

リモートセンシング実験でみられた水理実験 センター圃場の草地植生の季節変化

Seasonal Change of Grassland Vegetation Found in the Preliminary GLI Experiment in the Environmental Research Center

西田 顕郎*・樋口 篤志**

Kenlo Nishida and Atsushi Higuchi

As a step toward seasonal monitoring of vegetation development (phenology) from space, we investigated seasonal change of several biophysical properties (leaf area index [LAI], coverage of vegetation, chlorophyll density, canopy height, and C3/C4 composition) and some spectral vegetation indices (normalized difference vegetation index [NDVI] and red edge position [REP]) in an annual grassland. These biophysical properties changed in different ways with each other. In the growing period of grasses, coverage of vegetation was the first to achieve asymptotic maximum. LAI was the second, chlorophyll quantity was the third, and then canopy height was the latest to achieve its maximum. NDVI showed a similar behavior to vegetation coverage, rapidly increasing until early June. On the other hand, REP continued to increase from May until September with a temporal decrease in early May and a steady increase in August, which fairly corresponded to the behavior of leaf chlorophyll density. These characteristic seasonal change of the grassland should be useful knowledge for interpretation of land surface process of the grassland especially in use of remote-sensing. In this sense, multiple use of several kinds of optical quantities which can be captured by remote sensing might be useful.

I はじめに

1999年春から秋にかけて、水理実験センター円形圃場において、植生地の地表面過程のリモートセンシングに関する実験観測“PGLIERC” (Preliminary GLI Experiment in ERC; 樋口ら, 2000)を行った。

PGLIERCは、ADEOS II/GLIやTerra/MODISのような、新型の多バンド衛星センサーによる水文観測のためのアルゴリズム開発を目的としたものである。具体的には、圃場草地において、短波日射・光合成有効放射・キャノピー表面温度・土壌水分などの地上定点定常観測と、植生構造・分光反射特性・方向性反射特性 (BRDF) などの地上定期観測、そして30mタワー頂部からの可視画像・近赤外画像・熱画像・分光反射特性などの遠隔定期観測を行った。

本論文ではこれらの結果の中から、主に植生の量お

よび構造に関するデータを整理して提出し、遠隔定期観測の結果と比較考察した。

II 方法

水理実験センター円形圃場の中心から南東側に矩形領域を設け、そこに30箇所のコドラートを設置し、1999年4月から12月にかけてほぼ定期的に各コドラートで植被率と草丈を測り、LAIおよびクロロフィル量を推定した。一方で、30mタワー頂上からこの矩形領域の中央部の分光反射特性 (可視・近赤外反射スペクトル) をほぼ定期的に観測した。それ以外にも、各コドラートにおける地上分光反射特性観測や方向性反射特性 (BRDF) などを行った (これらの結果についてはこの論文では触れない)。表1に、各種項目の観測状況を概括する。

以下、草地植生の測定に関する詳細を述べる：

* NTSG, University of Montana

** IHAS, Nagoya University

表1 PGLIERC-1999のデータ収集状況

	30mタワーより							地上観測					備考
	可視 近赤外 ビデオ	熱画像	分光 射	反 可視画 像	パ ノ ラ マ 写 真	分光表面 反射温度	TRIME	草丈 率	植 被 率	BRDF	SPAD	草丈 LAI 曲線	
	草 地	松 林	草 地	松 林	草 地	松 林	草 地	5×6グリッド各点					
4/15	○	○			○	○	○	○	○		△	地表面要素の分光観測	
4/27	○	○			○	○	○	○	△	○	○		
5/3	○	○			○	○	○	○	△	○	○		
5/14	○	○			○	○	○	○	△		○		
5/23									△			PAN蒸発記録開始	
5/25									○				
5/30	○	○	○	○	○	○	○	○	▲		○		
5/31	○	○	○	○	○	○	○	○					
6/1									○	○	○	Campbell TDR4本増設	
6/5	○	○	○	○	○	○	○	○		○			
6/6									○	◎	○		
6/8	○	○	○	○		○	○			◎		Campbell TDR5本増設、再設置	
6/9											◎		
6/12	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
6/13											○	○	
6/21	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◎	○	○	BRDF、センサ狭視野角、 TRIMEは夕立後
7/1									○	○	○	散乱日射計設置	
7/2												常設TDRをTRIMEで校正	
7/7									○			常設TDR 3-3, 5-3再設置	
7/8									○	○		快晴	
7/31	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	集中観測、2時間おき	
8/2	◎	◎	◎	◎	◎	◎					◎	集中観測、2時間おき	
8/3											◎		
8/6											○		
8/16	○	○	○	○	○	○	○	○		○		バイオマス水分量を計測	
8/17	◎	◎	◎	◎	◎	◎						集中観測、2時間おき	
8/22											○		
8/31	△	△	△	△	△	△	○	○				薄くて不均一な雲	

