

# 光源と測定環境が樹木単葉の分光反射特性に与える影響

藤田 泰文<sup>1)</sup>・長谷川 均<sup>2)</sup>・後藤 智哉<sup>3)</sup>

1) 近畿実測株式会社 技術部 2) 本学地理・環境専攻 教授 3) 本学人文科学研究科 博士課程在学

## はじめに

地表はさまざまな物質でおおわれているが、これらに太陽光が当たると物質によってそれぞれ特有の波長をもつ光（電磁波）を反射する。このとき反射する光は、物質の種類や状態によって異なるため、この光（電磁波）のスペクトル特性を観測することにより対象物の性質に関する情報を得ることが可能である（島田 2007）。このような、物質ごとに異なる反射を持つ特性を分光反射特性と呼び、リモートセンシングデータを用いて地表面の解析を行う際には重要な解析指標として一般に用いられている（長谷川 1998）。これまで、この光（電磁波）を観測するリモートセンシング衛星のセンサの波長帯は、数バンド（チャンネル）であった。しかし、近年は100バンド（チャンネル）以上の波長帯に分割して測定する、いわゆるハイパースペクトラル衛星が運用を始めた。その結果、従来可能であった樹種の区分だけではなく、葉のクロロフィル、リグニン、水分、タンパク、窒素量などの生化学量の推定なども可能になることが期待されている（加藤・飯坂 2007）。

葉の分光特性は、波長帯に対して選択的で興味ある変化を示すことが明らかとなっており（石山ほか 1984）、葉の水分量（西田ほか 2000）、葉の重なり（山本ほか 1995；Roger M. McCoy 2005）、熱ストレス（本郷ほか 1998）などさまざまな原因で変化することが報告されている。これらの報告は、室内測定における実験的なデータを用いたものであるが、野外の測定環境下において想定される低温、凍結、降雨などの影響を含めた実験的

な報告は極めて少ない（西田ほか 2000）。

野外での測定や衛星搭載型のセンサで観測されたハイパーデータの放射源は太陽である。この場合、分光反射特性は放射源と物体間にある大気の影響を受けることが明らかとなっており（島田 2007；長谷川ほか 2007）、大気中の浮遊粒子であるエアロゾルの影響を除去する大気補正法に関する様々な報告がある（例えば、松山ほか 2006；布和・高田 2006）。いっぽう、室内で分光反射を測定する場合、ハイパーデータの放射源はハロゲンランプなどの光源を使用するが、使用した光源による違いなど詳細な報告は見られない。

本報告で筆者らは、1) 野外で想定される環境下にあわせて処理した葉を用いて分光反射を測定し、グラントゥールズデータを利用した植生区分のための基礎的なデータを収集すること、2) 光源の種類を換えて測定した場合の分光反射特性の相違などを比較することを目的におこなった実験結果を報告する。

## 方法

本稿では、植物の葉の状態に対する反射率の基礎データを取得するために、実験室内で分光放射計（FieldSpec PRO : Analytical Spectral Device社製）を用い、視野角10度のレンズを装着して測定を行った。図1に使用した分光放射計の光学系を示す。光源から放射された光は、60cmの距離で測定対象に当たり、45°の角度で反射したあと、50cmの距離でセンサに吸収される。測定波長範囲は、350nm～2500nm、測定波長間隔は、1.0nm～

1.4nmである。反射率は標準白板の光源の反射光量に対する、対象物の光源反射光量の比として求めた。上記の測定を、5回繰り返しその平均値を採用した。測定に使用した光源は、ASD社製のハロゲンランプ、Yamagiwa製のバイオライト、量販家電店で購入したNational製のハロゲンランプ40W・60Wを使用した。

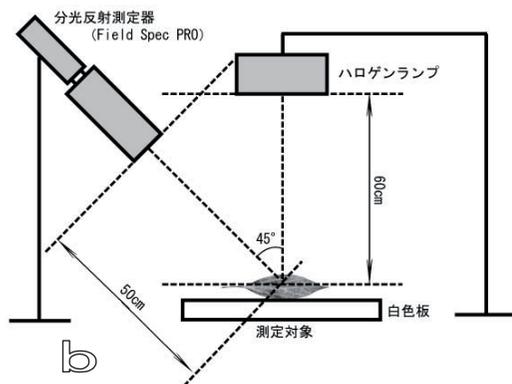


図1 測定環境 (a: 測定風景 b: 光学系)

