

## 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

The Seasonal Changes in Belowground Biomass and Productivity  
of a C3/C4 Mixed Grassland in the TERC

劉 建軍\*・莫 文紅\*・及川 武久\*

Jianjun LIU\*, Wenhong MO\* and Takehisa OIKAWA\*

### 1 はじめに

気候変動に関する政府間パネルは世界の地表の平均温度がこの 100 年間に 0.3 ~ 0.6 °C 上昇したと推定している。地球温暖化は 21 世紀の気候パターンに、地域や地球のバイオマスに負の影響を与える可能性のある重要な変化を引き起こすであろうと予測されている (国際連合食糧農業機関, 2002)。地球温暖化の主たる原因は大気中の CO<sub>2</sub> など温室効果ガスの増加にあると言われている。陸域生態系において推定 125 Gt の炭素が、年間に植生、土壌と大気との間で出入りしており、地表と大気との間の総炭素循環の 5 分の 2 に相当する (国際連合食糧農業機関, 2002)。そのため、地球規模の炭素動態における陸域生態系の炭素循環機能が、特に地球温暖化の防止に重要な役割を担っているものとして注目され、陸域生態系における CO<sub>2</sub> フラックスを中心とした炭素収支の定量的評価等の研究が盛んに行われるようになってきた。

一方、草原 (ツンドラ、熱帯サバンナおよび温帯草原などを含む) は世界の陸地面積の 23.1% を占める。草原生態系における炭素貯留量は 634

Pg C であり、陸域生態系全体の炭素貯留量の 25.6% を占め、熱帯草原とサバンナは大気に対して年間 0.5 Pg C の正味の炭素吸収源 (炭素のシンク) として機能し、グローバル炭素循環において草原生態系の重要性が世界的に認知されるようになってきた (Scurlock and Hall, 1998)。草原生態系の植物体に蓄積されている炭素量は地上部現存量と地下部 (根、地下茎などの地下器官を含む) 現存量の両方を含む。地上部に関してはこれまでに多くの研究成果があるが (莫ほか, 2003; 井樹ほか, 2002; 横山・及川, 2000; 田中・及川, 1998, 1999)、地下部に関しての実測例はとても少なく、特に植生の地下部から土壌への炭素移入量についてはほとんど明らかになっていない。本研究が調査地とする筑波大学陸域環境研究センター圃場の C3/C4 混生草原では、1993 年以降長期間にわたって継続して植生調査が行なわれ、C3 植物と C4 植物の地上部バイオマスや LAI の季節変化と気象要因との相関関係などが解明されつつある。しかし、地下部バイオマスと成長量に関するデータは殆どなかった。そこで、本研究は地下部のバイオマスおよび成長量の季節変化を調査し、C3/C4 混生草原の炭素循環における地下

\* 筑波大学生命環境科学研究科

部の役割を定量的に解明することを目的とした。

## II 方法

### 1. 調査地の概要

本研究は筑波大学陸域環境研究センター(茨城県つくば市 36° 06' N, 140° 06' E, 標高 27 m) 圃場の C3/C4 混生草原で行った。本調査地は気候的には暖温帯に位置し、極相として常緑樹の照葉樹林が成立する。1982 年～2001 年の年平均気温は 14.1℃、年平均降雨量は 1207 mm である。土壌は火山灰を母材とする典型的な淡色黒ボク土で、当地域における代表的な土壌である(濱田ほか, 1998)。当圃場は直径 160 m, 面積約 2 ha の円形圃場である。そこで、1987 年に種子吹きつけ工事が行なわれ、選定された植物種類はオニウシノケグサ (*Festuca arundinacea*, 品種名ケンタッキー31 フェスク), シロツメクサ (*Trifolium pratense*, 品種名ホワイトクローバー), シナダレスズメガヤ (*Eragrostis curvula*, 品種名ウーピングラブグラス) 等の牧草種である。草原植生を維持するために、その後、1992 年までは年 2 回(夏と冬)、1993 年以降は年 1 回(冬のみ)の地上部刈り取り管理を行っている。現在の植生は多様な植物が混生しており、セイタカアワダチソウ (*Solidago altissima*), ヨモギ (*Artemisa princeps*), オニウシノケグサ等の C3 植物、及びススキ (*Miscanthus sinensis*), チガヤ (*Imperata cylindrica*) 等の C4 植物が優占している(田中・及川, 1998, 1999; 横山・及川, 2000; 井榊ほか, 2002; 莫ほか, 2003)。