○: 観測 ◎: 複数回観測 △: 部分的 (最低6箇所) 観測 ▲: 測器不調 VNIR: 可視・近赤外

表1 PGLIERC-1999のデータ収集状況 (つづき)

	30mタワーより								地上観測					備考			
	可視 近赤外 ビデオ		熱画像		分光 射		反 可視画 像		パ ノ ラ マ 写 真	分 光 反 射	表 面 温 度	TRIME	植 被 率		BRDF	SPAD	草 丈 LAI 曲 線
	草 地	松 林	草 地	松 林	草 地	松 林	草 地	松 林	草 地	5×6グリッド各点							
9/3																個葉の分光反射・透過測定	
9/4																	
9/13	○	○															
9/27	○	○	○	○					○	○	○					分光計なし	
10/4					○	○	○	○	○	○	○					葉の角度分布用写真撮影	
10/10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○					熱画像用GCP設置	
10/12															○		
10/21					○	○	○	○	○	○	○					花の分光反射もとった。	
10/29					○	○	○	○	○	○	○					葉の傾斜分布(セイタカ)測定	
11/6					○	○	○	○	○	○	○	△			○	△	草丈は3の列と6-6だけ
11/14					○	○	○	○	○	○	○						
12/7					○	○	○	○	○	○	○				○		

○: 観測 ◎: 複数回観測 △: 部分的(最低6箇所)観測 ▲: 測器不調 VNIR: 可視・近赤外

(1) コドラート

コドラートは図1に示すように40m×20mの矩形領域に30箇所設置した。各コドラートはビニールロープと杭で囲った0.5m×0.5mの正方領域である。このうち9箇所の地表面直下に土壌水分計(TDR; キャンベル社製CS615)が埋設してある。

(2) 植被率

植被率の計測には、デジタルカメラによるカラー画像を用いた。撮影は地上約1.5mから手持ちによって垂直下向きに行った。取得画像は640画素×480画素で、その視野は地表で約0.8m×0.6mの範囲である。従って地分解能は1~2mmであり、これは草地を構成する個々の葉よりも十分小さい。撮影時には直射光による葉面での鏡面反射を避けるために、よく晴れた日にはビニールシートで直射日光を遮って、天空からの散乱光だけが照明となるようにして撮影した。草丈が100cmを越える頃、手持ちによる垂直下向き写真撮影が難しくなり、また、上から目視しても地表面がほとんど見えない状態になったので、それ以上の植被率計測は意味がないと判断し、8月2日でこの計測を打ち切った。

撮影した画像は、計算機上で草地・影・裸地の3種類に判別し、草地画素数/(草地画素数+裸地画素数)を計算して植被率とした。草地と裸地の判別は教師付き分類によった。すなわち、画素を構成する赤・緑・青の各チャンネルの値からなる3次元状態空間で草地と裸地の分布を正規分布で近似し、最尤法で分類した。状態空間上の分布は、いくつかのサンプル画像について裸地および草地のトレーニングデータを取得して経験的に構成した。また、赤・緑・青の各画素の値がある閾値より低い場合は影とみなして、草地・裸地の判別から除外した。画像の色合いは撮影時の光条件によって変わるので、トレーニングデータは逐次更新した。これらの分類の作業はWindows98上でVisual Basic 6.0によって自作したプログラムで行った。

(3) 草丈

キャノピーの高さや、各植物種の占有率、LAI(後述)等を得るために、各コドラートで全草の草丈を計測もしくは推定した。双子葉植物のセイタカアワダチソウ(Solidago altissima; キク科)・ヨモギ(Artemisia princeps; キク科)・メドハギ(Lespedeza cuneata; マメ科)については、コドラ-