ASD社製のハロゲンランプは、FieldSpec PRO用の標準光源として使用が推奨されているものであるが高価である。今回は、FieldSpec PROの日本の代理店であるイメージワン社のご厚意で借用し試用させていただいた。また、バイオライトは(株)林原グループが開発した照明機器で、照明専門店などで購入できる。この機器は、家庭用の交流電源を直流に変換し、チラツキ(フリッカー)を解消するとともに朝の太陽と同じ連続したスペクトルをつくる白色光を発生する。今回の実験に

あたっては、事前に数種類の電球や照明スタンドを使って、分光反射計の波形を見ながら照明機器を選定した。その際、バイオライトはフリッカーが極めて少なく安定した測定が可能であることが確認できたので、この照明機器を試用することにした。なお、バイオライトは照明専門店などで購入できる。

分光反射特性を測定する対象物として、関東地方に分布し、簡単に試料が調達できるシラカシ(*Quercus myrsinifolia*)・クスノキ(*Cinnamomum camphora*)の2種を選定した。

なお、葉はサンプル置台上に葉の表を上にして隙間のないように配置した。そしてまず、葉の旧葉・新葉による反射率の違いを測定した。次に、野外で想定される環境下に葉の状態を近づけるため、上述のクスノキの新葉を対象に、以下に示す4つの環境で処理し測定を行った。設定した条件は下記のとおりである。

1. 採取直後の試料。
2. 冷蔵処理(1 : 30分)を行い、表面温度を低下させた試料。
3. 冷凍処理(-5 : 30分)を行い、凍結乾燥させた試料。
4. 園芸用霧吹きを用いて1cm<sup>2</sup>当たり1mlの水を満遍なく散布した試料。

なお、試料の採取と測定は、2007年10月に実施した。

## 結果

### (1) 光源機器別の反射率

シラカシの葉を対象として、4種類の光源(放射源)(ASD社製、Yamagiwa製バイオライト、National製ハロゲンランプ40W、60W)を用いた測定結果を図2に示す。なお、測定環境は図1に従った。その結果、波長帯が950nm~1250nmの範囲でASD社製の光源・バイオライトと、National製(40W、60W)で大きな違いが見られた。特に、