### 2. 地下部バイオマスの調査

2003 年 2 月から 10 月にかけて 2ヶ月毎に 1 回、円形圃場内の C3 植物であるセイタカアワダチソウ優占区、および C4 植物であるススキ優占区・チガヤ優占区それぞれにおいて検土杖(直径 6 cm, 中国製)を用いて地表面から 50 cm

まで 10 cm 間隔で根-土壌コアをサンプリングした。1 回の調査につきススキ優占区・チガヤ優占区ではそれぞれ 10ヶ所、セイタカアワダチソウ優占区では 15ヶ所でサンプリングを行った。根-土壌コアのサンプルはメッシュサイズ 0.5 mm のふるいを用いて水洗いの方法で地下部を選別した。さらに根の色、弾力などについて目視判別の方法(Bledsoe *et al.*, 1999)を用いて生存部と枯死部に分けて、65℃で 72 時間乾燥させて、乾燥重量を求めた。

### 3. 地下部成長量調査

2003 年 2 月に円形圃場内植生調査の定置コードと平行して南北・東西 2 方向に 160 個のルートイングロースコア(Root in growth core)を設置した(すなわち植生調査の結果を用いてセイタカアワダチソウ優占区、ススキ優占区およびチガヤ優占区に分ける)。さらに地下部バイオマス調査区のセイタカアワダチソウ優占区で 30 個ルートイングロースコアを設置した。セイタカアワダチソウ優占区とチガヤ優占区各優占区について 4 月から 11 月にかけて月 1 回それぞれ 10 個ずつルートイングロースコアを回収した。ススキ優占区については 11 月のみ 30 個ルートイングロースコアを回収した。回収したルートイングロースコア中の地下部(根と地下茎等)の乾物重から地下部の成長量を測定した。同時にルートイングロースコアの周りに 50 cm × 50 cm のコドラートを設置して、コドラート中の地上部植物体を刈り取って、地上部バイオマスを測定した。

### 4. 地下部リターの分解実験

ルートリターバッグ法(root litter bag method)を用いて地下部リター(乾燥させた根と地下茎)の分解実験を行った。あらかじめサンプリングしたセイタカアワダチソウおよびチガヤの地下部(根と地下茎)を水洗いした後、乾燥させたものを実験材料に用いた。2003 年 3 月にセイタカ

アワダチソウ優占区 (C3) およびチガヤ優占区 (C4) に各 50 個 (計 100 個) リターバッグを設置した。リターバッグ (10 cm × 15 cm, 1 mm メッシュ) には 5 g の実験材料を入れ、深さ 5 cm の土層に埋めた。4 月から 11 月まで月 1 回リターバッグ (各 6 個) を回収した後、その中に分解されずに残った地下部の乾燥重量を測定し Olson (1963) の指数モデルより地下部リターの分解速度を計算した。

