

## 4-6 樹木活性度計測技術

依田康宏、堀場隆広、松生秀正、山本昌治、盛田耕作、今西秀明（愛知県産業技術研究所）

倉橋洋一（愛知県西三河水道事務所）

松永重信（（財）科学技術振興事業団（独）科学技術振興機構 研究成果活用プラザ東海）

### 1. 研究の目的と概要

森林樹木の生態の中でも、樹木の活性度は活力又は健康度と言われ、樹形、葉色、葉形、葉の大きさ等から診断される。樹木の活性度を観測することは、樹木が健康に成長しているかを判断する重要な手がかりとなるが、一般に活性度等の森林樹木の生態計測は、専門家により多くの時間をかけ、非定量的、非効率的な方法で行われているのが現状である。

本研究では、樹木全体の活性度の効率的な計測が行えるように可視光領域にも感度を持つ CCD カメラを使って可視光画像を入力し、スペクトル特性から画像処理により樹木全体の活性度画像を求めた。

開発したシステムにより樹木の活性度画像を表示したところ、活性度のある樹木の判別が可能なことを確認できた。活性度は一般に近赤外領域を用いて測定することが多いが、可視光領域の画像だけでも、活性度の評価ができることを確認した。

また、年間を通して桜の木を計測したところ、桜の開花、緑葉、紅葉、落葉等の活性度の違いに基づく季節の変化が見られた。更に、常緑樹と落葉樹を計測したところ、活性度の違いに基づく相違が見られ、システムにより樹木の活性度の測定が可能であることを確認した。

### 2. フェーズ I の成果

#### 2-1. 目的及び目標

植物の活性度を観測することは、森林樹木や農作物が健康に成長しているかを管理するための手がかりとなるが、一般に多くの時間をかけ、非定量的、非効率的な方法で行われているのが現状である。樹木の活性度に対する定量的な計測としては、葉緑素計による測定や、分光放射計を用いて反射スペクトル特性を計測する方法<sup>1)</sup>等が知られているが、葉緑素計や分光放射計による計測は、樹葉の一部を計測しているため、樹木全体の活性度を効率的に計測することはできない。

本研究では、スペクトル特性から画像処理により樹木全体の活性度画像を求め、活性度の効率的な計測を行うシステムを開発することを目標とした。また、屋外での特定樹木の季節を通じた測定や、樹木間での活性度の比較をし、システムにより樹木の活性度の変化や相違を測定することを目標とした。

#### 2-2. 方法及び結果

##### 2-2-1. 樹木活性度評価方法の原理

図 1 は分光放射計により測定した健康な葉と不健康な葉の分光反射率を示している<sup>2)</sup>。550nm 付近は光合成を行うクロロフィル a の含有量によって反射率が変化することが知られている波長であり、健康な葉は不健康な葉と比較して反射率が大きい。680nm 付近はクロロフィル a の吸収率のピーク波長であり、健康な葉では反射率が極小となるが、不健康な葉では反射率が小さくならないことが分かっている。780nm は可視光領域の上限値波長であり、健康な葉は不健康な葉と比較して反射率が大きい。また、880nm は近赤外領域の波長であり図の範囲外であるが、550nm、780nm と同様に健康な葉は不健康な葉と比較して反射率が大きいことが知られている。

これらの樹木の反射スペクトル特性を利用して、樹木の活性度を評価する。RVI (Ratable Vegetation Index) が近赤外領域を利用した指標として知られており<sup>1)</sup>、活性度を評価するときによく用いられるが、ここでは以下の指標を定義する。

$$RI = \frac{780\text{nm における反射輝度}}{680\text{nm における反射輝度}} \quad (1)$$

$$RVI = \frac{880\text{nm における反射輝度}}{680\text{nm における反射輝度}} \quad (2)$$

RI、RVI の何れも、樹木が健康で活性度が大きいほど指標値が大きくなる。

屋外での樹木の活性度を評価する場合、太陽光の強度変化、スペクトル変化の影響を除くように、反射輝度を白色板の反射輝度で除した反射率を用いることが多い。反射率を求めるためには屋外で測定するときにも白色板を同時に撮影しなければならない不便性と、短い測定時間の間に太陽光が大きく変化することは少ないこと等から、本研究では反射輝度を用いて活性度の指標を定義した。ただし、季節や時間帯の違いによる太陽光のスペクトル分布への影響は避けられないので、異なった日、時間に測定したデータによる活性度の定量的比較には誤差が伴うと考えられる。

