

草原の季節変動と年々変動に関する デジタルカメラを用いた長期連続自動観測

Long-term Observation of Seasonal and Yearly Variation of Grassland by
an Automatic Digital Camera

秋津 朋子^{*}・奈佐原 顕郎^{*}・野田 響^{*}・本岡 毅^{**}・
村上 和隆^{*}・土田 聡^{***}・永井 信^{****}

Tomoko AKITSU^{*}, Kenlo Nishida NASAHARA^{*}, Hibiki NODA^{*}, Takeshi MOTOHKA^{**},
Kazutaka MURAKAMI^{*}, Satoshi TSUCHIDA^{***} and Shin NAGAI^{****}

I はじめに

筑波大学陸域環境研究センター(以降, TERCと記述)内にある草原の円形圃場では, 地表面と大気との熱・水・炭素フラックスの収支を高精度に評価するために, 微気象観測が長期連続的に行われている(小谷・杉田, 2003; 渡来ほか, 2006; <http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/databasehtml/database>). 植物は, 蒸発散・光合成・生態系呼吸等を通してこれらのフラックスに寄与するため, 植生の現存量や種組成の把握が重要である. さらに, 植物は季節の移り変わりにともなう生物活動や状態の変化をみせることから, 植生の季節・経年的な変化(フェノロジー)を長期連続的に毎日観測することは重要な課題のひとつとなる(Baldocchi *et al.*, 2005). しかしながら, TERCでは, バイオマス(現存量), 草丈, 葉面積指数(LAI), 写真, 草原の構成種やその分布に関する調査は不定期に行われるに留まって

いる(西田・樋口, 2000; 横山・及川, 2001; 井楨ほか, 2002; 莫ほか, 2003; 濱田, 2008). そこで我々はデジタルカメラを用いて草原を毎日自動撮影することによって, 過去7年間にわたる草原の季節・経年的な変動を調査した. 本研究の目的は, TERCにおける基礎観測データのひとつとして, 微気象観測データに加えて, 草原のフェノロジー画像を新たに提供することである.

II 方法

1. 対象場所と解析期間

本研究の対象は, TERC内(北緯36度05分, 東経140度06分, 海拔27 m)にある草原の円形圃場(直径160 m)の中心にある実験観測塔から南へ24 m離れた場所である(第1図-a). 1982年から2001年の年平均気温は14.1℃, 年平均降水量は1207 mmである(莫ほか, 2003). 主な構成種は, C₃植物であるセイタカアワダチ

^{*} 筑波大学大学院・生命環境科学研究科

^{**} 宇宙航空研究開発機構・地球観測研究センター

^{***} 産業技術総合研究所・情報技術研究部門

^{****} 海洋研究開発機構・地球環境変動領域

ソウ (*Solidago altissima*), ヨモギ (*Artemisia princeps*), メドハギ (*Lespedeza cuneata*) と, C4 植物であるチガヤ (*Imperata cylindrica*), メリケンカルカヤ (*Audropogon virginicus*), ススキ (*Miscanthus sinensis*) である (井桁ほか, 2002). その他, クズ (*Pueraria lobata*) が生育している.

解析期間は 2004 年から 2010 年までの 7 年間である. この圃場全体では, 2004 年には DOY = 350 日ごろに 1 回, それ以外の年は, DOY = 180 ~ 210 日ごろ (夏) と DOY = 290 ~ 325 日ごろ (秋) にかけて計 2 回, 草刈が行われた. DOY は 1 月 1 日を 1 日目としたときの通算日である. ただし, 2008 年には対象場所付近における草刈は夏と秋ともに行われなかった.

2. 観測データ

草原のフェノロジーを観測するために, 鉄骨構造物 (通称: ヤグラ) の上部, 高さ 2.9 m の位置に, 以下の部品から構成されるカメラシステム (automatic digital fisheye camera: ADFC; 土田ほか, 2005) を鉛直下向きに設置した (第 1 図 - b と c).