### III 結果

#### 1. 地下部バイオマスの季節変化

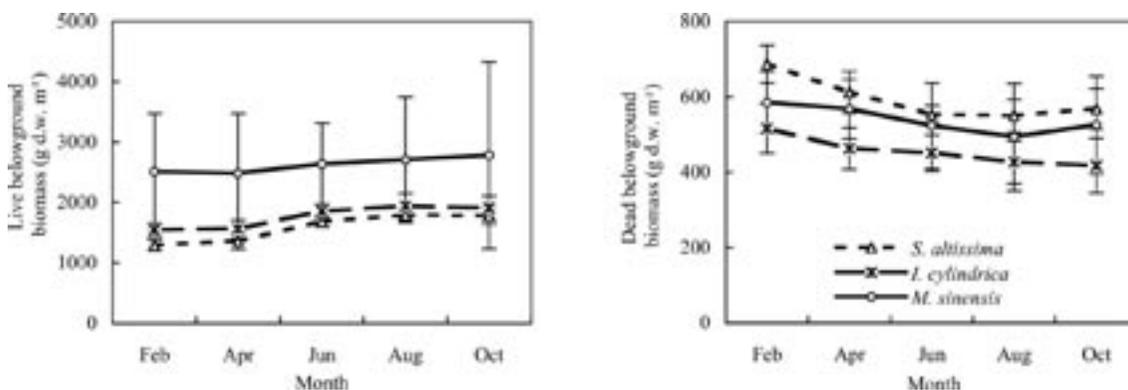
2003 年におけるセイタカアワダチソウ優占区、

ススキ優占区及びチガヤ優占区における地下部バイオマス (生存部と枯死部) の季節変化を第 1 表と第 1 図に示す。

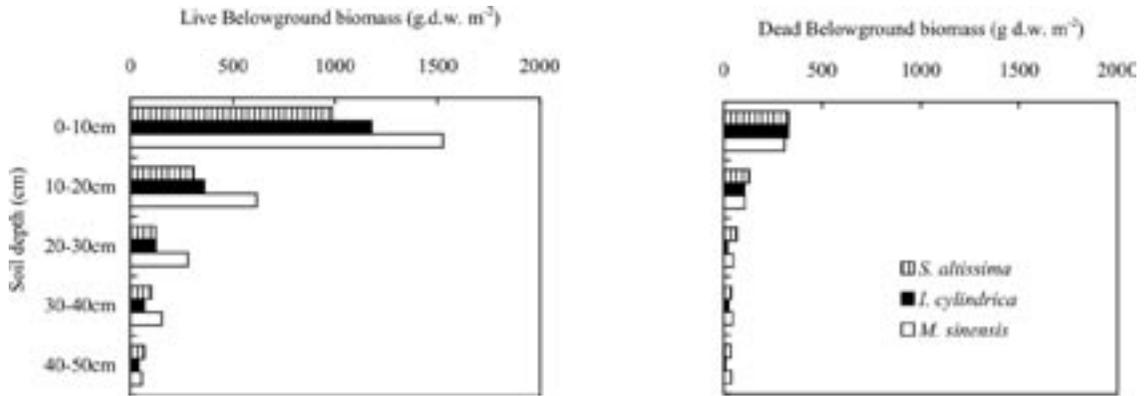
生存部バイオマスは、すべての調査区において春から秋にかけてやや増加する傾向が認められた。セイタカアワダチソウ優占区における生存部バイオマスは 2 月調査の 1290.4 g d.w. m<sup>-2</sup> から、10 月の 1778.2 g d.w. m<sup>-2</sup> までに増加し、年間平均 1580.7 g d.w. m<sup>-2</sup> であった。ススキ優占区においては 2 月の 2509.2 g d.w. m<sup>-2</sup> から、10 月の 2782.0 g d.w. m<sup>-2</sup> になって、年間平均 2624.9 g d.w. m<sup>-2</sup> であった。チガヤ優占区においては 2 月の 1544.9 g d.w. m<sup>-2</sup> から、10 月の 1905.2 g d.w. m<sup>-2</sup> になって、年間平均 1762.1 g d.w. m<sup>-2</sup>

第 1 表 セイタカアワダチソウ (*Solidago altissima*), チガヤ (*Imperata cylindrica*) およびススキ (*Miscanthus sinensis*) 優占区における 2003 年の地下部バイオマスの季節変化