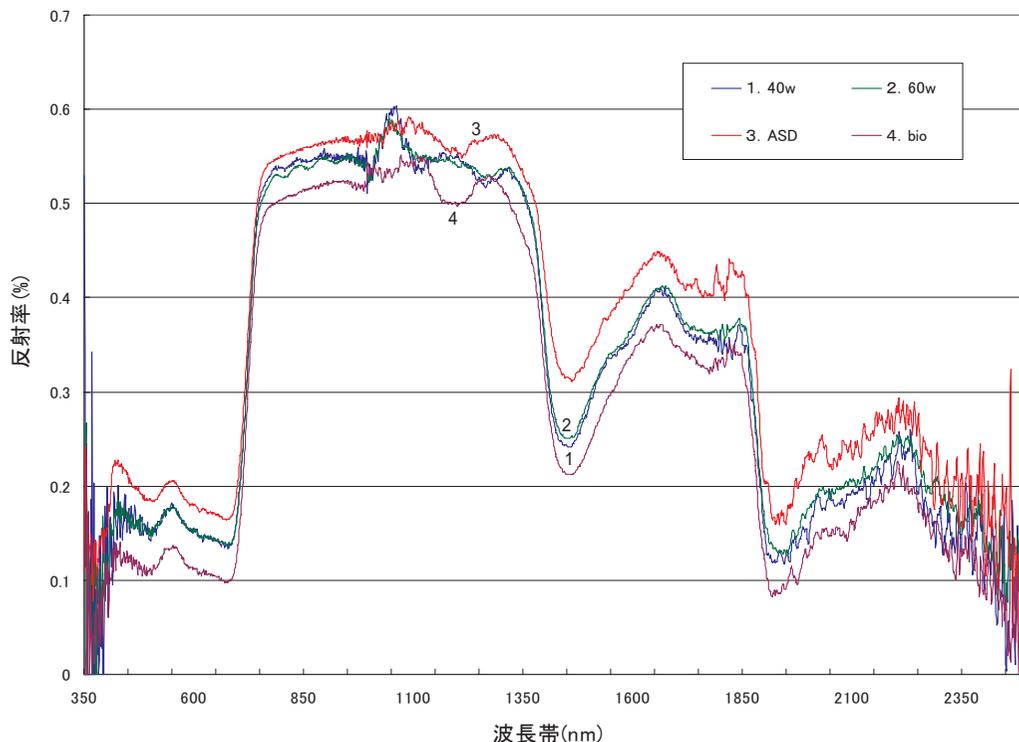


図2 放射源別の反射率

1050nm付近で、National製ハロゲンランプで測定した反射率が著しく増加する傾向が認められた(図2)。しかし、ASD社製のハロゲンランプとバイオライトには、値の多少は生じたが波形に大きな相違は生じなかった(図2)。

次に、陸域観測衛星だいち (ALOS) の搭載しているAVNIR-2センサの各観測波長帯との関係を図3に示す。なお、ALOSのミッションのうち、地球観測において地域レベルでの環境保全を目的として、植生図の把握・植生分類などの利用が行われている。AVNIR-2センサの各バンドのうち可視域に相当するBand1 (420-500nm) で、National製のハロゲンランプの波形が乱れていた(図3)。しかし、他の光源では値の変化は測定されず安定した傾向を示した(図3)。このうち、可視域で最も安定した傾向を示したASD社製光源と他の光源との関係を相関係数で示した(表1)。Band1では、光量が少ない40Wのハロゲンランプで相関

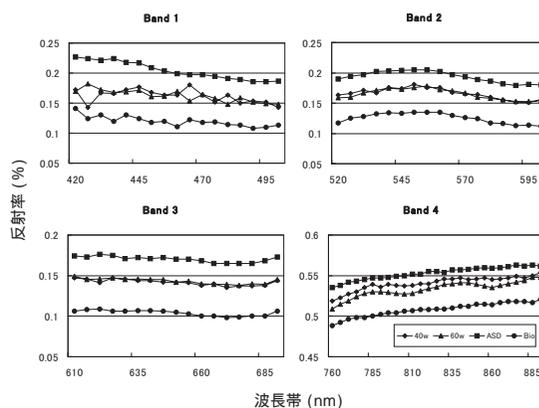


図3 放射源別の反射率 (ALOS\_AVNIR-2の各バンドとの対応関係)

表1 ASD社製光源と各光源の相関係数

AVNIR-2 Band	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	平均値	
光源	40w ハロゲン	0.396	0.970	0.881	0.943	0.798
	60w ハロゲン	0.844	0.980	0.905	0.943	0.918
	Bioライト	0.779	0.982	0.943	0.988	0.923

係数が0.396と最も低い値を示したが、対照的に光量が多く明るい60Wのハロゲンランプやバイオライトでは高い相関を示した(図3)。また、観測波長帯で見ると光源の相違が分光反射率に与える影響は可視域に集中しており、他の波長帯では光源が異なっても安定した傾向を示した(図3、表1)。

## (2) 葉の旧葉・新葉による反射率の違い

シラカシの新葉・旧葉を対象に分光反射を測定した。ここで、新葉は、林冠部から開葉した直後の薄緑の葉。旧葉は、内部に着葉した濃い緑の葉とした。なお、測定環境は図1に従った。

実験の結果、可視域においてシラカシの新葉と旧葉で顕著な違いが確認された(図4)。しかし、クスノキの新葉旧葉の反射率は類似しており変化は見られなかった(図4)。また、シラカシの旧葉は、水分の吸収帯である1450nm~1850nm付近で反射率が低くなる傾向が現れた(図4)。

## (3) 葉に水分を散布した場合・葉の表面温度(1・-5)の反射率

以下に示す4つの試料を用いて、表1の測定環境に従い計測を行った。

5. 採取直後の試料。
6. 冷蔵処理を行い、表面温度を低下させた試料(1 : 30分)。
7. 冷凍処理(-5 : 30分)を行い、凍結乾燥させた試料。
8. 園芸用霧吹きを用いて1cm<sup>2</sup>当たり1mlの水を満遍なく散布した試料。