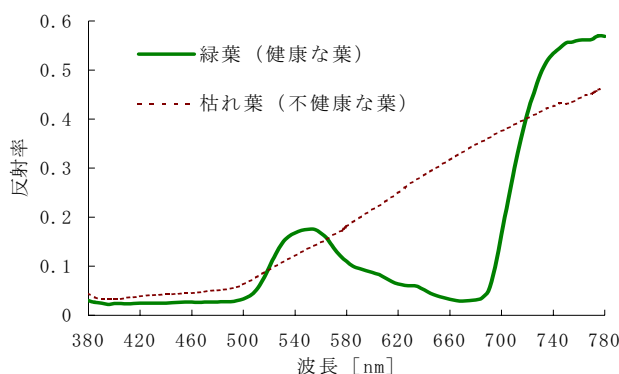


図1 樹葉の分光反射率特性

## 2-2-2. システム構成及び測定方法

### 2-2-2-1. 固定設置型システム

図2は研究所内で固定点に設置し、測定するための樹木活性度計測システムの構成図である<sup>3)</sup>。カラーCCDカメラ(以後、カラーカメラと呼ぶ。)は観察用に用い、近赤外CCDカメラ(以後、近赤外カメラと呼ぶ。)は樹木活性度計測用に用いる。近赤外カメラの前には680nm、780nm、880nmのフィルタを装着した回転板が設けられ、リモートサーバからステッピングモータを回転制御することにより任意のフィルタが選択可能となっている。なお、680nm、780nm、880nmの各フィルタとして、中心波長がそれぞれ、 $676 \pm 2\text{nm}$ 、 $780 \pm 2\text{nm}$ 、 $880 \pm 2\text{nm}$ 、半値幅が $10 \pm 2\text{nm}$ のものを使用している。

これらカラーカメラ、近赤外カメラは電動雲台上に設けられており、リモートサーバから電動雲台のパン、チルトの制御をすることにより、カラーカメラ、近赤外カメラを任意の方向に向けて回転することができる。

開発システムの入出力信号のブロック図を図3に示す。制御ボードからステッピングモータのドライバに制御信号を送信することにより、ステッピングモータを回転できる。また、制御ボードから近赤外カメラに接続した制御回路に制御信号を送信することにより、近赤外カメラのズーム、フォーカス、アイリスが制御できる。近赤外カメラからのビデオ信号はビデオケーブルを介してモノクロ画像

処理ボードに入力され、リモートサーバ上に表示される。

同様に、カラーカメラからのビデオ信号はビデオケーブルを介してカラー画像処理ボードに入力され、リモートサーバ上に表示される。また、カラーカメラは、RS-232C ポート 1 からバイナリ形式のコマンドを送信することによりズーム、フォーカス、アイリスが制御できる。電動雲台は、RS-232C ポート 2 からアスキー形式のコマンドを電動雲台のドライバに送信することによりパン、チルトが制御できる。