Vegetation type		Belowground Biomass(BB) (g d.w. m <sup>-2</sup> )					Average	Aboveground biomass (AB) (g d.w. m <sup>-2</sup> )	BB/AB
		Feb	Apr	Jun	Aug	Oct			
<i>S. altissima</i> (C3)	Live	1290.4	1359.6	1684.8	1790.4	1778.2	1580.7	629.2	2.5
	Dead	686.1	612.3	552.9	549.3	567.9	593.7		
<i>I. Cylindrica</i> (C4)	Live	1544.9	1562.7	1854.8	1943.1	1905.2	1762.1	481.6	3.7
	Dead	515.8	462.6	450.8	426.1	417.0	454.4		
<i>M. sinensis</i> (C4)	Live	2509.2	2484.8	2637.7	2711.2	2782.0	2624.9	952.5	2.8
	Dead	584.9	567.3	523.4	492.9	524.9	538.7		



第 1 図 セイタカアワダチソウ (*Solidago altissima*), チガヤ (*Imperata cylindrica*) およびススキ (*Miscanthus sinensis*) 優占区における 2003 年の地下部バイオマスの季節変化  
左: 地下部バイオマス (live); 右: 地下部バイオマス (dead); エラーバーは標準偏差を示す。



第2図 セイタカアワダチソウ (*S. altissima*), チガヤ (*I. cylindrica*) およびススキ (*M. sinensis*) 優占区における地下部バイオマス (B-biomass) の垂直分布  
 左: 地下部バイオマス (live); 右: 地下部バイオマス (dead)

であった。ススキ優占区における年間平均の生存部バイオマスは、チガヤ、セイタカアワダチソウ優占区との有意差が認められたが、チガヤとセイタカアワダチソウ優占区の間では有意差が認められなかった。

枯死部バイオマスは、各優占区において春から秋にかけてやや減少する傾向が認められた。月当たり枯死部バイオマスの最小値は、セイタカアワダチソウ優占区においては8月の549.3 g d.w. m<sup>-2</sup>で、ススキ優占区においては8月の492.9 g d.w. m<sup>-2</sup>で、チガヤ優占区においては9月の417.0 g d.w. m<sup>-2</sup>であった。年間平均値ではセイタカアワダチソウ優占区において593.7 g d.w. m<sup>-2</sup>、ススキ優占区において538.7 g d.w. m<sup>-2</sup>、チガヤ優占区においては456.4 g d.w. m<sup>-2</sup>であった。枯死部バイオマスの年間平均値についてはセイタカアワダチソウ優占区>ススキ優占区>チガヤ優占区であり、各優占区間に有意差が認められた。

## 2. 地下部バイオマスの土壌層位における分布様式

第2図に生存部、枯死部バイオマスの垂直分布を示す。各優占区ではいずれも表層の0~10 cmにバイオマスのピークがあった。約60%以上の生存部バイオマスが表層(0~10 cm)から深さ

50 cmまでに分布していた(チガヤ、ススキ、セイタカアワダチソウ優占区においてそれぞれ66.8%、58.1%および62.3%であった)。また、55%以上の枯死部バイオマスが表層(0~10 cm)から深さ50 cmまでに分布していた(チガヤ、ススキ、セイタカアワダチソウ優占区においてそれぞれ71.2%、57.0%および55.0%であった)。地下部バイオマスは土壌表層から深層に向かうにしたがって指数関数的に減少することがよく知られ、本研究草原サイトでは以下の式が得られた。