その結果、凍結乾燥した試料の反射率が全体的に増加し、対照的に表面温度を低下させた試料では反射率が低下した(図5)。水分の吸収帯である1450nm付近の波長帯では、水分を散布したサンプルで反射率が最も低下し、冷蔵した試料がこれに次いだ(図5)。

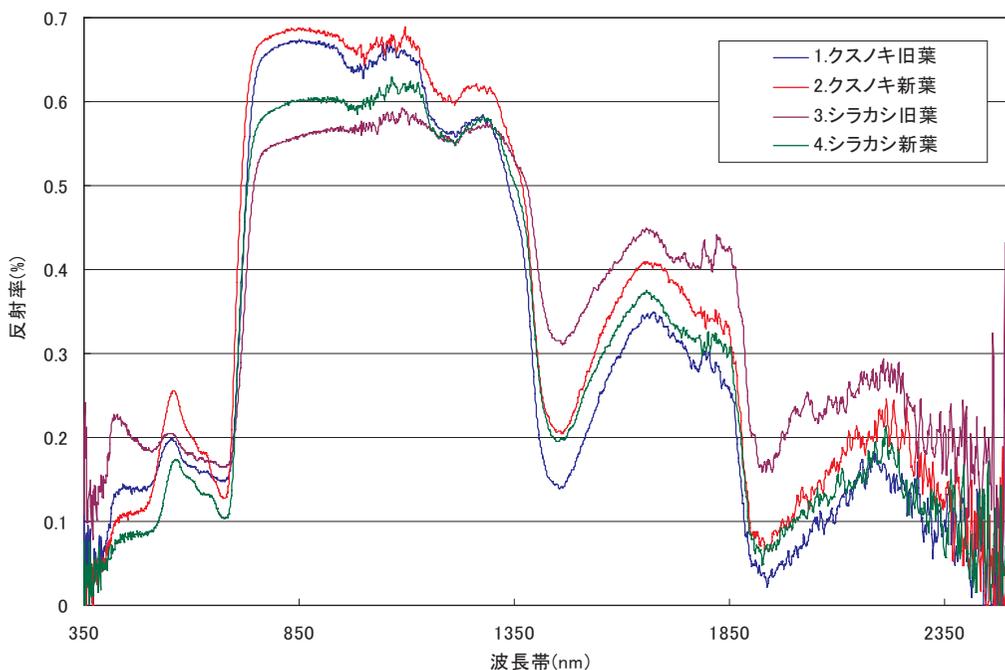


図4 常緑樹の葉齢による分光反射特性の違い

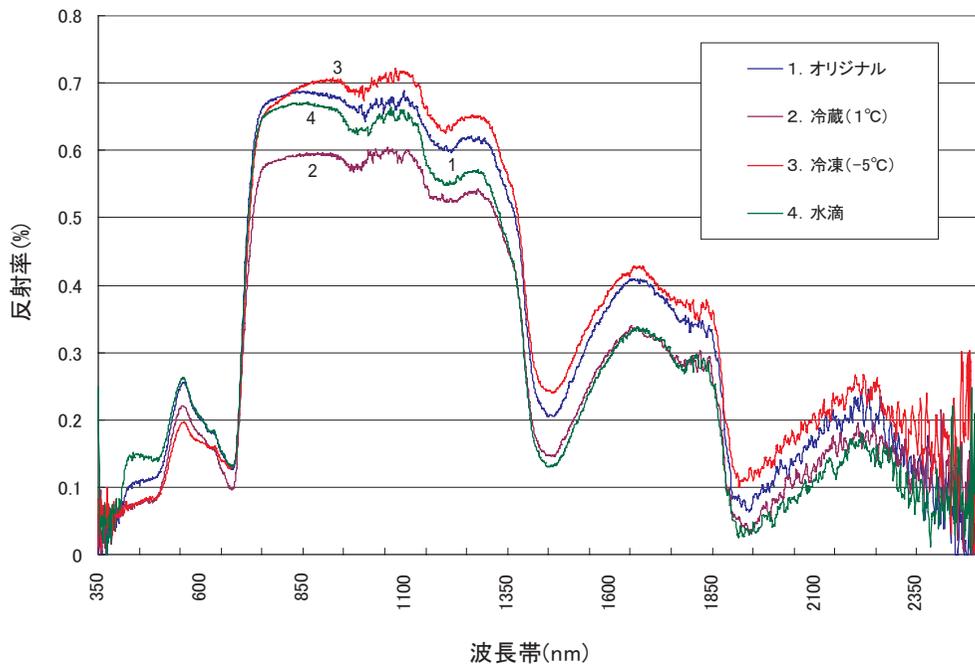


図5 葉表面の環境変化と反射率の関係

#### (4) 葉の反射率の時系列変化

光源による葉表面の変化を測定するため、同じ測定環境化(図1)で1分間隔30分間にわたって反射率の測定を行った。その結果、可視から近赤外域にかけての立ち上がり部分であるレッドエッジ付近では、可視域側に反射率がシフトする現象が確認された(図6)。さらに、時間と反射率に相関が認められ、0.1%水準で有意な傾向が現れた(図7)。

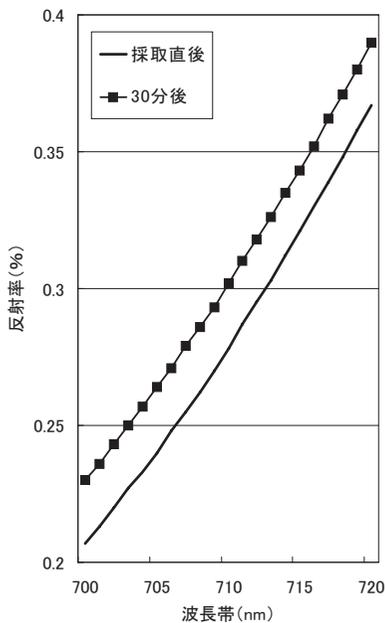


図6 シラカシ(新葉)の反射率の変化

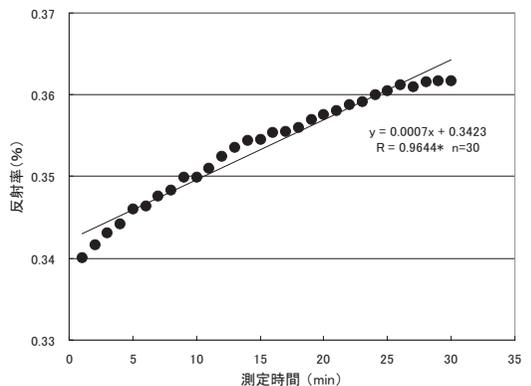


図7 シラカシ新葉の測定経過時間と反射率の関係  
\*0.1%水準で有意

## 考察

### (1) 光源機器別の反射率

4種類の光源を使用して分光反射を測定した結果、同一対象物でも光源により分光反射率が異なることが明らかになった(図2、3)。特に、National製のハロゲンランプの測定結果では、レッドエッジを抜けた950-1150nm付近で分光反射率が高くなる傾向が現れた(図3)。この現象は、ハロゲンランプが交流の電源電圧に同期して100-120Hzの明暗の変化があるため発生すると考えられる。さらに、このような光源による障害は950-1150nmの波長帯で確認された(図3)。この波長帯の電磁波は、近赤外電磁波(NIR)として正規化植生指数(NDVI: Normalized Difference Vegetation Index)など、自然環境指標の算出に利用されている(Rouse et al. 1973)。今回の実験により、光源の影響を受けやすいことが示唆され(図2、3)、NIRを利用して自然環境指標を算出する場合は、光源による影響も加味した測定が必要である。いっぽう、Yamagiwa製のバイオライトでは可視域の分光反射率が低下する傾向が現れたが、ASD社製の光源と類似した波形を示し相関係数も高くなった(図2、表1)。このような光源による障害は、バイオライトのようにフリッカーの少ない光源を測定に使用することで正確な値が得られると考えられる。しかし、葉の分光反射特性に影響を与える要因は、葉の表面形態(角度)による偏光度の違いも指摘されており(石山ほか1984)、偏光度や光量も考慮した解析は今後の課題である。

### (2) 葉の新葉・旧葉による反射率の違い

一般的に衛星リモートセンシングにおける植生タイプの分類は、落葉した冬季の樹木を除いて葉の分光反射特性が利用される。すなわち、太陽光が直接反射する樹木の林冠部の葉や側部にある葉から取得されたデータを解析していることになる。

また、樹木は効率的な光合成を行うため、光の当たりやすい場所にシュートを伸ばし、枝の先端部や側部に光合成能力の高い新葉が付いている場合が多い(菊沢1999)。したがって、今回の実験で得られた常緑樹の新葉と旧葉による分光反射特性の違いは(図4)、試料採取や野外測定時に考慮する必要があり、衛星データを利用した植生区分の分類精度に影響を与えることが考えられる。

吉村(1998)は、落葉樹を対象として葉齢(黄葉・紅葉)の分光反射特性の顕著な変化は、可視域に現れることを報告しており、衛星データにより紅葉現象を利用した植生区分を行う際には可視域バンドの使用を推奨している。本報告でもシラカシの新葉・旧葉による葉齢の違いは可視域の波長帯で顕著な変化が確認されことから(図4)、常緑樹においても葉齢の影響は可視域に現れやすいことが明らかとなった。しかし、常緑樹は落葉樹と比べて可視域の季節変化が乏しく、葉齢を考慮してもシラカシとクスノキの分光反射特性は類似していた(図4)。したがって、衛星データにより常緑樹の樹種区分を行うには、樹種別の分光反射特性のデータベース化のほか、分類精度の向上に有効な生化学量(クロロフィル、リグニン、水分、タンパク、窒素量など)の基礎的なデータの収集が必要である。

### (3) 葉に水分を散布した場合・葉の表面温度

#### (1 - 5)の反射率

実験の結果、1に葉の表面温度を低下させたサンプルでは、水分の吸収帯で反射率が低下したものの、全波長帯における反射率の増大は確認されなかった(図5)。対照的に、葉の表面温度を-5に低下させ凍結乾燥処理を行った試料では、全波長帯において反射率が増大した(図5)。向井(2004)は、低温によるストレスは葉表面の凍結がもたらす乾燥によって発生することを報告している。また、この凍結による影響は反射率の増加を引き起こすことが明らかとなっている(西田

ほか 2000 ; 北尾 2004)。今回の実験結果でも同様の現象が確認された (図 5)。したがって、冬季の凍結乾燥は常緑樹の分光反射特性に影響を与えており、野外測定時に考慮する必要がある。また、表面温度の低下 (1 )、水分を散布した試料の分光反射特性は、可視域での変化は少ないが水分の吸収帯において反射率が低下した (図 5)。このような目視で確認しにくい葉表面の変化は、野外測定時、特に注意する必要がある。

#### (4) 葉の反射率の時系列変化

図 4、5 に示されているように、葉の分光反射曲線は670nm付近の相対的に反射が低くて平坦な部分と、それに続く685nmでの反射が急激に増加するシャープな立ち上がり部分、そして780nm以降の高い反射で平坦な部分によって特徴付けられる。この可視から近赤外域にかけての立ち上がり部分がレッドエッジと呼ばれる領域である (本郷ほか 1998)。この領域では、対象となる植物体が一定の水分ストレスを受けると、可視域側に分光反射がシフトするブルーシフトと呼ばれる現象が起こる事が報告されている (本郷ほか 1998) 今回の報告でも、同様の現象が認められた為 (図 6)、測定に用いる光源により葉がストレス反応を起こしていることが考えられる。さらに、レッドエッジ付近で測定時間と分光反射率には有意な関係が認められた (図 7)。したがって、測定時間が長くなれば植物体は光源から発生する熱により葉表面の乾燥等のストレスを受けていることが推測できる。このような現象は、野外から採取したサンプルを室内で測定する場合に考慮するべきであり、分光反射特性に影響を与えることが考えられる (図 6、7)。

#### まとめ

本稿では、光源別の反射率や野外で想定される環境変化が樹木単葉の分光反射特性に与える影響

を報告した。ただ、実験結果の解析は、グラントゥールースデータを利用した植生区分のための基礎的なデータを収集することが目的であり、葉内部の生態生理学的な構造が分光反射特性に与える影響やその要因までは言及していない。

また、近年ではハイパースペクトラル衛星の運用が開始されたものの、データ量が膨大なために、従来の解析手法では分類精度が低下することが明らかとなっている (加藤・飯坂 2007)。同様に、今回の実験で得られた分光反射データもデータ量が膨大なため、図表にその特性がうまく表現できていない部分もある。今後はハイパースペクトラルデータの低次元化や特徴抽出などの簡易的な処理方法の検討が必要である。

本実験で使用した機材は、平成13年度「私立大学研究設備等補助金 ; 21世紀型地球観測衛星による地球環境の評価と基礎データの収集」および平成16年度「私立大学研究設備整備等補助金 ; デジタル三次元計測システムを使った環境変化の計測と評価」等で購入したものである。機器購入にあたり、お骨折りいただいた国土館大学および文学部をはじめとする諸機関に感謝申し上げます。また、この本稿は、大学院人文科学研究科、地理・地域論系の「地理・地域論演習」等の講義の一環としておこなった研究をもとにしている。

本稿は、講義で長谷川が提案した課題をもとに藤田が実験を行い、その結果を藤田が中心となって執筆した。その後、長谷川と後藤が足りない部分を書き加えるとともに全体を調整した。

なお、本報告をとりまとめるにあたっては、国立環境研究所 主任研究員 山野博哉博士に貴重なご助言を頂いた。また、実験にあたっては国土館大学地理学教室の皆様が協力して頂いた。以上の方々に厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 島田沢彦 (2007) : リモートセンシングの原理, 長澤良太・原慶太郎・金子正美 編「自然環境解析のためのリモートセンシング・GISハンドブック」, 古今書院, 256pp.
- 長谷川均 (1998) : 「リモートセンシングデータ解析の基礎 The ABCs OF RS」, 古今書院, 138pp.
- 加藤正人・飯坂譲二 (2007) : 航空機ハイパーデータによる針葉樹区分, 写真測量とリモートセンシング, Vol.46, No.5, p19-24.
- 石山隆・土屋清・岡山浩 (1984) : 葉の分光反射および偏光特性, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.4, No.3, p15-21.
- 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欠乏症との関係, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.20, No.3, p6-16.
- 山本晴彦・鈴木義則・早川誠而 (1995) : 植物葉の重なり, 厚さ, 水分量が分光反射特性に及ぼす影響, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.15, No.5, p45-52.
- Roger M. McCoy (2005) : Field Methods In Remote Sensing, Guilford Pr, pp159.
- 本郷千春・小林達明・有田ゆり子 (1998) : 分光反射特性からみた樹木の水ストレス反応, 写真測量とリモートセンシング, Vol.37, No.4, p43-50.
- 長谷川均・後藤智哉・藤田泰文 (2007) : 国土館大学地理学教室におけるリモートセンシング教育について, 国土館大学人文学会紀要, No.39, p1-18.
- 松山 洋・北村彩子・泉岳樹 (2006) : 空間分布を考慮した大気補正による衛星データからの地表温度の推定, 地学雑誌, 11.5, p606-625.
- 布和敖斯尔・高田雅之 (2006) : リモートセンシングとGIS技術の環境分野への応用 - 衛星データの  
大気補正の効果と現場検証 -, 衛星リモートセンシング地域応用成果報告 (環境分野), p37-42.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D. W. and Harlan, J.C (1973) : Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, Third Earth Resource Technology Satellite-I Symposium, NASA SP-351, Vol.1, p309-317.
- 菊沢喜八郎 (1999) : 「森林の生態」, 共立出版, 198pp.
- 吉村晴佳 (1998) : 葉齢による樹葉の近赤外域分光特性と重なる効果, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.18, No.1, p42-56.
- 向井讓 (2004) : 低温条件化で樹木が受ける光ストレスとその防御機能, 日林誌, Vol.86, No.1, p48-53.
- 北尾光俊 (2004) : 樹木の光合成に及ぼす環境ストレスの影響, 日林誌, Vol.86, No.1, p42-47.