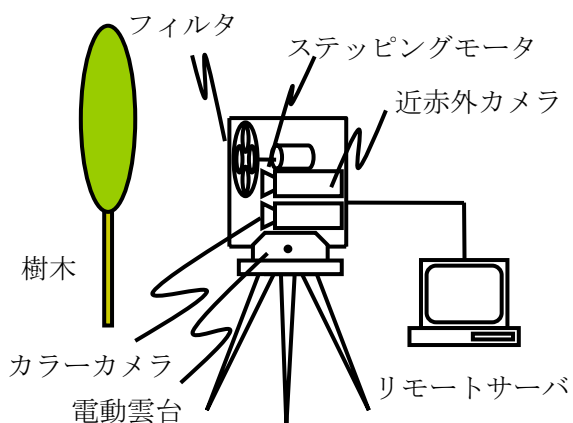


図2 固定設置型システムの構成図

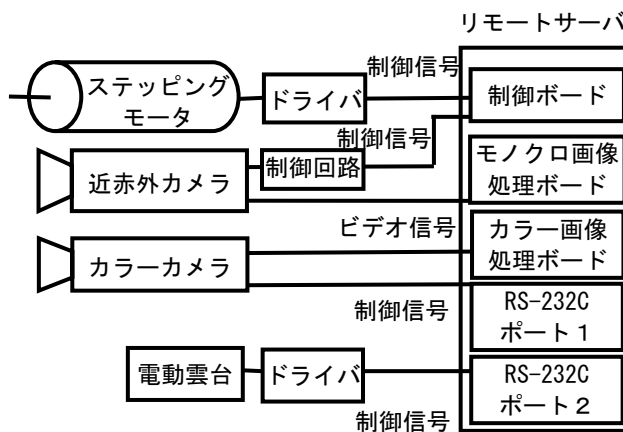


図3 固定設置型システムのブロック図

### 2-2-2-2. 携帯型システム

開発した固定設置型システムは、フィルタをステッピングモータにより回転するためデータを自動測定できる、雲台をリモート操作できる等の利点があるが、重量的に場所を移動して測定することは困難なため、部品数を減らした携帯可能なシステムも用意した<sup>4)</sup>。図4、図5はそれぞれ携帯型の樹木活性度計測システムの構成図、ブロック図を示し、カラーカメラ、ノートパソコン、ノートパソコン用ビデオキャプチャカードから構成され、カラーカメラの前面にはフィルタホルダを設け、手動で680nm、780nm、880nmのフィルタが取り替え可能である。カラーカメラ1台で、通常の画像と、フィルタを通した活性度評価用の画像の両方が撮影可能となっている。

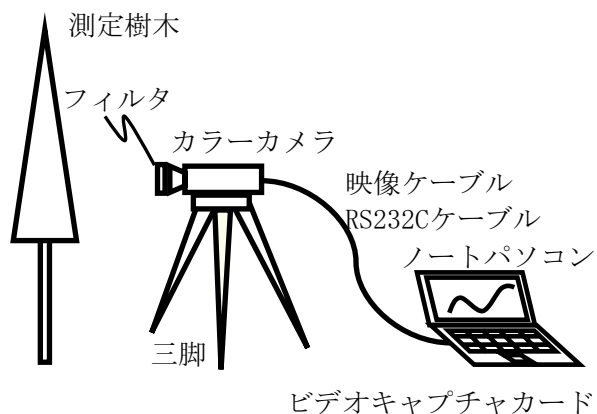


図4 携帯型システムの構成図

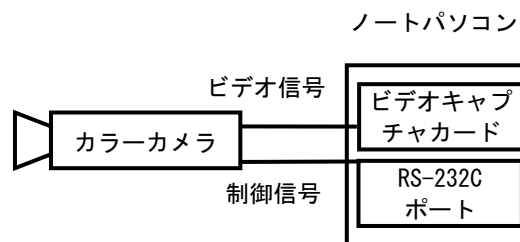


図5 携帯型システムのブロック図

### 2-2-2-3. ソフトウェア構成

ソフトウェアは、Java 言語 (Java2 SDK 1.4) により開発した。また、固定設置型システムの画像処理ボード、制御ボードの処理はC言語で記述し、Javaのネイティブメソッド呼び出し用ライブラリであるJNI (Java Native Interface)を利用してC言語で記述した処理を呼び出している。RS-232Cによ