$$Y_{ls} = 329.2e^{-0.8071X} \quad R^2 = 0.9952$$

$$Y_{lc} = 2201.9e^{-0.8613X} \quad R^2 = 0.9725$$

$$Y_{la} = 1329.5e^{-0.6485X} \quad R^2 = 0.9086$$

$$Y_{ds} = 356.1e^{-0.5196X} \quad R^2 = 0.8519$$

$$Y_{dc} = 643.1e^{-0.9926X} \quad R^2 = 0.8200$$

$$Y_{da} = 463.8e^{-0.5908X} \quad R^2 = 0.9360$$

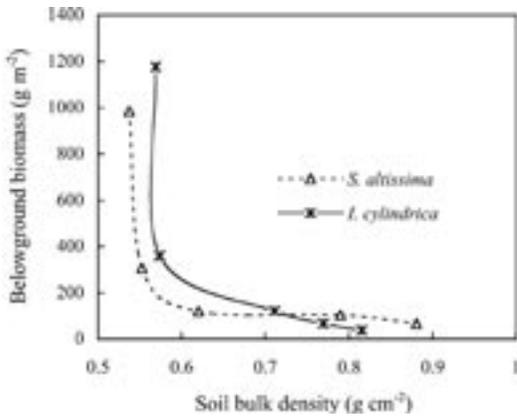
ここで、Yは土壌層位のバイオマス(g d.w. m<sup>-2</sup>)、

lは生存部地下部, dは枯死部地下部, sはチガヤ優占区, cはススキ優占区, aはセイタカアワダチソウ優占区, Xは土壌深さ(10 cm)を表す。

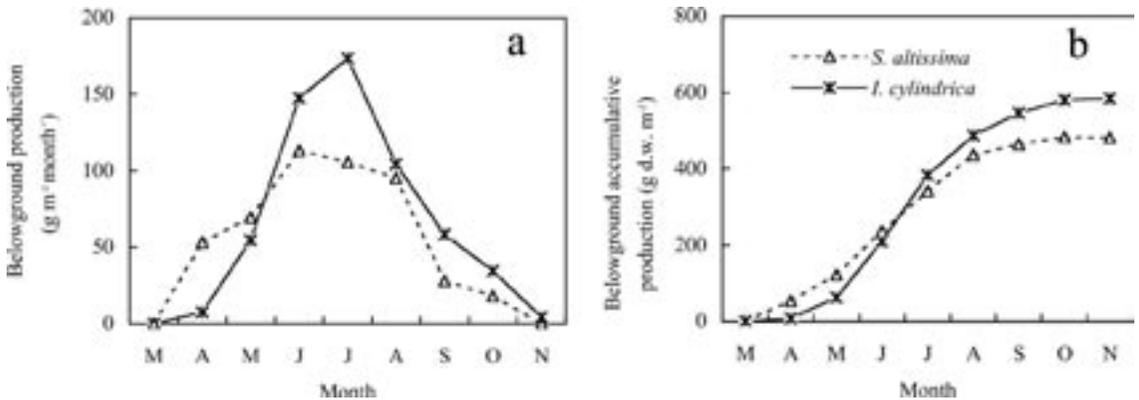
第3図に地下部バイオマスと土壌容積重の関係を示す。容積重が大きいほど地下部バイオマスが小さいという傾向が見られた。

### 3. 地下部成長量の季節変化

2003年の各優占区における地下部成長量および積算成長量を第4図に示す。すべての優占区において春から夏にかけて地下部成長量は増加



第3図 セイタカアワダチソウ (*S. altissima*) およびチガヤ (*I. cylindrica*) 優占区における地下部バイオマスと土壌容積重の関係



第4図 セイタカアワダチソウ (*S. altissima*) およびチガヤ (*I. cylindrica*) 優占区における地下部成長量の季節動態

する傾向が認められた。セイタカアワダチソウ優占区では6月に地下部成長量のピークを迎え、チガヤ優占区においては7月に地下部成長量のピークに達した。したがって、地下部成長量の最大値はセイタカアワダチソウ優占区では6月の  $113.1 \text{ g d.w. m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ , チガヤ優占区では7月の  $173.4 \text{ g d.w. m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ であった。