ト内の全株の高さを測定した。単子葉植物のススキ (*Miscanthus sinensis*; イネ科)・チガヤ (*Imperata cylindrica* var. *major*; イネ科) については、葉の数が多いため、各コードラートで、約 20 枚の葉を数え、それをもとに目視で得た占有率から総枚数を推定し、代表的な葉の長さを 2 段階で記載した。ただし、7 月 31 日まではススキとチガヤを区別して記載せず、ほとんどチガヤについて計測をしていた。その他の植物種 (ツクシなど) は無視した。

各コードラートにおける最高草丈を全コードラートで平均したものを、キャノピーの代表的な高さとした。

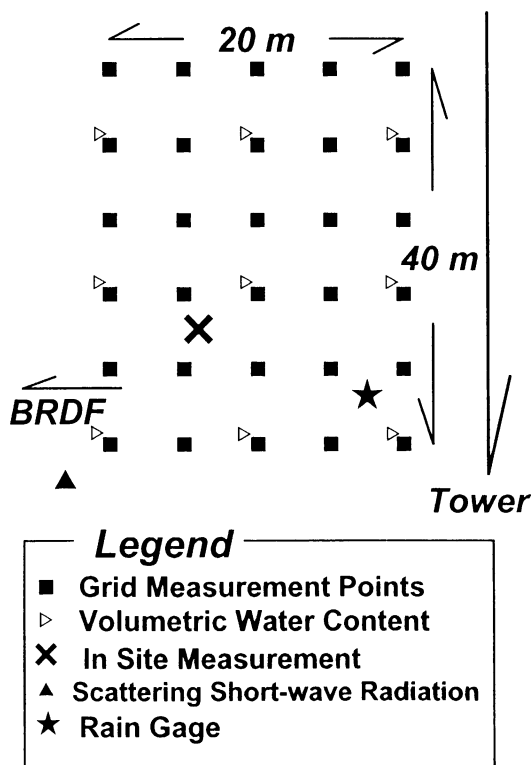


図1 水理実験センター円形圃場に設定したコードラート。図の下から上が南東(真北から114°)の方向。

(4) 葉面積指数(LAI)

本研究の目的のひとつが、草地の構造と光学特性の季節変化を明らかにすることであったので、コードラートの LAI 測定に刈り取り法(田中・及川, 1999)は採用できなかった。そのかわり、コードラート内の全草丈データから、経験的な草丈—葉面積関係を用いて LAI を推定した。すなわち、草地を構成する主要な植物種

であるセイタカアワダチソウ・ヨモギ・メドハギ・チガヤ・ススキのそれぞれについて、いくつかサンプルを採取し、草丈と葉面積を計測して、両者をべき関数で回帰して経験式を作った。これをコードラート内の全草に適用し、合計することで、各コードラート内の全草の総葉面積を求めた。サンプル採取は6月から10月にかけて5回行い、各回・各種につき3~5サンプルを採取・計測した。

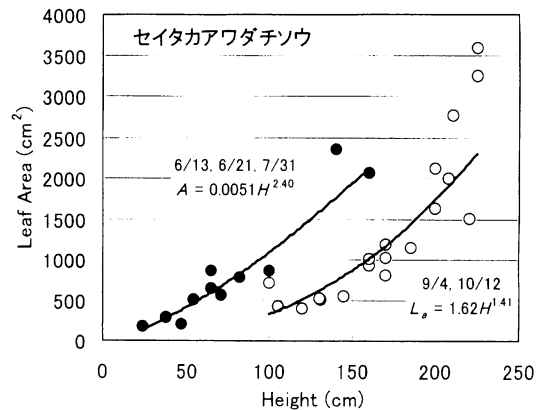


図2 草丈—葉面積較正曲線の例(セイタカアワダチソウ)。

セイタカアワダチソウは8月末から秋にかけて落葉し、夏までと秋以降で草丈—葉面積関係が変わるため、2本の経験式を作り(図2)、セイタカアワダチソウ以外の種類については5回の測定結果をまとめて経験式を作った。

以下に、作成した各経験式を示す：

セイタカアワダチソウ(夏まで)：

$$A = 0.0051H^{2.40} \quad (1)$$

セイタカアワダチソウ(秋以降)：

$$A = 1.6H^{1.41} \quad (2)$$

ヨモギ：

$$A = 0.15H^{1.94} \quad (3)$$

メドハギ：

$$A = 0.049H^{1.96} \quad (4)$$

ススキ：

$$A = 0.0016H^{2.66} \quad (5)$$

チガヤ：

$$A = 0.006H^{2.15} \quad (6)$$

ここで、 A は葉面積 (cm^2)、 H は草丈 (cm) を表す。なお、8月16日は(1)式と(2)式の遷移期間にあるとみなし、このときのLAI推定は(1)、(2)式の相乗平均を用いた。