- デジタルカメラ (Nikon 製 COOLPIX4500)
- 魚眼レンズ (Nikon 製 FC-E8)
- 防水ケース (早坂理工製 SPC31A)

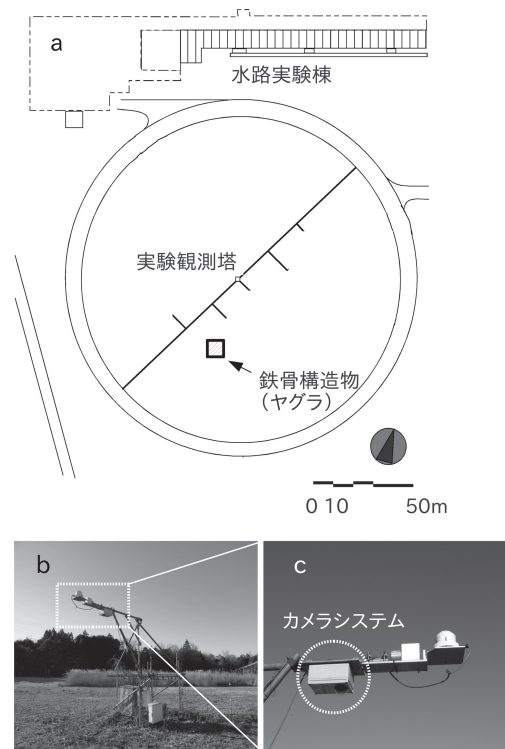
デジタルカメラはフリーソフトである Photopc (<http://photopc.sourceforge.net/>) を用いて, ヤグラ基部に設置した物置内の PC (OS: Windows 2000) で制御した. 毎日, 日中 (7:30 から 16:30 まで) 90 分毎に計 7 回撮影した. ホワイトバランスは曇り, 露出はオート, 画像解像度は 2272 × 1074 ピクセルに各々設定した. 画像は JPEG 形式で保存した. 画像のフットプリントはヤグラを中心とする半径約 10 m の円内であった. 本研究では, 太陽の入射角による影響をできる限り避けるために, 正午に撮影した画像もしくは, 正午に最も近い時刻に撮影された画像を使用

した. 欠測や画像の品質が悪いものについてはそれに近い別の時刻に撮影された写真を使用した. 本研究では, 画像の余白を切り取り, さらに 600 × 600 ピクセルに縮小したものを使用した.

画像データは Phenological Eyes Network (PEN; 土田ほか, 2005) によって取得管理され, インターネット上で公開されている (<http://www.pheno-eye.org>).

3. 解析方法

はじめに, 毎日の画像を目視観察し, クズ, ススキ, セイタカアワダチソウのフェノロジーやイベント (積雪・出芽・展葉・出穂・開花・地上部の枯死・草刈等) を判別した. さらに, 画像解析範囲内で 3 割以上の面積を占めた種を主な構成種



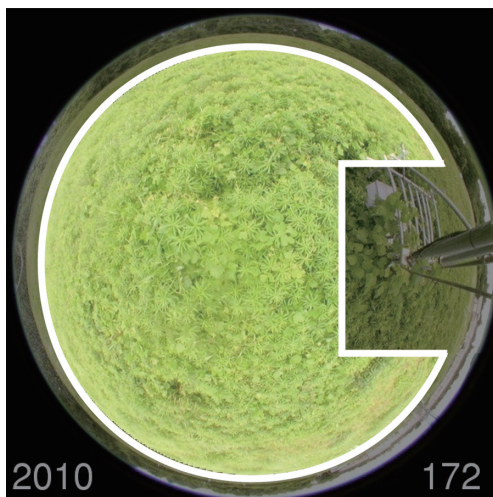
第 1 図 対象場所
a: 鉄骨構造物 (通称ヤグラ) の位置, b: ヤグラ, c: カメラシステム

とした。

つぎに、上述の目視観察の結果と、カメラ画像から抽出した赤・緑・青のデジタルナンバー（RGB 値）の時系列変化の対応関係を調査することによって、RGB 値に着目した解析手法（e.g., Richardson *et al.*, 2007）の有用性を検討した。本研究では、Green excess index（2G_RBi : Woebbecke *et al.*, 1995 ; Richardson *et al.*, 2007）を用いて時系列的に季節・経年変化を調査した。2G_RBi は展葉や落葉のフェノロジーを RGB の個々の値よりも高精度に検出することが可能な指標である。さらには、2G_RBi 値から展葉日とピーク日を検出し、その経年変化を調査した。2G_RBi 値は式（1）で定義される。

$$2G_RBi = (G-R) + (G-B) \quad (1)$$

本研究では、圃場周辺の樹木の写り込みやヤグラの影響を避けるために、第 2 図の太線で囲まれるエリアを解析対象とし、その範囲内における 2G_RBi の平均値を毎日求めた。各年において、2G_RBi が初めて 50 を上回った日を展葉日と定義した。



第 2 図 画像解析範囲

III 結果

目視観察の結果を第 1 表に示す。観測を行った年における全体的な傾向は次のようであった：DOY = 110 ~ 125 日ごろ出芽、DOY = 125 ~ 145 日ごろ、地表面は草本で完全に被覆された。DOY = 175 ~ 230 日ごろ、クズがキャノピー上部に出現した。ただし、2009、2010 年は生育期初めからクズが出現した。夏の草刈を行わなかった年（2004、2008 年）を除き、夏の草刈から約 20 日後に、残された根や地下茎から新たなシュートが出芽し、さらに、10 ~ 15 日後に地面は草本で完全に再被覆された。DOY = 260 ~ 270 日ごろ、ススキが出穂した。DOY = 270 ~ 300 日ごろ、セイタカワダチソウが開花した。DOY = 290 ~ 330 日ごろ、クズの地上部が枯死した。

2G_RBi 値の季節変化パターンを第 3 図に示す。観測を行った年における全体的な傾向は次のようであった：DOY = 1 ~ 110 日ごろ、ほぼ一定の値（= 0）を示した。DOY = 110 日から 150 日にかけて増加した。夏の草刈を行わなかった年（2004、2008 年）を除き、夏の草刈直後に、0 まで急激に減少した。2G_RBi は、その約 10 日後から増加しはじめ、その後さらに、約 20 日間に渡り増加しつづけて、草刈から 30 ~ 35 日後には草刈前の水準まで回復した。秋の草刈を行った年（2005、2006、2007、2009、2010 年）では、草刈直後に、0 まで急激に減少した。それ以外の年（2004、2008 年）では、DOY = 250 日から 350 日にかけて徐々に 0 まで減少した。

2G_RBi 値によって検出した展葉日とピーク日を目視観察による出芽日と共に第 2 表に示す。2G_RBi 値によって検出した展葉日は、2007 年が最も早い DOY = 115 日、2009 年が最も遅い DOY = 133 日であった。ピーク日は、2008 年が最も早い DOY = 140 日、2009 年が最も遅い DOY = 160 日であった。平均的な展葉日は DOY = 124 日でピーク日は DOY = 150 日であった。

第1表 目視観察による草原のフェノロジー

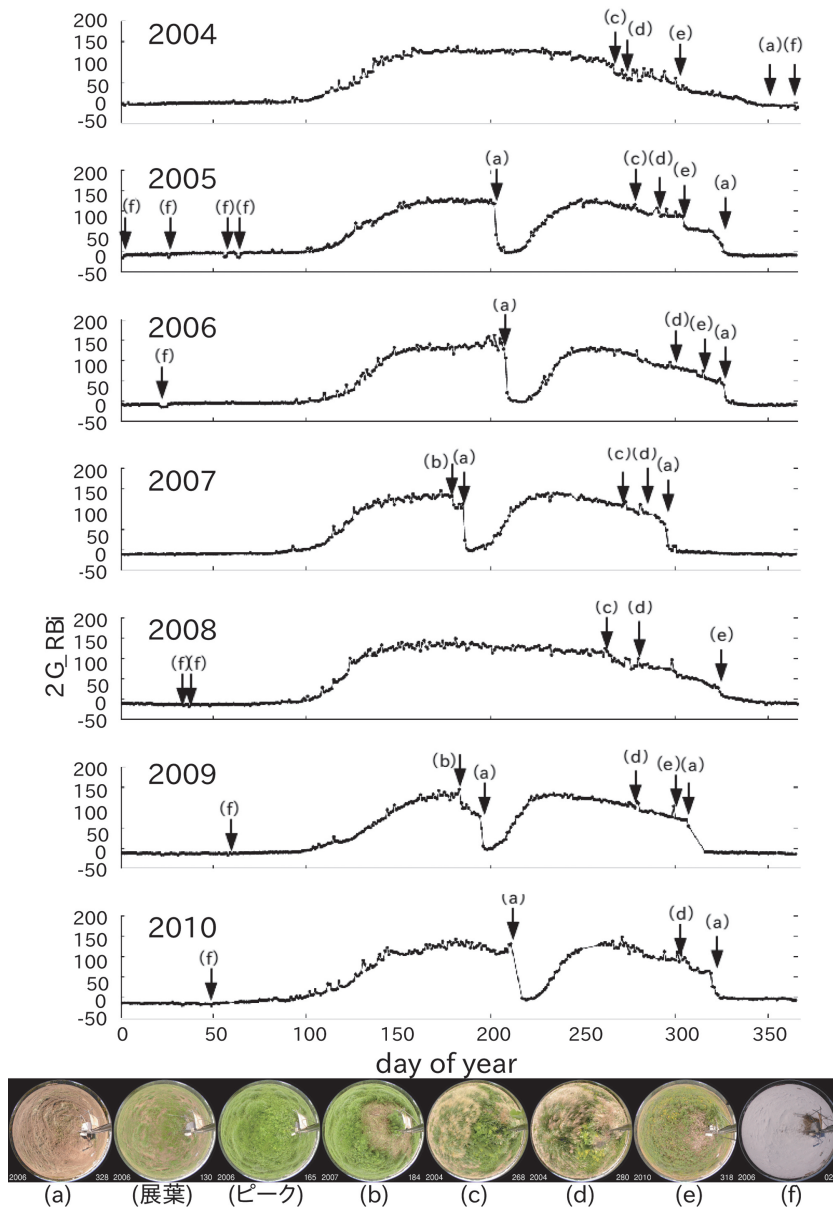
年	DOY	出来事	主な構成種	年	DOY	出来事	主な構成種
2004	3-4	欠測		113	出芽		
	110	出芽		126	草本により地表面全体が	M, S	
	137	草本により地表面全体が	M, S		ほぼ覆われた		
	230	クズ出現		175	クズ上面に出現	M, S	
	257	ススキ出穂		180	ヤグラ直近の草刈		
	267	セイタカアワダチソウ開花		186	全面草刈		
	291	欠測		206	出芽		
	302	クズ地上部枯死		207	219	草本により地表面全体が	M, S, P
	351	ヤグラ直近の草刈			ほぼ覆われた		
	352	全面草刈		245-246	欠測		
2005	363	ヤグラ直近の草刈		273	ススキ出穂		
	365	積雪		286-287	欠測		
	1	積雪		290	セイタカアワダチソウ開花		
	26	積雪		291	ヤグラ直近の草刈		
	56-57	積雪		296	全面草刈		
	61	積雪		34	積雪		
	63-64	積雪		37	積雪		
	119	出芽		115	出芽		
	145	草本により地表面全体が	M, S	124	草本により地表面全体が	M, S	
		ほぼ覆われた			ほぼ覆われた		
2006	184	クズ出現	M, S	189	クズ出現		
	203	全面草刈		198	ヤグラ周辺部を残して草刈		
	204	ヤグラ直近の草刈		258	ススキ出穂		
	224	出芽		279	セイタカアワダチソウ開花		
	241	草本により地表面全体が	M, S, P	301	ヤグラ周辺部を残して草刈		
		ほぼ覆われた		324	クズ地上部枯死		
	277	ススキ出穂		58	積雪		
	289	欠測		115	出芽		
	293	セイタカアワダチソウ開花		144	草本により地表面全体が	S, P	
	305	クズ地上部枯死			ほぼ覆われた		
2007	324	ヤグラ直近の草刈		184	ヤグラ直近の草刈		
	326	全面草刈		189	欠測		
	21-25	積雪		196	全面草刈		
	126	出芽		212	出芽		
	139	草本により地表面全体が	M, S	219	草本により地表面全体が		
		ほぼ覆われた			ほぼ覆われた		
	179	クズ上面に出現	M, S	278	セイタカアワダチソウ開花		
	192-207	クズがカメラ画面を覆う		289	クズ地上部枯死 (一部)		
	208	ヤグラ直近の草刈		290-291	欠測		
	209	全面草刈		292	ヤグラ周辺部を残して草刈		
2008	228	出芽		298	クズ地上部枯死	S	
	242	草本により地表面全体が	M, S, P	308-316	欠測、この間に全面草刈		
		ほぼ覆われた		49	積雪		
	283	欠測		60-61	欠測		
	284	カメラ西方の植物が枯死		81	欠測		
	287	欠測		110	出芽		
	299	セイタカアワダチソウ開花		135	草本により地表面全体が	S, P	
	312	クズ地上部枯死	M, S		ほぼ覆われた		
	326	ヤグラ直近の草刈		212-216	欠測、この間に全面草刈		
	327	全面草刈		231	出芽		
2009				240	草本により地表面全体が	S, P	
					ほぼ覆われた		
				250-257	欠測		
				301	セイタカアワダチソウ開花		
				310	クズ地上部枯死	S	
				320	全面草刈		

注) DOY は1月1日を1日目としたときの通算日である。
主な構成種欄の M, S, P は、下の植物種を表す。

M: ススキ

S: セイタカアワダチソウ

P: クズ



第3図 Green excess Index (2G_RBi) の季節変化とその典型的な画像
 (a): 草刈, (b): ヤグラ周辺部の草刈, (c): ススキ出穂, (d): セイ
 タカアワダチソウ開花, (e): クズ地上部枯死, (f): 積雪

IV 考察

本研究の結果, (1) デジタルカメラによるフェ
 ノロジー観測は, 年毎によって異なる草原のフェ

ノロジーや, 主な構成種の違いを詳細に記録可能
 なこと, (2) 画像を数値時系列化することによっ
 て, 展葉・草刈・枯死のフェノロジーを定量的に
 検出可能なことが明らかになった.

第2表 目視観察による出芽日と2G_RBi値によって検出した展葉／ピーク日

Year	目視観察	2G_RBi	
	出芽日	展葉日	ピーク日
2004	110	118	155
2005	119	126	155
2006	126	130	150
2007	113	115	145
2008	115	120	140
2009	115	133	160
2010	110	127	145
平均	115.43	124.14	150.00
標準偏差	5.62	6.62	7.07

注) 1月1日を1日目としたときの通算日で表す。

年毎に異なる草原のフェノロジーや主な構成種の分布の違いの原因としては、気温・降水量・日射量等の気象要因の経年変化のみならず、草刈に起因した草地の光環境の変化が考えられる。Stewart *et al.* (2009) は、半自然草原における刈り取りや火入れなどの攪乱は、草原から森林植生への遷移の進行を止めるだけでなく、リターを取り除いて地表面近くの光環境を明るくすることによって、草原を構成する植物の成長を促しているのであろうと述べている。本圃場では、秋の草刈が行われなかった翌年にはススキの出現が目立たなくなったが、セイタカワダチソウやクズは、その影響を受けなかった(第1表)。これらは発芽に対する光特性や生活型の種ごとの違いによるものであろう。草刈による前年のリターの除去が翌年の光環境の改善を促し、この結果、ススキの新芽の成長が促進されていたと考えられる。これに対してセイタカワダチソウは、直立的に生育するために、秋の草刈が行われずに前年のリターで地表面が覆われた状態で春を迎えても、早期に前年のリターよりも高い位置に葉をつけることが可能であるため、また、つる性植物であるクズは、前年のリター残存の有無に関わらず、セイタカワダチソウ等の高茎草本を利用して生育中期以降に最も光環境が良いキャノピー上部に出現する生活型であるために、前年のリター残存は、生育の

重大な制限因子にはならなかったと考えられる。

RGB値に着目した解析手法によって展葉・草刈を検出可能な事実は、これらのイベントを多地点で経年的に評価可能であることを示唆する。Graham *et al.* (2010) や Ide and Oguma (2010) は、森林生態系において上述の手法の有用性を報告している。また、本圃場と同様な半自然草原は、かつて国土面積の10%を占めていたが、近年では農地開発や植生遷移、植林の結果、2～3%程度まで減少していることが報告されている(小路, 2003; Stewart *et al.*, 2009)。一方で、半自然草原は、二次林と並び、多くの動植物の生息地(ハビタット)として、重要な生態系として位置づけられている(環境省, 2007)。今後我々は、熱・水・炭素フラックスと併せて、草原を構成する植物のフェノロジーを多地点で自動撮影し、その結果得られた画像をRGB解析することによって、草原の物理的・生物学的環境に関する統合的な理解を促進させることが可能となるであろう。本研究では、カメラによる目視観察とRGB値を利用した2G_RBi値の季節変化パターンがほぼ一致することが示された。さらに、2G_RBi値の解析では目視観察では判別することが困難なピーク日を示すことができた。しかしながら、目視観察の出芽日と2G_RBi値の展葉日には違いが生じた(第2表)。2G_RBi値の展葉日はその閾値によって変動する。このように、この手法は展葉日として定義する閾値をいくつにするべきかという問題を有している。また、2G_RBi値の解析からは、年毎によって異なる草原の構成種の違いや、個々の草本に固有なフェノロジーを検出することはできなかった。この原因としては、草本は森林とは異なり、小さな個体がランダムに分布するため、仮に対象範囲を限定したとしても、そこに存在する複数の個体の平均的なフェノロジーを2G_RBi値がとらえてしまうためと考えられる。従って我々は、RGB解析に全てを委ねるのではなく、フェノロジー画像の目視観察も併用することが、

