオマスの季節変化, 筑波大学陸域環境研究センター報告, 4, 109-117.
  - 25) 横山智子、莫 文紅、及川武久 (2004) : 陸域環境研究センター圃場における2003年のC3/C4混生草原のLAIと地上部バイオマスの季節変化, 筑波大学陸域環境研究センター報告, 5, 119-127.
  - 26) 李 載錫、李 吉宰、及川武久 (2002) : パラグライダーから撮影した写真に基づく草原群落の種組成解析とバイオマスとリター量の推定について, 筑波大学陸域環境研究センター報告, 3, 27-33.
  - 27) Li, S.-G., Lai, C.-T., Yokoyama, T. and Oikawa, T. (2003): Carbon dioxide and water vapor exchange over a Miscanthus-type grassland: Effects of development of the canopy. *Ecological Research*, 18, 661-675.
  - 28) Li, S.-G., Lai, C.-T., Lee, G., Shimoda, S., Yokoyama, T., Higuchi, A. and Oikawa, T.



- (2005): Evapotranspiration from a wet temperate grassland and its sensitivity to microenvironmental variables. *Hydrological Processes*, 19, 517-532.
- 29) Shimoda, S., Mo, W. and Oikawa, T. (2005): The effect of characteristics of Asian Monsoon climate on interannual CO<sub>2</sub> exchange in a humid temperate C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub> co-occurring grassland. *SOLA*, 1, 169-172.
- 30) 濱田洋平、及川武久 (2006): 遅沢式拡散係数測定装置を用いた草地土壌のガス拡散係数の測定, 筑波大学陸域環境研究センター報告, 7, 71-86.
- 31) Troeh, F.R., Jabro, J.D. and Kirkham, D. (1982): Gaseous diffusion equations for porous materials. *Geoderma*, 27, 239-253.
- 32) Hamada, Y. (1999): Production and Transport Processes of Carbon Dioxide in Soil Profiles at a Coniferous Forest and an Adjacent Grassland. Ph.D. thesis, University of Tsukuba, 194 p.
- 33) Wang, W., Ohse, K., Liu, J., Mo, W. and Oikawa, T. (2005): Contribution of root respiration to soil respiration in a C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub> mixed grassland. *J. Biosci.*, 30, 507-514.

#### 7. 国際共同研究等の状況

中国西北農林科技大学林学院（陝西省楊陵）が秦嶺森林生態系研究サイトにおける炭素循環研究の展開に、特に土壌呼吸測定手法などについて技術協力を平成16年度に行った。今後の共同研究展開について双方の意向確認と共同研究実施形態について協議中である。

#### 8. 研究成果の発表状況

##### (1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) S.-G. Li, C.-T. Lai, T. Yokoyama and T. Oikawa: *Ecological Research* 18, 661-675 (2003)  
“Carbon dioxide and water vapor exchange over a *Miscanthus*-type grassland: Effects of development of the canopy”
- 2) W. Mo, N. Nishimura, Y. Soga, K. Yamada and T. Yoneyama: *Grassland Science* 50, 243-254 (2004)  
“Distribution of C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> plants and changes in plant and soil carbon isotope ratios with altitude in the Kirigamine grassland, Japan”
- 3) S.-G. Li, C.-T. Lai, G. Lee, S. Shimoda, T. Yokoyama, A. Higuchi and T. Oikawa: *Hydrological Processes* 19, 517-532 (2005)  
“Evapotranspiration from a wet temperate grassland and its sensitivity to microenvironmental variables”
- 4) 莫文紅、関川清広: 日本生態学会誌, 55, 125-140 (2005)  
「特集 陸上生態系における炭素フラックス調査法 現状と今後の課題 土壌からの炭素放出の定量」
- 5) W. Mo, M.-S. Lee, M. Uchida, M. Inatomi, N. Saigusa, S. Mariko and H. Koizumi: *Agricultural and Forest Meteorology*, 134, 81-94 (2005)

“Seasonal and annual variations in soil respiration in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan”

- 6) S. Shimoda, W. Mo and T. Oikawa: SOLA, 1, 169-172 (2005)

“The effect of characteristics of Asian Monsoon climate on interannual CO<sub>2</sub> exchange in a humid temperate C3/C4 co-occurring grassland”