また、C3植物であるセイタカアワダチソウの優占区においては地下部成長量は初春から初夏にかけてよく増加し、C4植物であるチガヤの優占区は夏によく増加していた。地下部成長量のC3/C4逆転時期(C3優占区(セイタカアワダチソウ優占区)およびC4優占区(チガヤ優占区)における地下部成長量が同じ値となった時期を指す)は6月11日であった。積算地下部成長量は、春先ではセイタカアワダチソウ優占区がチガヤ優占区より高く、真夏ではほぼ同じ値に達し、夏から秋にかけてチガヤ優占区の方が高かった。積算地下部成長量のC3/C4逆転時期は7月11日であった。

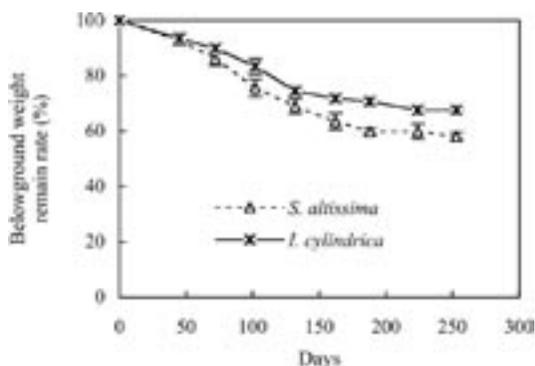
4月から10月かけての生長期間における積算地下部成長量はチガヤ優占区では  $584.1 \pm 32.4 \text{ g d.w. m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ , セイタカアワダチソウ優占区では  $481.7 \pm 37.1 \text{ g d.w. m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ , 両者の間10%水準で有意差が認められた。ススキ優占区において

11月のみイングロスコアを回収したところ、地下部成長量は  $875.1 \pm 467.8 \text{ g d.w. m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  と推定された。しかし、パッチ状に分布するススキ群落の地下部成長量は空間的変動が大きく、検土丈法を用いた地下部成長量の推定は難しいと思われる。

#### 4. 地下部リターの初期分解速度

2003年における地下部リター分解の初期段階において地下部リターの重さの残存率を第5図に示した。地下部リターの重量は微生物の分解に伴って減少していくが、最初の月間重量減少速度は速く、その後徐々に遅くになった。地下部リターの重量の減少速度は次第に小さくなるのが一般的に知られている。リター分解実験が始まってから253日を経て（2003年3月から11月末まで）、セイタカアワダチソウの地下部リターの重量残存率は58.17%、チガヤの重量残存率は67.57%

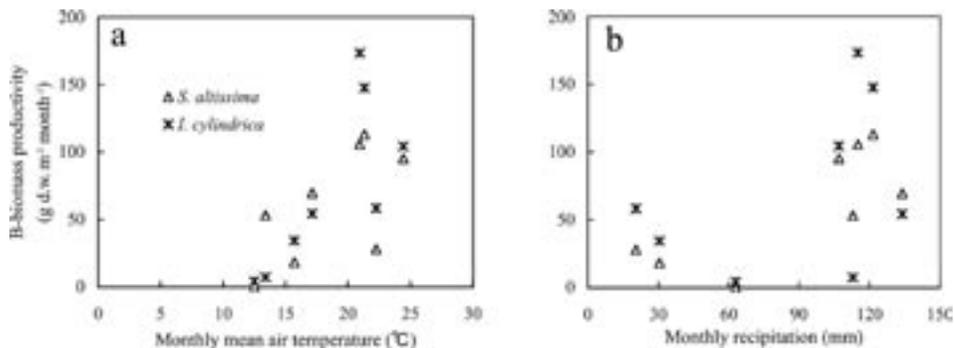
であり、1%水準で有意差が認められた。地下部リターの分解係数をOlsonの指数モデル（Olson, 1963）により計算した結果を第2表に示す。