この方法では、各植物種ごとのLAIが算出されるので、それらをもとに各植物種の占有率(全LAI中に各植物種が占める割合)も求めた。

(5) クロロフィル量

クロロフィル量の推定には、ミノルタ製葉緑素計 (SPAD-502) を用いた。SPAD-502は農林水産省農蚕園芸局農産課の土壤作物生育診断機器実用化事業 (Soil and Plant Analyzer Development; SPAD) で開発された装置であり、透過光による非破壊測定で葉の葉緑素量に高い相関をもつ指標値 (SPAD 値) を出力する (例えば只木・木下, 1988)。この計測は非常に簡便かつ迅速なので、大量の葉の計測に向いている。ここでは、セイタカアワダチソウ・ヨモギ・メドハギ・チガヤ・ススキについて、毎回各5~10株を選び、5~10箇所の葉で計測したSPAD値を平均して記録した。また、上記のように、7月31日まではススキをチガヤと区別せず、ほとんどがチガヤに関して測定していたので、ススキに関するデータは8月上旬から取りはじめた。

測定したSPAD値は、経験的な較正曲線によってクロロフィル葉密度 (単位葉面積あたりのクロロフィル a, b量; g/m^2) に換算した。一般に、SPAD値と葉のクロロフィル濃度の関係は植物種によって違うために、各植物種に応じた較正曲線を用意する必要がある。そこで10月18日に、主要な構成種であるセイタカアワダチソウ・チガヤ・ススキのそれぞれについて葉を採取し、SPAD値を測定した後に重量・葉面積を測定し、粉碎・アセトン抽出によるクロロフィル定量を行った。一方、ハギ・ヨモギその他はLAIに占める割合が低かったため、今回は測定していない。以下にクロロフィル定量の手順 (Lichtenthaler, 1987) を述べる。クロロフィル定量のための葉のサンプルは、なるべくSPAD値が異なる10~20 cm^2 (0.2~0.4g)の葉を各種につき5枚採取した。採取した葉は水理実験センターの実験室で電子天秤によって計量し、葉面積を測定した。その後、輸送中の光と熱による改変を避けるために各サンプルをアルミホイルで包んで氷箱に入れ、筑波大学農林工学系の水土保全実験室に運び、再度電子天秤によって計量したあと、順次、はさみで約1mm角に刻んで乳鉢に入れ、フェオフィチン化を避けるために

炭酸カルシウムを微量加え、石英砂を微量加えた後、100%アセトンを加えて粉碎した。粉碎物は50mlのメスフラスコに移し (このとき、ススキに関しては濾紙 [アドバンテック、5C] で濾過した)、さらにアセトンを加えて50ml溶液にした。葉の組織から色素を十分抽出するためにこのメスフラスコをよく振った後、冷蔵庫に約30分間安置した。その後、濾過を行わなかったチガヤ・セイタカアワダチソウについて、メスフラスコから約20mlの上澄み溶液を取りだし、遠心分離 (3600 rpm×10分間) を行った。濾過液もしくは遠心分離後の上澄み液を採取して光路10mmガラスセルに入れ、分光光度計 (HACH Company 製 DR/4000U) で470nm, 644.8nm, 661.6nm, 750nmの各波長について、100%アセトンとの吸光度差を測定した。750nmの吸光度差は、溶液の懸濁度の指標であり、それが0.005を超える場合は遠心分離が不十分であるとして、再度遠心分離を行い、吸光度差を測りなおした。こうして得られた吸光度から、100%アセトンを溶媒とする下記の式を用いて色素濃度を得た (Lichtenthaler, 1987)。

$$C_a = 11.24 A_{661.6} - 2.04 A_{644.8} \quad (7)$$

$$C_b = 20.13 A_{644.8} - 4.19 A_{661.6} \quad (8)$$

$$C_{a+b} = C_a + C_b \quad (9)$$

$$C_{x+c} = (1000 A_{470} - 1.90 C_a - 63.14 C_b) / 214 \quad (10)$$

ここで、 A は溶媒との吸光度差であり、その添字は波長(nm)である。 C_a 、 C_b 、 C_{a+b} 、 C_{x+c} は、それぞれ、クロロフィルa、クロロフィルb、クロロフィルaおよびb、そしてカロテノイドの、アセトン溶液中の濃度 (mg/l) である。これらの値と、最初に計測したサンプルの葉面積から、クロロフィル葉密度 (単位葉面積あたりのクロロフィルa, b量) CL (g/m^2) を求め、以下のようなSPAD値との較正曲線 (回帰直線) を得た (図3)：