- 7) W. Mo, N. Nishimura, S. Mariko, M. Uchida, M. Inatomi and H. Koizumi: Phytton, 45, 99-107 (2005)

“Inter-annual variation in CO<sub>2</sub> effluxes from soil and snow surfaces in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest”

<査読付論文に準ずる成果発表>

なし

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 下田星児、莫文紅、村山昌平、高村近子、及川武久：筑波大学陸域環境研究センター報告，4，11-17（2003）

「大気安定同位体比によるC3/C4混生草原生態系におけるCO<sub>2</sub>交換特性の解析」

- 2) 莫文紅、井樹史彦、横山智子、及川武久：筑波大学陸域環境研究センター報告，4，109-117（2003）

「陸域環境研究センター圃場における2002年のC3/C4混生草原のLAIと地上部バイオマスの季節変化」

- 3) 劉建軍、莫文紅、及川武久：筑波大学陸域環境研究センター報告，5，13-20（2004）

「陸域環境研究センター圃場におけるC3/C4混生草原の地下部バイオマスと成長量の季節変化」

- 4) 下田星児、莫文紅、村山昌平、及川武久：筑波大学陸域環境研究センター報告，5，21-28（2004）

「渦相関法と大気炭素安定同位体手法による夜間生態系呼吸量の細分化」

- 5) 横山智子、莫文紅、及川武久：筑波大学陸域環境研究センター報告，5，119-127（2004）

「陸域環境研究センター圃場における2003年のC3/C4混生草原のLAIと地上部バイオマスの季節変化」

- 6) 濱田洋平、及川武久：筑波大学陸域環境研究センター報告，7，71-86（2006）

「遅沢式拡散係数測定装置を用いた草地土壌のガス拡散係数の測定」

（2）口頭発表（学会）

- 1) 下田星児、莫文紅、村山昌平、高村近子、及川武久：農業環境工学関連5学会2003年度合同大会（2003）

「草原生態系の炭素安定同位体比の季節変化」

- 2) 下田星児、及川武久：農業環境工学関連5学会2003年度合同大会（2003）

「梅雨明け後のC3/C4混生草原の群落温度と蒸散特性の関係」

- 3) 下田星児、及川武久：日本写真測量学会平成15年度年次学術講演会（2003）

「梅雨明け後の草原生態系の群落表面温度の解析」

- 4) 劉建軍、莫文紅、及川武久：筑波大学陸域環境研究センター年次報告会（2004）  
「陸域環境研究センター圃場におけるC3/C4混生草原地下部バイオマスと成長量の季節変化」
- 5) W. Mo, S.-G. Jia, M.-S. Lee, M. Uchida, M. Inatomi and H. Koizumi: Sixth International Conference on Air Pollution and Global Change, Tsukuba, Japan (2004)  
“Seasonal and annual variation of soil respiration in a cool-temperature deciduous broad-leaved forest in Takayama, Japan”
- 6) 関川清広、莫文紅、木部剛、小泉博、鞠子茂：第52回日本生態学会（2005）  
「チャンパータイプと土壌呼吸測定値の評価」
- 7) W. Wang, K. Ose, J.-J. Liu, W. Mo and T. Oikawa: 第52回日本生態学会（2005）  
“Contribution of root respiration to total soil respiration in a mixed C3/C4 grassland of Japan”
- 8) 下田星児、村山昌平、莫文紅：農業環境工学関連7学会2005年度合同大会（2005）  
「大気炭素安定同位体によるCO<sub>2</sub>フラックスへのC3/C4種寄与率の推定」
- 9) 下田星児：平成17年度農業気象学会中国・四国支部大会（2005）  
「ススキ草原における生産量の年変動」
- 10) 下田星児、村山昌平、莫文紅、及川武久：2006年度日本気象学会関西支部例会（2006）  
「大気CO<sub>2</sub>安定同位体シグナルにより検出される温帯草原の生物季節特性」
- 11) 濱田洋平、及川武久：日本農業気象学会2007年春季大会（2007）  
「炭素安定同位体比を用いたC3/C4混生草原における土壌CO<sub>2</sub>の動態解析」

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし