論 文

衛星データおよび地上測定データからみた
竹林の分光反射特性の季節変動西川 僚子^{1,2}・村上 拓彦^{*,3,4}・大槻 恭一⁵・溝上 展也⁴・吉田 茂二郎⁴

西川僚子・村上拓彦・大槻恭一・溝上展也・吉田茂二郎：衛星データおよび地上測定データからみた竹林の分光反射特性の季節変動 日林誌 88：473~481, 2006 竹林の分光反射特性の季節変動を把握することを目的として、多時期衛星データ (SPOT/HRV データ 8 シーン, LANDSAT/TM データ 9 シーン) の解析および地上での分光反射測定から竹林、広葉樹林、針葉樹人工林の分光反射特性の季節変動を把握した。その結果、衛星データと地上分光反射データにはいくつかの共通点がみられた。4~6 月の可視赤色域においては、竹林は他の森林タイプよりも反射係数およびデジタルナンバーが高い傾向にあった。近赤外域では、竹林と広葉樹林で春から夏にかけて順位の入れ替わりがあった。短波長赤外域は、衛星データにおいて竹林が年間を通して最も高い値をとった。また、5~7 月の近赤外域およびほとんどのシーンの短波長赤外域において全森林タイプ間でデジタルナンバーに有意差がみられた。竹林の分光反射特性の季節変動には、葉替わりが大きく関与しているものと思われた。

キーワード：SPOT/HRV, NDVI, 季節変動, 竹林, 分光反射特性, LANDSAT/TM

Nishikawa, R., Murakami, T., Otsuki, K., Mizoue, N., and Yoshida, S.: **Determining Seasonal Variation in Bamboo Forest Spectral Reflectance Using Satellite- and Ground-based Data.** J. Jpn. For. Soc. 88: 473~481, 2006 Seasonal variation in the spectra of bamboo, broadleaved forests, and coniferous forests was examined using multi-temporal SPOT/HRV and LANDSAT/TM data and ground-based spectral measurements. The satellite- and ground-based data revealed some common characteristics. In the visible red region, bamboo forests had the highest digital number and reflectance factor from April to June. In the near-infrared region, bamboo and broadleaved forests exchanged ranks from spring to summer. In the short-wavelength infrared region, bamboo forests had higher digital number than broadleaved and coniferous forests throughout the year. The three forest types showed significant differences in the near-infrared region from May to July and in the short-wavelength infrared region during the almost entire year. It is suggested that "leaf exchange" greatly affects seasonal variations in the spectra of bamboo forests. **Key words:** bamboo forest, LANDSAT/TM, NDVI, seasonal variation, spectra, SPOT/HRV

I. は じ め に

近年、西日本を中心として、竹林の分布拡大が多数報告されている (21 世紀ふるさとクラブ, 2002; Isagi and Torii, 1998; 片野田, 2003; Koizumi *et al.*, 2003; 三宅ら, 2000; 大野ら, 1999, 2002; Okutomi *et al.*, 1996; 鳥居, 1998; 鳥居・井鷲, 1997; 常岡・薛, 1998)。そのタケの大半が大型の外来植物であるモウソウチクである。また、竹林の拡大は海外でも報告されており、中南米において過去に東南アジアから持ち込まれたタケが現在拡大していることが報告されている (Oliveirafilho *et al.*, 1994; O'Conner *et al.*, 2000; Blundell *et al.*, 2003)。日本における竹林拡大の社会的背景として、タケノコ缶詰等の安価な輸入品との競合やプラスチックなどの工業製品の普及によ

り、タケノコや竹材の需要が減ったこと、また、労働力や後継者が不足していることにより多くの竹林が放置されていることにある (中島, 2001)。タケノコ生産量全国一である福岡県も生産量は過去 10 年でほぼ半減しており、栽培が行われなくなった竹林の放置が増加している (常岡・薛, 1998)。西川ら (2003, 2005) の報告では、福岡県の一部において竹林面積が 30 年間でおよそ 1.3~1.7 倍に増加していることが確認されている。竹林の林分構造は単純で構成種も少ないことから、竹林の分布拡大による生物多様性の低下が危惧されている (瀬嵐ら, 1989; Blundell *et al.*, 2003)。また、科学的に検証された例はないが、竹林が防災上有益であるという指摘 (上田, 1968) がある一方で、斜面崩壊の危険性も指摘されている (21 世紀ふるさとクラブ, 2002)。

* 連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: muratac@agr.niigata-u.ac.jp

¹ 九州大学大学院生物資源環境科学府 (812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan.

² 現勤務先: ESRI ジャパン (株) (153-0043 東京都目黒区東山 1-1-2)

Present address: ESRI Japan Corporation, 1-1-2 Higashiyama, Meguro-ku, Tokyo 153-0043, Japan.

³ 現勤務先: 新潟大学農学部 (950-2181 新潟市五十嵐 2 の町 8050)

Present address: Niigata University, 8050 Ikarashi-Nincho, Niigata 950-2181, Japan.

⁴ 九州大学大学院農学研究院 (812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

Faculty of Agriculture, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan.

⁵ 九州大学大学院農学研究院 (811-2415 福岡県糟屋郡篠栗町津波黒 394)

Faculty of Agriculture, Kyushu University, 394 Tsubakuro, Sasaguri-machi, Kasuya-gun, Fukuoka 811-2415, Japan.

(2005 年 9 月 7 日受付; 2006 年 4 月 26 日受理)

これまでに、西日本を中心として空中写真や地形図を用いた竹林分布の把握やその時系列変化に関する研究がなされてきた(鳥居, 1998; 三宅ら, 2000; 大野ら, 2002; 西川ら, 2003, 2005; 甲斐・辻井, 2004)。さらに、最近では衛星リモートセンシングデータ(以下、衛星データとする)を用いた解析も行われ始めている(小泉ら, 2003; 西川ら, 2004; Fukui *et al.*, 2004; 張ら, 2004)。衛星データは、その広域性、利便性、情報量などの点から、今後ますます、利用が盛んになると予想される。

小泉ら(2003)は、4月と5月のLANDSAT/TMデータを用いてディジションツリー法によりバンドの値や複数バンドの比演算から竹林の抽出を行っている。西川ら(2004)も4月のLANDSAT/TMデータを用いていくつかの手法で竹林の抽出を行っている。また、Fukui *et al.*(2004)は、6月のASTERデータおよび5月のLANDSAT/TMデータを用いて同じくディジションツリー法と最尤法で竹林の抽出を行っている。さらに、張ら(2004)は、異種衛星データを組み合わせた土地被覆分類を実施し、竹林分布域の推定を行っている。しかし、いずれの研究も閾値の設定などの点が衛星データの観測時期に依存しており、さらなる検討が必要といえる。

ところで、衛星データは地上被覆物から反射される電磁波を複数の波長帯別に捉えるという特徴をもつ。そのため衛星データを利用する際には、対象物の分光反射特性を把握しておく必要がある(加藤, 2004)。特に、植生は季節によって分光反射特性が異なるため、その季節変動を把握することが重要である。植生の分光反射特性の季節変動を把握する方法として、地上における分光反射測定(以下、地上測定とする)やタワー、ヘリコプター、クレーン車等による測定、複数の衛星データの比較等が挙げられる。樹木や森林の示す分光反射特性を捉えたものとして、地上測定では、吉村ら(1991, 1994)が落葉広葉樹の分光反射の季節変動を植物色素等と関連付けて把握している。一方、タワー観測から、Blackburn and Milton(1995)やKodani *et al.*(2002)が、落葉広葉樹の樹冠レベルの分光反射の季節変動を報告している。衛星データでは、Spanner *et al.*(1990)がAVHRRデータ、栗屋・田中(1999)がLANDSAT/TMデータにより針葉樹林の分光反射の季節変動を把握している。また、Stylinski *et al.*(2002)は、常緑低木広葉樹の樹冠と単葉の分光反射特性を測定し、Peterson(1992)は、亜寒帯林伐採跡地の植生の分光反射の季節変動を測定している。

このように、森林域における分光反射特性の季節変動に関してさまざまな研究が行われているが、森林タイプとしては落葉広葉樹林や針葉樹林に関するものが中心であり、竹林に関するものはほとんどない。竹林の分光反射特性の季節変動に関するものは、村上・斎藤(1999)がSPOT/HRVデータを用いて暖温帯林のさまざまな森林タイプ別に把握したもの、瀬戸島ら(2002)が同じく暖温帯林の樹種別に空中写真を用いて把握したものがある。しかし、い

図-1. 本研究の対象地域 (LANDSAT/TM: 1997/4/24)
Study area.

ずれも可視域および近赤外域の把握に留まっており、短波長赤外域の把握は行われていない。短波長赤外域は、植生の含水率と関係があり(Gao, 1996)、竹林とその他の森林タイプとの判別においてその有効性が示されていること(Murakami, 2003)などから、植生の示す分光反射特性の季節変動を把握するにあたって見逃せない。

竹林の拡大状況を把握するためには衛星データの利用が期待されており、そのための基礎データを蓄積することが、重要かつ早急な課題となっている。本研究の目的は、衛星リモートセンシングデータおよび地上測定データを用いて、可視域から短波長赤外域にかけて竹林の分光反射特性の季節変動を把握することである。2~3シーンの衛星データを用いた研究例はいくつかあるが、年間を通して季節変動を捉えられるだけの数のシーンを時系列で扱った研究は少ない。本論では、複数のセンサや複数の年次のデータを扱うことにより、妥当な季節変動の把握が実現できると考えた。

II. 対象地域および使用データ

本研究では、福岡県福岡市から飯塚市にかけて広がる三郡山地の森林地域を衛星データの解析対象とした。図-1に対象地域の位置を示す。対象地域内には、九州大学福岡演習林が存在し、その他にはクスノキ純林で有名な立花山も含まれ、山地を主体に住宅地・農地・果樹園などを含み、落葉広葉樹林、常緑広葉樹林、スギ・ヒノキ人工林、マダケ林、モウソウチク林などから構成される典型的な里山林が広がっている。福岡市近郊の年平均気温は16.6°C、年間降水量は1,632 mmである(気象庁, 1995-2004)。

解析に使用したソフトウェアは、ERDAS IMAGINE 8.7(米国 Leica Geosystems 社)とArcView 8.3(米国 ESRI 社)である。解析に用いた衛星画像は、1997年に観測されたSPOT/HRVデータ(以下、SPOT/HRV)8シーンと、1994~1997年に観測されたLANDSAT/TMデータ(以下、LANDSAT/TM)9シーンである(表-1参照)。今回、

SPOT/HRV は同一年に, LANDSAT/TM は複数年に観測されたデータを使用した。

SPOT/HRV の地上分解能は約 20 m, 観測波長帯は Band 1 が 500~590 nm (可視緑色域), Band 2 が 610~680 nm (可視赤色域), Band 3 が 790~890 nm (近赤外域) となっている。LANDSAT/TM の地上分解能は 30 m, 観測波長帯は Band 1 が 450~520 nm (可視青色域), Band 2 が 520~600 nm (可視緑色域), Band 3 が 630~690 nm (可視赤色域), Band 4 が 760~900 nm (近赤外域), Band 5 が 1,550~1,750 nm (短波長赤外域), Band 6 が 10,400~12,500 nm (熱赤外域), Band 7 が 2,080~2,350 nm (短波長赤外域) となっている。なお, 本研究では Band 6 は使用していない。地上測定は, 2004 年 3~12 月に九州大学福岡演習林内において野外分光放射計 Field Spec Pro FR (米国 Analytical Spectral Devices 社) を使用して行った。測定波長帯は 350~2,500 nm, サンプルング間隔は 350~1,050 nm が 1.4 nm, 1,000~2,500 nm が 2.0 nm で, 太陽光を光源として晴天日の午前 11 時ごろにモウソウチク (*Pyllostacys pubescens*), マテバシイ (*Lithocarpus edulis*), スギ (*Cryptomeria japonica*), ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) についてそれぞれ複数葉の分光反射係数を測定した。モウソウチクとマテバシイについては旧葉 (old) と新葉 (new) を区別して

測定した。表-1 に各衛星データの観測日と地上測定日を示す。

III. 解析方法

1. 衛星データ

前処理として, SPOT/HRV と LANDSAT/TM を幾何補正し, 季節間の比較が行えるようにシーン間でシュレイドインバリエントターゲットを利用したデジタルナンバー (以下, DN とする) のマッチング (栗屋・田中, 1999) を行った。はじめに, 全シーンの各バンドについて画像全体の DN の最小値を求め, 全バンドにおいて最小値が最も大きいシーンを DN マッチングの基準とした。その結果, 基準シーンは SPOT/HRV が DOY147, LANDSAT/TM が DOY115 となった。次に, 植生を含まずスペクトル的な変化が小さいと思われる明るさの違うポイントを画像から 20~40 箇所ほど選んだ。これらのエリアの DN について, 各バンドごとに基準シーンと他のシーンについて回帰分析を実施した。回帰直線からの残差が最も大きいポイントを除去した後, 再び回帰分析を行った。すべてのバンドで決定係数 r^2 が 0.9 以上になるまで回帰分析を繰り返し, 全シーンの各バンドについて回帰式を決定した。SPOT/HRV, LANDSAT/TM それぞれの回帰式の係数 (a) と切片 (b), 決定係数 (r^2) を表-2, 3 に示す。

さらに, 地形効果を回避するため, 太陽入射角 i の余弦である $\cos i$ (Smith *et al.*, 1980; 村上, 2002) を算出し, $\cos i$ が 0.5 以下の場所を解析対象地から除外した。また, 雲および雲影がかかっている領域も除去した。以上の処理を行った SPOT/HRV と LANDSAT/TM から竹林, 広葉樹林, スギ人工林, ヒノキ人工林のそれぞれについてサンプルピクセルを取得した。サンプルピクセル取得の参照データとして 1995 年 5 月に撮影された篠栗町の空中写真と 2002 年 5 月に観測された九州大学福岡演習林周辺の QuickBird データを使用し, 2004 年 5 月に現地確認を行った。サンプルピクセルから各データについて DN の季節変動を把握した。

SPOT/HRV について, 斜め観測の影響が考えられた

表-1. 本研究で使した SPOT/HRV と LANDSAT/TM の観測日および複数葉分光反射の地上測定日
Acquisition dates of SPOT/HRV and LANDSAT/TM data and ground-based spectral observations.

SPOT/HRV	LANDSAT/TM	Field measurement
1997/01/17 (17)	1994/01/10 (10)	2004/03/24 (84)
1997/03/05 (64)	1994/03/31 (90)	2004/04/21 (112)
1997/04/26 (116)	1997/04/24 (114)	2004/05/06 (127)
1997/05/27 (147)	1995/05/05 (125)	2004/05/18 (139)
1997/06/17 (168)	1994/06/03 (154)	2004/06/05 (157)
1997/07/23 (204)	1995/08/25 (237)	2004/07/09 (191)
1997/10/25 (298)	1995/10/12 (285)	2004/11/09 (314)
1997/12/05 (339)	1997/10/17 (290)	2004/12/10 (345)
	1997/11/02 (306)	

括弧内の数値は通算日 (DOY)。

The number in a parenthesis is day of the year (DOY).

表-2. SPOT/HRV のマッチングに使した回帰式の係数 (a) と切片 (b), 決定係数 (r^2)
(a) coefficient, (b) intercept, and (r^2) coefficient of determination for image matching of SPOT/HRV.

Band		Day of the year (DOY)							
		17	64	116	147	168	204	298	339
1	a	0.8830	0.7773	0.7327	—	0.7619	0.9006	0.5712	1.6130
	b	19.862	11.965	25.332	—	20.304	18.439	36.092	25.389
	r^2	0.9219	0.9378	0.9684	—	0.9641	0.9323	0.9331	0.9150
2	a	1.2393	0.9317	0.7755	—	0.7831	0.8287	0.7180	1.6091
	b	14.636	7.4259	15.852	—	12.733	10.825	24.346	16.016
	r^2	0.9475	0.9411	0.9807	—	0.9604	0.9525	0.9456	0.9282
3	a	1.2170	0.9150	0.7823	—	0.8118	0.8432	0.7550	1.5046
	b	25.708	17.286	21.180	—	14.206	13.223	28.545	29.218
	r^2	0.9442	0.9450	0.9736	—	0.9647	0.9379	0.9426	0.9281

DOY147 を基準としたマッチング。

The base image is DOY147.

表-3. LANDSAT/TM のマッチングに使用した回帰式の係数 (a) と切片 (b), 決定係数 (r^2)
 (a) coefficient, (b) intercept, and (r^2) coefficient of determination for image matching of LANDSAT/TM.

Band	Day of the year (DOY)									
	10	90	115	125	154	237	285	290	306	
1	<i>a</i>	1.6750	0.9741	—	0.8472	0.7554	0.7228	1.1676	1.0776	1.0173
	<i>b</i>	0.0000	10.695	—	19.295	21.336	35.813	10.722	15.670	29.092
	<i>r</i> ²	0.9605	0.9498	—	0.9670	0.9161	0.9260	0.9543	0.9263	0.9152
2	<i>a</i>	1.7575	1.0001	—	0.9137	0.7328	0.7549	1.1557	1.0707	0.9996
	<i>b</i>	1.0124	3.1614	—	4.0071	8.8522	12.189	5.2647	7.0271	13.292
	<i>r</i> ²	0.9724	0.9747	—	0.9834	0.9152	0.9456	0.9607	0.9436	0.9172
3	<i>a</i>	1.7499	0.9549	—	0.9036	0.6938	0.7868	1.1028	1.0055	0.9635
	<i>b</i>	4.8074	7.3469	—	5.9813	13.921	13.854	10.369	11.013	18.711
	<i>r</i> ²	0.9734	0.9752	—	0.9664	0.9172	0.9499	0.9761	0.9368	0.9157
4	<i>a</i>	1.6104	0.9315	—	0.8815	0.7120	0.8474	1.0584	0.9889	0.9808
	<i>b</i>	12.963	10.268	—	7.5328	11.766	11.889	12.180	13.117	17.039
	<i>r</i> ²	0.9528	0.9628	—	0.9695	0.9156	0.9645	0.9605	0.9478	0.9060
5	<i>a</i>	1.7127	0.9269	—	1.0326	0.7753	0.9200	1.0620	1.0617	1.0284
	<i>b</i>	15.908	12.127	—	1.0527	11.497	15.645	17.585	15.647	20.885
	<i>r</i> ²	0.9529	0.9703	—	0.9714	0.9488	0.9329	0.9513	0.9702	0.9401
7	<i>a</i>	1.7150	0.9534	—	1.0139	0.7198	1.0166	1.1017	1.0958	1.0791
	<i>b</i>	12.800	8.8460	—	3.0341	11.0780	9.2784	11.893	10.347	13.042
	<i>r</i> ²	0.9412	0.9414	—	0.9691	0.9320	0.9249	0.9416	0.9445	0.9186

DOY115 を基準としたマッチング。
 The base image is DOY115.

が、今回センサ天頂角が最大で 15.98° であったことから、二方向性反射関数は考慮せずに解析を行った。

2. 地上測定データ

地上測定データの分光反射係数測定は、測定条件を衛星データと近づけるために太陽光を光源として晴天日に測定した。南中時に東側にセンサを固定し、測定対象に対し 45° の観測角でスペクトル測定を実施した。センサと葉の距離は 30 cm とした。センサの視野角を 5° としたので、フットプリントの大きさは 37 mm である。複数葉は、背景が隠れるほど十分重ねた。重ね方はランダムである。背景物には黒色に塗った板を使用した。地上測定した複数葉の分光反射値は、同時に測定した簡易白色板 (山下ら, 2001) を基準として分光反射係数に変換した。簡易白色板の塗料は、硫酸バリウムである。

IV. 結果および考察

1. 可視青色域

LANDSAT/TM (図-2 (a)) は、全森林タイプで DN が 70~100 の間をとり、明瞭な季節変動はみられなかった。可視青色域はヘイズやエアロゾルの影響を受けやすく、植生の季節変動を論じた研究もほとんどない。

地上測定データは、ほとんどの時期の樹種で可視青色域の反射係数が一部を除いて 0.1 以下となっており、妥当な結果であるといえる (図-4)。ヒノキはスギに比べわずかながら高い反射となった。スギ、ヒノキは測定期間中一定であったのに対し、モウソウチクとマテバシイはばらつきが大きかった。このばらつきは観測条件の違いに起因するものと考えられる。モウソウチクやマテバシイは、観測す

る際の葉の重なり具合や傾きに大きく影響される。一方、スギ、ヒノキは複数葉の状態では葉と葉の陰が混在するため安定した測定が行えた。

2. 可視緑色域

全森林タイプで DN は、SPOT/HRV (図-3 (a)) は 50~80, LANDSAT/TM (図-2 (b)) は 20~40 の間をとり、明瞭な季節変動はみられなかった。LANDSAT/TM は、1~6 月 (DOY10~154) に竹林と広葉樹林がスギ、ヒノキ人工林に比べて高い傾向にあった。

地上測定データは、可視青色域と同様、反射係数が一部を除いて 0.1 以下と妥当な結果であった (図-4)。

3. 可視赤色域

SPOT/HRV (図-3 (b)) は、全森林タイプで DN は 30~50 の間で変化し、1~3 月 (DOY17~64) にかけて下降、3~4 月 (DOY64~116) にかけて上昇した。LANDSAT/TM (図-2 (c)) は、全森林タイプで DN が 20~40 の間をとり、1~4 月 (DOY10~115) にかけて下降、5~6 月 (DOY125~154) にかけて上昇した。SPOT/HRV, LANDSAT/TM 共に全森林タイプで 5 月 (DOY147, 125) に最低値をとった。Blackburn and Milton (1995) は、落葉広葉樹林の樹冠占有率が低い 12 月から 5 月ぐらいにかけて可視赤色の反射係数が高かったことを報告しており、本研究は逆の結果となった。本研究の対象地には落葉広葉樹と常緑広葉樹が混在しているため、広葉樹林の季節変動にそのような明瞭な傾向はみられなかった。SPOT/HRV, LANDSAT/TM とともに竹林は 4~6 月 (DOY116~168, 115~154) にかけて他の森林タイプに比べて高くなっていた。瀬戸島ら (2002) は、モウソウチクは 5 月と 12 月で

図-2. LANDSAT/TM の各バンドにおけるデジタルナンバーの季節変動
Seasonal profiles of digital numbers from LANDSAT/TM data.

(a) Band 1, (b) Band 2, (c) Band 3, (d) Band 4, (e) Band 5, (f) Band 7.

図-3. SPOT/HRV の各バンドにおけるデジタルナンバーの季節変動
Seasonal profiles of digital numbers from SPOT/HRV data.

(a) Band 1, (b) Band 2, (c) Band 3.

他の森林タイプよりも R 値 (可視赤色域) が高い傾向にあることを示しており、本論の 5 月 (DOY147, 125) の結果と一致する。

地上測定データは、一部を除いて 0.1 以下を示した。しかし、4 月 (DOY112) と 5 月のモウソウチクの旧葉は 0.2 よりも高かった (図-4)。これは、このときの葉がやや黄色を呈していたためであると考えられる。この時期、旧葉のクロロフィル量が低下を始めること (野中・佐々木, 1989) が黄色を呈している要因と考えられる。

4. 近赤外域

近赤外域は、植物色素による吸収も水による吸収もない領域であるといわれている (Merzlyak *et al.*, 2002)。SPOT/HRV (図-3 (c)) は、DN は 80~140 の間で変化し、竹林、スギ人工林、ヒノキ人工林は 4~6 月、広葉樹林は 3~5 月 (DOY64~147) にかけて上昇した。LAND-

SAT/TM (図-2 (d)) は 50~110 の間で変化し、竹林は 4~8 月 (DOY115~237) にかけて DN が上昇し、広葉樹林は 3~6 月 (DOY90~154) にかけて上昇した。スギ人工林とヒノキ人工林は季節変動がみられなかった。可視域ではスギ人工林とヒノキ人工林に差はなかったが、近赤外域ではスギ人工林よりもヒノキ人工林が年間を通して高い傾向にあった。吉村 (1991) は、成熟葉よりも新葉の近赤外の反射係数が高い結果を得ており、落葉広葉樹の展葉時期である 3~5 月および常緑広葉樹の新葉展開時期である 5~6 月に DN が高くなったと考えられる。森林タイプそれぞれで、Tukey の多重比較により DN の比較を実施したところ、SPOT/HRV は DOY147~204, LANDSAT/TM は DOY90~306 で、森林タイプごとの DN に有意差がみられた (図-5)。竹林とそれ以外の森林タイプという観点で比較すると、SPOT/HRV では 8 シーン 中 5 シー

図-4. 地上測定データからみた各樹種の分光反射特性

Spectral reflectance factors obtained for each species from ground-based measurements.