セイタカアワダチソウ：

$$CL = 0.015 \text{ SPAD} - 0.153 \quad (11)$$

チガヤ：

$$CL = 0.021 \text{ SPAD} - 0.456 \quad (12)$$

ススキ：

$$CL = 0.016 \text{ SPAD} - 0.232 \quad (13)$$

こうして得た各時期のクロロフィル葉密度を直近のLAI測定結果にかけあわせ、地上クロロフィル量 (単位地表面積あたりの、草の葉内クロロフィルa, bの総

量； g/m^2)を得た。ここで、比較的少量であったヨモギ・ハギにはセイタカアワダチソウの校正曲線を流用した。

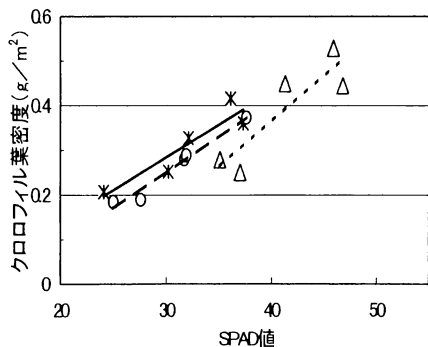


図3 SPAD値—クロロフィル葉密度校正曲線

△：ススキ，○：チガヤ，*：セイタカアワダチソウ

(6) 分光反射特性

草地キャノピーの分光反射特性は円形草地の中央にある30mタワーの頂部から観測した。この観測はSpectron Engineering社の分光放射計SE-590(計測波長範囲：396~1070nm，計測波長間隔：2.3~3.1nm，計測波長半値幅：10nm，オプションレンズによって視野角を15度に設定)によって行った。本論文で提出する計測結果はいずれも午前11時から午後1時の間に計測したものである。対象領域から観測場所(タワー頂部)への角度(天頂角)は60度である。測定は原則として晴天日に行った。地表面反射と白板反射を交互に計測し、前者を後者で規格化することで分光反射係数を得た。毎回の測定では3セットの分光反射係数を観測し(気象条件の悪いときは5回以上)、その平均を採用した。

得られた分光反射特性から、代表的な植生指標であるNDVI(Normalized Difference Vegetation Index；例えば，Asrar, 1989)とレッドエッジ位置(例えば西田ら，投稿中)を計算した。NDVIは可視・近赤外の2バンドの反射係数から計算されるが、ここでは可視反射係数として580~680nmの平均反射率を、近赤外反射係数として725~900nmの平均反射率を用いた。また、レッドエッジ(680から710nm付近にかけての反射率急増領域)付近の分光反射特性をInverse-Gaussian関数(Miller *et al.*, 1990)で近似し、その最急点(Inflexion Point)をレッドエッジ位置(Red Edge Position; REP)とした。

III 結果

観測結果を図4・図5・表2に示す。

植被率は4月上旬から増加し、7月初頭にはほぼ90%に達し、飽和した(図4a)。実際にはこれ以降しばらくは地表面のほぼ100%が覆われたが、データ上で100%に達していないのは画像の分類誤差の為である。現地観察によると植被率は10月下旬以降には100%を割って減少したと考えられる。LAIは6月上旬に1を越えて増加し、8月にピークに達した後、セイタカアワダチソウやメドハギの落葉のために減少して行った(図4a)。各植物種の占有率(LAI中にその種が占める割合)を見ると(図4b)、C3植物であるセイタカアワダチソウが春から秋にかけて減少し、かわりにC4植物であるススキ・チガヤが増加した。ところがこの結果を同時期に同じ草地内で刈り取り調査によって調べた結果と比較すると(横山，私信)、本研究では秋以降のC4植物(ススキ・チガヤ)の増加傾向が緩やかに観測されたことがわかった。これについては後で検討する。

クロロフィル葉密度(図4c)は5月初頭にいったん急減し、漸増するが6月下旬から7月にかけて減少し、以後は10月上旬まで増加してピークに達し、その後減少した。クロロフィル地上量(図4d；クロロフィル濃度とLAIの積)は7月にはほぼピークに達し、10月以降に急減した。8月から10月にかけて、落葉の為にLAIは減少したが(図4a)、クロロフィル葉密度(図4c)はそれを補償するように増加したため、クロロフィル地上量はこの間ほぼ一定であった。