草原のフェノロジーを高精度に観測するために重要であると考えている。

今後我々は、TERCでの草原フェノロジー観測を継続的に行うだけではなく、本研究と同一の観測システムが導入されている筑波大学菅平高原実験センター内の草原での観測結果 (<http://www.pheno-eye.org>) との比較を行い、地理的・気象的な生息環境と、草原の構成種やそのフェノロジーの対応関係について、普遍性や特異性を調査する予定である。

謝辞

本研究を行うに当たり、生命環境科学研究科の田中健太郎氏、川戸渉氏、陸域環境研究センターの各氏には、長期連続観測に関するご協力を頂きました。Phenological Eyes Network (PEN) の皆様には、データ取得管理に関するご協力を頂きました。本研究は、環境省地球環境研究総合推進費「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」(環境省)、日中韓フォーサイト事業「東アジア陸上生態系炭素動態－気候変動の相互作用解明を目指した研究教育拠点の構築」(日本学術振興会)、GCOM-CRA「総合的な陸域生態系情報の開発」(宇宙航空研究開発機構)によるご支援を頂きました。記して御礼申し上げます。

参考文献

井樹史彦・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.

環境省 (2007): 「第三次生物多様性国家戦略」環境省自然環境局自然環境計画課, 277p. (<http://www.biodic.go.jp/nbsap.html>).

小路 敦 (2003): 草地と景観生態学 野草地保全に向けた景観生態学的取り組み。日本草地学会誌, **48** (6), 557-563.

小谷亜由美・杉田倫明 (2003): 陸域環境研究センター気象観測塔における広域熱・水蒸気・CO₂フラックスの測定。筑波大学陸域環境研究センター報告, **4**, 103-108.

土田 聡・西田顕郎・岩男弘毅・川戸 渉・小熊宏之・岩崎 晃 (2005): Phenological Eyes Network－衛星による地球環境観測のための地上検証ネットワーク。日本リモートセンシング学会誌, **25** (3), 282-288.

西田顕郎・樋口篤志 (2000): 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。筑波大学陸域環境研究センター報告, **1**, 1-10.

濱田洋平 (2008): ススキ株の空間構造とその季節変化。筑波大学陸域環境研究センター報告, **9**, 29-34.

莫文紅・井樹史彦・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。筑波大陸域環境研究センター報告, **4**, 109-117.

横山智子・及川武久 (2001): 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。筑波大陸域環境研究センター報告, **2**, 37-39.

渡来 靖・薮崎志穂・山中 勤 (2006): TERCの熱収支・水収支観測データベース図表集1981年8月～2005年12月。筑波大陸域環境研究センター報告, **7** (別冊), 97p.

Baldocchi, D. D., Black, T. A., Curtis, P. S., Falge, E., Fuentes, J. D., Granier, A., Gu, L., Knohl, A., Pilegaard, K., Schmid, H. P., Valentini, R., Wilson, K., Wofsy, S., Xu, L. and Yamamoto, S. (2005): Predicting the onset of net carbon uptake by deciduous forests with soil

- temperature and climate data: a synthesis of FLUXNET data. *International Journal of Biometeorology*, **49**, 377-387.
- Graham, E. A., Riordan, E. C., Yuen, E. M., Estrin, D. and Rundel, P. W. (2010): Public internet-connected cameras used as a cross-continental ground-based plant phenology monitoring system. *Global Change Biology*, **16 (11)**, 3014-3023.
- Ide, R. and Oguma, H. (2010): Use of digital cameras for phenological observations. *Ecological Informatics*, **5 (5)**, 339-347.
- Richardson, A. D., Jenkins, J. P., Braswell, B. H., Hollinger, D. Y., Ollinger, S. V. and Smith, M.L. (2007): Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleafforest. *Oecologia*, **152**, 323-334.
- Stewart, J. R., Toma, Y., Fernández, F. G., Nishiwaki, A., Yamada, T. and Bollero, G. (2009): The ecology and agronomy of *Miscanthus sinensis*, a species important to bioenergy crop development, in its native range in Japan: a review, *Global Change Biology Bioenergy*, **1 (2)**, 126-153.
- Woebbecke, D. M., Meyer, G. E., Vonbargen, K. and Mortensen, D. A. (1995): Color indexes for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, **38**, 259-269.
- (2011 年 1 月 28 日受付, 2011 年 10 月 31 日受理)