(a) DOY84, (b) DOY112, (c) DOY127, (d) DOY139, (e) DOY157, (f) DOY191, (g) DOY314, (h) DOY345.

ン, LANDSAT/TM では全シーンで有意差がみられた。

地上測定データは, DOY112~191 (3~7月) にかけてマテバシイの近赤外域の反射係数がモウソウチクより高い傾向にあった (図-4)。Ceccato *et al.* (2001) によると, 植物葉を対象とした場合, 近赤外域の反射率の4分の3は葉の内部構造の違い, 残り4分の1は乾重量で説明できるとされる。この葉の内部構造は, 単位乾重量あたりの葉面積で定義され, 単位乾重量あたりの葉面積が小さいほど近赤外域の反射率は上がることになっている (Ceccato *et al.*, 2001)。モウソウチクとマテバシイの葉の厚みから推測するに, マテバシイの方がモウソウチクと比べて単位乾重量あたりの葉面積は小さいと考えられる。よって, この

ことがマテバシイの反射係数が高かった主要因として挙げられる。ただし, DOY345のようにモウソウチクとマテバシイの近赤外域の反射係数に差のみられない時期もあり, 両者の差に季節変動性があると考えられる。

5. 短波長赤外域

Band 5およびBand 7 (図-2 (e), (f)) はそれぞれ40~120, 10~50 とレンジの違いはあるものの, 全森林タイプではほぼ同じような季節変動パターンを示した。また, 森林タイプ間の順位の入替わりもみられず, 常に値の高い順から竹林, 広葉樹林, ヒノキ人工林, スギ人工林となった。短波長赤外域は水による吸収が起こる波長帯であり, 一般に植物の葉に対し含水率が高いほど反射は低くなると

図-5. 森林タイプ間で比較した SPOT/HRV Band 3 (a), LANDSAT/TM Band 4 (b) のデジタルナンバー

The digital number of each forest type. (a) Band 3 of SPOT/HRV and (b) Band 4 of LANDSAT/TM.

誤差線は標準偏差。図中の文字は Tukey の多重比較の結果を示す (有意水準 5%)。同じ文字は同一グループであることを意味する。

Error bar shows standard deviation. The characters indicate the result of Tukey's multiple comparison test (level of significance is 0.05). Same character means same group.

されている (Hunt *et al.*, 1987; Tucker, 1980)。樹木の葉の含水率は新緑期に高く、秋に向かうにつれて減少する (丸山ら, 1996)。丸山・森川 (1984) は、落葉広葉樹および常緑針葉樹の水分特性の季節変化を調べ、含水率が5月をピークに減少する結果となった。本研究で4月に低い値をとったのは、この時期に新葉が展開し始めるためといえる。時期のずれは、気候の違いに起因すると推察される。図-6に Tukey の多重比較の結果を示している。Band 7の DOY10において、ヒノキとスギの DN に有意差がみられない他は、すべてのシーン、バンドにおいて四つの森林タイプすべてに有意差がみられた。

地上測定データに関して、反射係数短波長赤外域の反射係数はマテバシイよりモウソウチクの方が、年間を通しておおむね高かった (図-4)。これは、衛星データと同様の結果であった。また、12月 (DOY345) を除いてスギよりもヒノキの方が短波長赤外域の反射係数は高かった。

V. お わ り に

衛星データおよび地上測定データから得られた分光反射特性の季節変動には、いくつかの共通点がみられた。可視青色域および可視緑色域は、あまり森林タイプ間 (樹種間) で違いがなかった。可視赤色域においては4~6月に竹林 (モウソウチク) の反射が他の森林タイプ (樹種) に比べ高くなっており、これは、旧葉のクロロフィル量の低下によると推察される。近赤外域は、5~8月に竹林と広葉樹林で順位の入れ替わりがあった。短波長赤外域は、年間を通して竹林、広葉樹林、ヒノキ人工林、スギ人工林の順に高く、順位の入れ替わりはなかった。地上測定データでは、季節変動を十分に把握することはできなかったが、同一観測日における森林タイプ間の比較は行えた。また、それは衛星データと同じ傾向にあり、衛星データの分光反射特性を解釈する上で役立った。本研究により、竹林は他

図-6. 森林タイプ間で比較した LANDSAT/TM Band 5 (a), Band 7 (b) のデジタルナンバー

The digital number of each forest type. (a) Band 5 of LANDSAT/TM and (b) Band 7 of LANDSAT/TM.

誤差線は標準偏差。図中の文字は Tukey の多重比較の結果を示す (有意水準 5%)。同じ文字は同一グループであることを意味する。

Error bar shows standard deviation. The characters indicate the result of Tukey's multiple comparison test (level of significance is 0.05). Same character means same group.

の森林タイプとは異なる分光反射特性をもっていることが示された。

本研究は、竹林の分光反射特性の季節変動を把握したと同時に多くの問題点を挙げたが、その一つ一つを解決していくことで、より確かな基礎データを構築できる。ひいては、さまざまな衛星データを用いた広域的な竹林の賦存量および変化量の把握が効果的に行えることが期待される。

本研究を行うにあたり、鳥取大学乾燥地研究センター 木村玲二博士、九州大学工学研究院環境都市部門環境制御工学研究室 島岡隆行博士および中山裕文博士には、Field Spec Pro の使用に関し多大な便宜を図っていただきました。ここに記し厚く御礼申し上げます。なお、この研究の一部は科学研究費補助金「気候変動影響評価のための森林生態系動態モニタリングおよびモデルの構築」(課題番号: 17380096) によって行った。

引用文献

- 栗屋善雄・田中伸彦 (1999) 冷温帯林の反射スペクトルの季節変化の特徴：ランドサット TM データを利用した解析. 写測とリモセン 38(4) : 35-46.
- Blackburn, G.A. and Milton, E.J. (1995) Seasonal variations in the spectral reflectance of deciduous tree canopies. *Int. J. Remote Sens.* 16 : 709-720.
- Blundell, A.G., Scatena, F.N., Wentsel, R., and Sommers, W. (2003) Ecorisk assessment using indicators of sustainability. *J. For.* 101(1) : 14-19.
- Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemoud, S., and Grégoire, J.M. (2001) Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sens. Environ.* 77 : 22-33.
- Fukui, Y., Tachikawa, T., Imai, Y., and Setojima, M. (2004) Mapping bamboo forest expansion in the suburb of Fukuoka city using Aster data. *In Proc. 25th Asian Conf. Remote Sens.*, Chiang Mai. 408-413.
- Gao, B.-C. (1996) NDWI—A normalized difference water index

- for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens. Environ.* 58 : 257-266.
- Hunt, E.R., Jr., Rock, B.N., and Nobel, P.S. (1987) Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. *Remote Sens. Environ.* 22 : 429-435.
- Isagi, Y. and Torii, A. (1998) Range expansion and its mechanisms in a naturalized bamboo species, *Phyllostachys pubescens*, in Japan. *J. Sust. For.* 6 : 127-141.
- 甲斐重貴・辻井美香 (2004) GISを用いた九州南部地域の里山における竹林拡大の時系列変化と要因の検討—宮崎県高岡町の事例—. 宮大農研報 50 : 73-83.
- 片野田逸朗 (2003) 蒲生町西浦地域における竹林拡大の実態. 九州森林研究 56 : 82-87.
- 加藤正人編 (2004) 森林リモートセンシング. 273 pp, 日本林業調査会, 東京.
- 気象庁 (1995-2004) 気象庁年報 (平成 6~15 年分). 気象庁, 東京.
- Kodani, E., Awaya, Y., Tanaka, K., and Matsumura, N. (2002) Seasonal patterns of canopy structure, biochemistry and spectral reflectance in a broad-leaved deciduous *Fagus crenata* canopy. *For. Ecol. Manage.* 167 : 233-249.
- Koizumi, K., Tanimoto, C., and Piao, C. (2003) Spread of Bamboo stands in the Kinki Region. *In Proc. 24th Asian Conf. Remote Sens.*, Busan. 609-611.
- 小泉圭吾・谷本親伯・朴 春澤 (2003) LANDSAT 5 号 TM データを用いた竹林の抽出手法に関する研究. 写測とリモセン 42(6) : 42-51.
- 丸山 温・森川 靖 (1984) ミズナラ, ダケカンバ, ウラジロモミの葉の水分特性の季節変化. 日林誌 66 : 499-505.
- 丸山 温・松本陽介・森川 靖 (1996) スギ樹冠上部と下部の葉の水分特性と形態的特徴. 日林誌 78 : 427-732.
- Merzlyak, M.N., Chibkunova, O.B., Melo, T.B., and Naqvi, K.R. (2002) Does a leaf absorb radiation in the near infrared (780-900 nm) region? A new approach to quantifying optical reflection, absorption and transmission of leaves. *Photosynthesis Res.* 72 : 263-270.
- 三宅 尚・川西基博・三宅三賀・石川慎吾 (2000) 高知市北山地域における竹林の分布拡大 I. 過去 30 年間の竹林面積の変化. *Hikobia* 13 : 241-252.
- 村上拓彦 (2002) SPOT/HRV データから森林タイプ別に求めた Minnaert 定数. 写測とリモセン 41(4) : 47-55.
- Murakami, T. (2003) How is SWIR useful to discrimination and a classification of forest types? *In Proc. 24th Asian Conf. Remote Sens.*, Busan. 1224-1226.
- 村上拓彦・斎藤元也 (1999) 多時期 SPOT/HRV データからみた九州北部地域に分布する森林植生の季節変化. 日本写測学会秋季講演集 217 : 220.
- 中島章文 (2001) 都市近郊における竹林の管理・経営の実態—京都市近郊のタケノコ生産地を事例にして—. 森林応用研究 10 : 1-7.
- 21 世紀ふるさとクラブ (2002) 高知県春野町における竹林拡大の実態調査報告書. 70 pp, 高知・竹林問題研究会, 高知.
- 西川僚子・村上拓彦・吉田茂二郎・今田盛生 (2003) 福岡県篠栗町および立花町における竹林の分布拡大. 日林学術講 114 : 634.
- 西川僚子・村上拓彦・吉田茂二郎・加治佐剛 (2004) 竹林分布の変化抽出における LANDSAT/TM データの利用可能性. 日林学術講 115 : 573.
- 西川僚子・村上拓彦・吉田茂二郎・光田 靖・長島啓子・溝上展也 (2005) 隣接する土地被覆別にみた竹林分布変化の特徴. 日林誌 87 : 402-409.
- 野中重之・佐々木重行 (1989) モウソウチクの発生経過年数とクロロフィル濃度の季節変化. *Bamboo. J.* 7 : 5-10.
- O'Conner, P.J., Covich, A.P., Scatena, F.N., and Loope, L.L. (2000) Non-indigenous bamboo along headwater streams of the Luquillo Mountains, Puerto Rico: Leaf fall, aquatic leaf decay and patterns of invasion. *J. Trop. Ecol.* 16 : 499-516.
- Okutomi, K., Shinoda, S., and Fukuda, H. (1996) Casual analysis of the invasion of broad-leaved forest by bamboo in Japan. *J. Veg. Sci.* 7 : 723-728.
- Oliveira Filho, A., Vilela, E., Gavilanes, M., and Carvalho, D. (1994) Effect of flooding regime and understory bamboos on the physiognomy and tree species composition of a tropical semideciduous forest in southeastern Brazil. *Vegetatio* 113 : 99-124.
- 大野朋子・平井 潤・丸山 宏・前中久行 (1999) 地形図を用いた都市近郊林における竹林化の解析. ランドスケープ研究 62 : 599-602.
- 大野朋子・加我宏之・下村泰彦・増田 昇 (2002) 大阪府岸和田市における竹林の拡大特性に関する研究. ランドスケープ研究 65 : 603-608.
- Peterson, U. (1992) Seasonal reflectance factor dynamics in boreal forest clear-cut communities. *Int. J. Remote Sens.* 13 : 753-772.
- 瀬嵐哲夫・丸真喜子・大森美紀・西井武秀 (1989) 竹林群落の構造と繊維の特性—雑木林の竹林化—. 金沢大学教育学部紀要 (自然科学編) 38 : 25-40.
- 瀬戸島政博・赤松幸生・今井靖晃・重松敏則・朝廣和夫・児玉滋彦 (2002) カラー航空写真上の季節の色調変化から見た里山構成樹種の識別に関する研究. ランドスケープ研究 65 : 679-684.
- Smith, J.A., Lin T.L., and Ranson, K.J. (1980) The Lambertian assumption and Landsat data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 46 : 1183-1189.
- Spanner, M.A., Pierce L.L., Running, S.W., and Peterson, D.L. (1990) The seasonality of AVHRR data of temperate coniferous forests: relationship with Leaf Area Index. *Remote Sens. Environ.* 33 : 97-112.
- Stylinski, C.D., Gamon, J.A., and Oechel, W.C. (2002) Seasonal patterns of reflectance indices, carotenoid pigments and photosynthesis of evergreen chaparral species. *Oecologia* 131 : 366-374.
- 鳥居厚志 (1998) 空中写真を用いた竹林の分布拡大速度の推定—滋賀県八幡山および京都府男山における事例—. 日生態誌 48 : 37-47.
- 鳥居厚志・井鷲祐司 (1997) 京都府南部地域における竹林の分布拡大. 日生態誌 47 : 31-41.
- 常岡珠江・薛 孝夫 (1998) 福岡県における非施業竹林の拡大について. 日林九支研論集 51 : 127-128.
- Tucker, C.J. (1980) Remote sensing of leaf water content in the near infrared. *Remote Sens. Environ.* 10 : 23-32.
- 上田弘一郎 (1968) 竹. 238 pp, 毎日新聞社, 東京.
- 山下 恵・吉村充則・本多嘉明・梶原康司・土田 聡 (2001) 簡易白色板作成法の検討およびその性能評価・校正. 写測とリモセン 40(2) : 26-32.
- 吉村晴佳・田中總太郎・小橋澄治・大手桂二・妹尾俊夫・国友 優 (1991) 単葉および重なり合った葉の近赤外反射の季節的变化. 日本リモセン学会誌 11(4) : 5-19.
- 吉村晴佳・石田雅士・小橋澄治・大手桂二 (1994) 樹葉の季節的可視域分光特性変化におよぼす植物色素の影響. 日緑工誌 20 : 99-110.
- 張 福平・魏 永芬・秋山 侃・西條好迪 (2004) 異種衛星データを用いた竹林分布域の抽出. システム農学 20 : 86-96.