草丈(キャノピーの高さ)は5月から順調に伸び、6月に最も速く伸び、LAIがピークに達した後も伸びつづけ、9月にピークに達した(図4d)。

図5には、タワー30mから観測した草地の分光植生指標の変化を示す。最もよく用いられる植生指標であるNDVI(Normalized Difference Vegetation Index)は、6月初頭までは急増するものの、それ以降はほとんど増加せず、9月初頭から減少する。従って、この草地においてはNDVIは春から夏にかけては植被率に似た変動を示し、LAIやクロロフィル量の初夏の増加には追従していない。一方、高波長分解能センサーで取得可能な植生指標であるレッドエッジ位置は、5月から9月まで増加を続ける。この変動パターンは、5月初頭の急減や、8月の順調な増加などの点で、クロロフィル葉密度の変動に似ている。

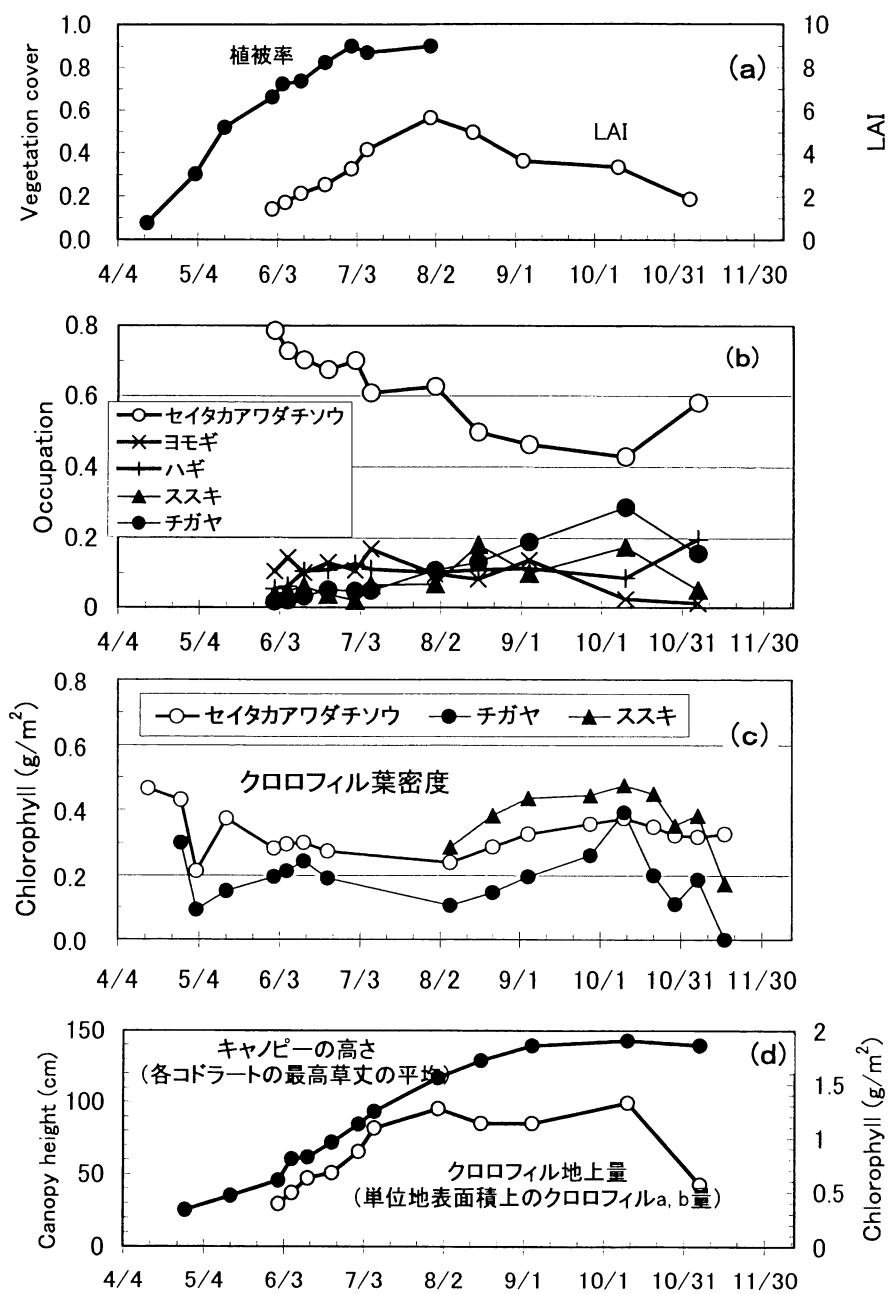


図4 草地植生の季節変化。(a): 植被率とLAI。(b): 各植物種の占有率。(c): 各植物のクロロフィル葉密度。(d): キャンピー高とクロロフィル地上量。

表2 草地植生に関する各量の変化 (PGLIERC-1999)

	植被率	LAI	キャノピー高 c m	クロロフィル葉密度			クロロフィル 地上量 g/m ²	NDVI	レッドエッジ位置 nm
				セイタカアワ ダチソウ g/m ²	チガヤ g/m ²	ススキ g/m ²			
4/15	0.08								
4/27			25	0.46	0.00			0.54 708.9	
5/3	0.30			0.21	0.09			0.55 707.4	
5/14	0.52		35	0.37	0.15			0.68 709.9	
5/30								0.78 709.7	
6/1	0.66	1.4	46	0.28	0.19		0.39		
6/5	0.72			0.29	0.21			0.82 712.0	
6/6		1.7	61				0.49		
6/12	0.74	2.1	62	0.30	0.24		0.63	0.82 711.8	
6/21	0.82	2.5	72	0.27	0.19		0.68	0.83 711.4	
7/1	0.90	3.3	85				0.87		
7/7	0.87	4.1	94				1.09		
7/31	0.90	5.6	117				1.27	0.86 713.1	
8/2								0.85 712.3	
8/6				0.24	0.10	0.28			
8/16		5.0	129				1.13	0.85 714.3	
8/17								0.85 713.8	
8/22				0.28	0.15	0.38			
8/31								0.85 715.2	
9/4		3.6	140	0.32	0.20	0.44	1.13		
9/27				0.36	0.26	0.44			
10/4								0.76 712.0	
10/10		3.4	143	0.37	0.39	0.47	1.33	0.72 711.5	
10/21				0.35	0.20	0.45		0.67 710.7	
10/29				0.32	0.11	0.35		0.66 709.1	
11/6		1.9	140	0.32	0.19	0.38	0.57	0.63 709.1	
11/14								0.55 708.3	
11/16				0.33	0.00	0.17			
12/7					0.00	0.01		0.34 701.0	

IV 考察

春から秋にかけての草地植物の状態量、すなわち植被率・LAI・草丈・クロロフィル葉密度・クロロフィル地上量のそれぞれは、互いに違ったタイミングで増減していた。それぞれがピークに達する時期は、植被率が最も早く、次いでLAI、クロロフィル量、クロロフィル密度、キャノピー高の順であった。このことからわかるように、草地の植生の挙動は多面的に観測して明らかにする必要がある。

次に、今回の観測における問題点を検討する。まず、

30箇所のコドラートを繰り返し測定したために、草地の中を歩いた跡ができてしまった。これはコドラート内の植生への影響は小さいと思われるが、タワー頂部からの分光観測の視野には乱れた草地が入ってしまう可能性がある。一方、30箇所のコドラートを計測する労力は多大である。コドラート間の植生状況に大きな差は見られなかったので、数をもっと減らして草地への攪乱を小さくするとともに、かわりに観測頻度を高めるほうが良かったと思われる。