第5図 セイタカアワダチソウ (*S. altissima*) およびチガヤ (*I. cylindrica*) 優占区における地下部リター残存率の時間推移 (リター分解初期)

第2表 Olson 指数モデルを用いた2003年における地下部リター分解率の推定  
*S. altissima*: セイタカアワダチソウ優占区; *I. Cylindrica*: チガヤ優占区

Vegetation type	Coefficient of decomposition	Model of decomposition	$R^2$	Day of 50%-decomposition	Day of 95%-decomposition	Annual composition rate (%)
<i>S. altissima</i> (C3)	0.0024	$Y = e^{-0.0024X}$	0.6951	289	1249	58.4
<i>I. cylindrica</i> (C4)	0.0018	$Y = e^{-0.0018X}$	0.9450	385	1665	48.2



第6図 セイタカアワダチソウ (*S. altissima*) およびチガヤ (*I. cylindrica*) 優占区における月あたり地下部成長量と月平均気温 (a) および月間降水量 (b) の関係

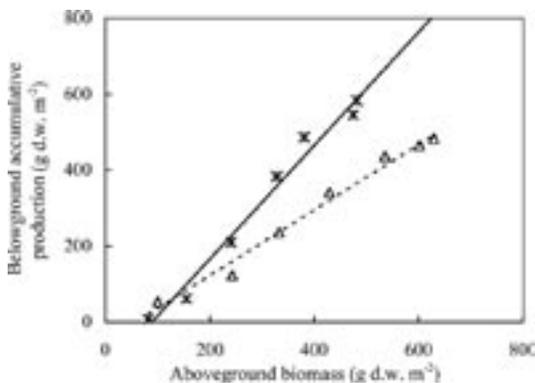
## IV 考察

### 1. 地下部成長量の季節変動と気象要素の関係

本研究の調査地となった C3/C4 混生草原の組成種はほとんど多年生草本であった（莫ほか，2003）。地下部バイオマスは光合成産物により地下部へ配分して，長年にわたって蓄積した量であると考えられる。2003 年における地下部バイオマスの季節変動と，気象要素との関係は見られなかった。一方，地下部成長量は明瞭な季節変化が見られた。第 6 図に 2003 年のセイタカアワダチソウ優占区およびチガヤ優占区における地下部成長量と気温および降水量との関係を示した。C3 植物のセイタカアワダチソウ (*S. altissima*) の地下部成長量は降水量への依存性が高く，有意な正相関 ( $r = 0.768$ ,  $p = 0.0232$ ) を示した。C4 植物のチガヤ (*I. cylindrica*) の地下部成長量は降水量 ( $r = 0.428$ ,  $p = 0.307$ ) と有意な相関が認められなかったが，気温 ( $r = 0.758$ ,  $p = 0.0265$ ) と有意な正の相関が認められた。

### 2. 地下部成長量と地上部バイオマスの関係

第 7 図に 2003 年におけるセイタカアワダチソウ優占区およびチガヤ優占区の地下部成長量と地



第 7 図 セイタカアワダチソウ (*S. altissima*) およびチガヤ (*I. cylindrica*) 優占区における積算地下部成長量と地上部バイオマスの関係

上部バイオマスとの関係を示した。積算地下部成長量は地上部バイオマスとの直線関係がよく認められ，地下部の成長は主に地上部の成長に依存することを示唆した。すなわち，春から地上部が先に増加し，その後地下部の成長量が増加すると考えられる。また，地下部年間成長量と地上部最大バイオマスを較べると，チガヤ区での地下部年間成長量は地上部最大バイオマスの 1.21 倍，セイタカアワダチソウ優占区では 0.77 倍となった。C4 植物であるチガヤの優占区では地下部へ配分する光合成産物比例が C3 植物であるセイタカアワダチソウ優占区より高かったことから，植物地上部と地下部での同化産物の配分比が光合成タイプによって変わることを示唆した。

### 3. 地下部リターの初期分解速度に与える影響要因

2003 年の地下部リター分解実験の初期においてセイタカアワダチソウの地下部リターの分解速度とチガヤの地下部リターの分解速度の違いが認められた。今までの研究 (Olson, 1963; Berg and Ekbohm, 1991) により，有機物の分解速度には主に有機物の性質 (リグニン濃度，ホロセルロース濃度，炭素率など)，環境要因 (温度，土壤水分など)，分解微生物 (種類とサイズなど) の三つの要因がかかわっている。本分解実験では土壤の性質と気象要素等は無差別と考えられ，また分解微生物はろ紙を用いた線維素の分解実験によってそれぞれ無差別を示唆しているため，セイタカアワダチソウ優占区とチガヤ優占区における地下部リターの初期分解速度に影響する要因は主に地下部リターの化学成分組成であると考えられる。今後，リター分解の速度と初期リターの化学性との関係について解明する必要がある。

## V まとめ

本研究の調査地である C3/C4 混生草原では，C3 植物であるセイタカアワダチソウの優占区におい

て、生存地下部バイオマスは  $1580.7 \text{ g d.w. m}^{-2}$ 、地下部の成長量は  $481.7 \text{ g d.w. m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、枯死地下部の蓄積量は  $593.7 \text{ g d.w. m}^{-2}$ 、地下部のリターフォールは  $483.6 \text{ g d.w. m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ であった。

C4植物であるチガヤの優占区では、生存地下部バイオマスは  $1762.1 \text{ g d.w. m}^{-2}$ 、地下部の成長量は  $584.1 \text{ g d.w. m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、枯死地下部の蓄積量は  $456.4 \text{ g d.w. m}^{-2}$ 、地下部のリターフォールは  $318.7 \text{ g d.w. m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ であった。

C4植物であるススキの優占区では、生存地下部バイオマスは  $2624.9 \text{ g d.w. m}^{-2}$ 、地下部の成長量は  $875.0 \text{ g d.w. m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、枯死地下部の蓄積量は  $538.7 \text{ g d.w. m}^{-2}$ 、地下部のリターフォールは  $351.7 \text{ g d.w. m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ であった。

2003年における地下部バイオマスおよび成長量は優占種によって大きく変動し、地下部の成長は主に地上部の成長に依存することが明らかになった。本草原サイトのように、地下部バイオマスに貯留されている炭素は、草原生態系において地上部バイオマス以上に重要なリザーバーとして機能していることを示唆した。

## 文献

- 井柁史彦・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 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.
- 国際連合食糧農業機関 (FAO) (2002)：世界森林白書。国際食糧農業協会, 95-118.
- 田中克季・及川武久 (1998)：水理実験センター内円形圃場における 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.
- 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.
- 莫文紅・井柁史彦・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.
- 濱田洋平・インドラ A. R. F.・田中正 (1998)：筑波大学水理実験センター内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性。筑波大学水理実験センター報告, **23**, 1-10.
- 横山智子・及川武久 (2000)：水理実験センター圃場における 1999 年の C3/C4 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.
- Berg, B. and Ekbohm, G. (1991): Litter mass-loss rates and decomposition patterns in some needle and leaf litter types. Long-term decomposition in a Scots pine forest VII. *Canadian Journal of Botany*, **69**, 1449-1456.
- Bledsoe, C. S., Fahey, T. J., Day, F. P. and Ruess, R. W. (1999): Measurement of Static Root Parameters: Biomass, Length and Distribution in the Soil Profile. In: Robertson *et al.* eds.: *Standard Soil Methods for Long-Term Ecological Research*. Oxford University Press, New York, USA, 424p.
- Olson, J. (1963): Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, **44**, 322-331.
- Scurlock, J. M. O. and Hall, D. O. (1998): The global carbon sink: a grassland perspective. *Change Biology*, **4**, 229-233.
- (2004年5月31日受付, 2004年9月8日受理)