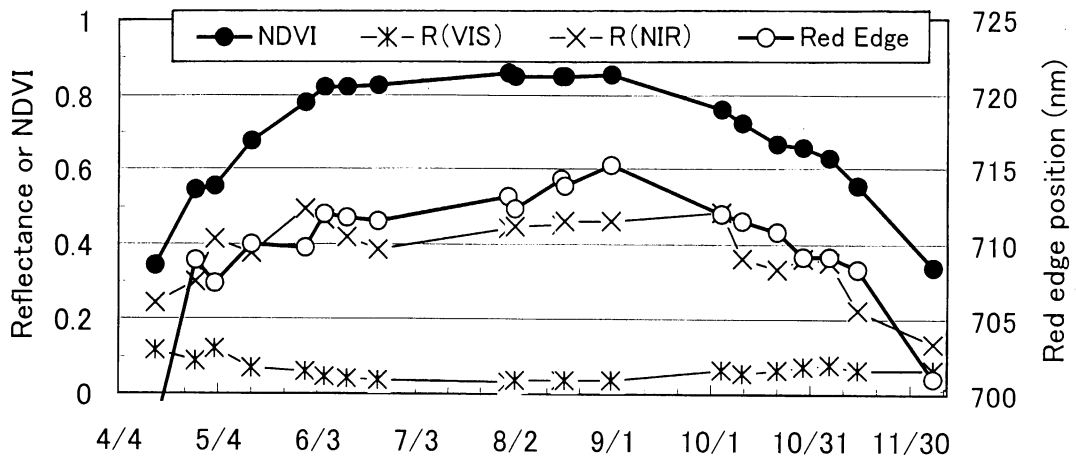


図5 草地植生の分光反射特性（可視・近赤外各1バンド）と植生指標（NDVIとレッドエッジ位置）
R(VIS)：可視光反射係数，R(NIR)：近赤外光反射係数

個々の観測項目については、まず、ススキ・チガヤの本数・草丈測定をもっと精密にする必要があったかもしれない。特に、夏以降はこれらのC4植物がセイタカアワダチソウなどのC3植物にかわって草地に優占することが知られているが（田中・及川，1999），前述したように、本研究ではC4植物の増加傾向が緩やかに出ており、測定誤差の影響が考えられる。夏以降のC4植物の測定には注意すべきであろう。

草丈—LAI曲線については、特に季節変化が大きいセイタカアワダチソウに関して、測定頻度・個体数を増やすべきである（例えば月1回程度の頻度で、各回約10サンプル以上）。

植被率に関しては、8月以降に草丈が人の背丈を越えたので打ち切ったが、10月以降に落葉の為に地表面が見え始める状況をなんとか捉えることが必要だろう。このことにも関係するが、草丈の伸長に対応して撮影高度を十分に確保することも課題である。

クロロフィル量に関しては、SPAD計での測定は手間が少ない上に有効なのでもっと頻繁にすべきであった。特に7月のほぼ1ヶ月の欠測は避けるべきであった。また、SPAD値の較正曲線も、今回は10月にまとめて作成したが、2～3ヶ月ごとに作成して季節変化の影響を把握する必要があったかもしれない。また、ススキのSPAD値較正曲線が他の種の較正曲線から離れているが、これについては色素抽出アセトン溶液を遠心分離するかわりに濾紙で濾過したとき濾紙に色素が吸着することによることが誤差要因になった可能性がある。今後は遠心分離器で統一的に処理する必要がある。

また全般的に、春の観測開始が遅すぎた。これは観測方法の確立に手間取った為だが、特にLAIに関しては、遅くとも5月上旬から安定したデータを得るべきであった。

今後追加したほうが良い測定項目として、植物体内の水分の観測と、草丈—地上バイオマスの較正曲線の作成が挙げられる。前者は刈り取りが必要なので分光反射特性観測の対象領域で実施することは難しいが、近接した場所に刈り取り用のコドラートを作ると良いと考えられる。後者は草丈—葉面積曲線を作成するときに処理が終わった試料を計量・絶乾すればよいので、難しくはないだろう。

謝辞

本研究に当たり、計測を手伝って下さった飯田真一氏・新村典子博士ほか水理実験センターの各氏および、貴重な助言を下さった及川武久教授・横山智子氏に感謝致します。

参考文献

- 只木良也・木下真実子（1988）．葉緑素計SPAD-501を用いて測定した樹木の葉のクロロフィル濃度，日本林学会誌，70，488-490。
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.
- 西田顕郎・小杉緑子・大手信人 (2000) : 樹木単葉の分光反射特性と光合成速度および水分欠乏との関係, 日本リモートセンシング学会誌, **20**(3), 6-16.
- 樋口篤志・西田顕郎・飯田真一・新村典子・近藤昭彦 (2000) : PGLIERC (Preliminary Global Imager experiment at Environmental Research Center); その概要について. 日本水文科学会誌, **30**, 81-91.
- Asrar, G. Ed. (1989) : *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*. Wiley, New York.
- Lichtenthaler, H. K. (1987) : Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, No. 148, 350-382.
- Miller, J. R., Hare, E. W., and Wu, J. (1990) : Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance 1. An inverted-Gaussian reflectance model. *International Journal of Remote Sensing*, 11(10), 1755-1773.