る通信は、RS-232C 用 Java 拡張ライブラリである Communication API を利用している。

図 6 に固定設置型システムで近赤外カメラの画像表示、制御を行う画面を示す。近赤外カメラの画像データを表示する画面では、画面上のボタンを押すことにより、電動雲台が上下左右方向に動き、フィルタを装着した回転板が回転する。また、画面上からズーム、フォーカス、アイリスが制御でき、この画面に表示された各フィルタを介した近赤外カメラの画像は保存可能である。

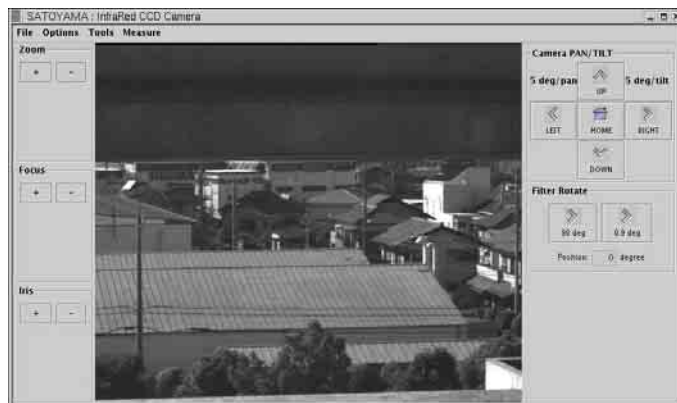


図 6 近赤外カメラ画像表示・制御用の画面

#### 2-2-2-4. カメラ、フィルタの感度補正

(1)、(2)式の RI、RVI の算出を行うときにカメラの輝度値データを利用するため、カメラの基本性能を確かめるための測定を行った。図 7 はシャッター速度とパソコン上の画像データの輝度値との関係を示した図であり、光源として白色電球 3 個を使用し、近赤外カメラとカラーカメラのシャッター速度を変化させてアクリル製白色板を測定した。

横軸のシャッター速度は光量に比例するため、図 7 は入射光量に対して画像輝度値がどれくらいの大きさに反応するかを示している。近赤外カメラは  $\gamma$  値=1.0、カラーカメラは  $\gamma$  値=0.45 であるため、それぞれ画像輝度値は光量の 1 乗、0.45 乗に比例する項を仮定し、画像輝度値= $\alpha \cdot$  光量+ $\beta$  (近赤外カメラ)、画像輝度値= $\alpha \cdot$  光量<sup>0.45</sup>+ $\beta$  (カラーカメラ) の式に最小 2 乗法により近似した結果、以下の結果を得た。

$$\text{画像輝度値} = \alpha \cdot \text{光量} + 26.0 \quad (3)$$

$$\text{画像輝度値} = \alpha \cdot \text{光量}^{0.45} - 68.7 \quad (4)$$

また、フィルタをカメラの前に置き、同様に白色板を測定した。図 8 はカラーカメラのフィルタを通したデータを示し、近赤外カメラ、カラーカメラそれぞれ(3)、(4)式に近似してフィルタごとの  $\alpha$  の値を求めた (表 1)。ここで、 $\alpha$  はフィルタの透過率とカメラの分光感度との積に対応した値と考えられる。

RI、RVI を算出する際には、(3)、(4)式および表 1 を利用し、画像輝度値を補正した光量を反射輝度として用いる。画像輝度値は 8 ビット(0~255)の値をとるが、カメラに対し光量が飽和して白くなっているデータや、光量が少なく暗すぎるデータを避けるため、測定したデータは 50<画像輝度値<230 のデータを使用した。

樹木活性度の演算は、各フィルタを介して撮影した各スペクトル画像 (以後、マルチスペクトル画像と呼ぶ。)を基に、画像間の対応する画素ごとに (1)、(2) 式の輝度の演算を行い、RI、RVI の樹木活性度の分布画像 (以後、活性度画像と呼ぶ。)を求める。

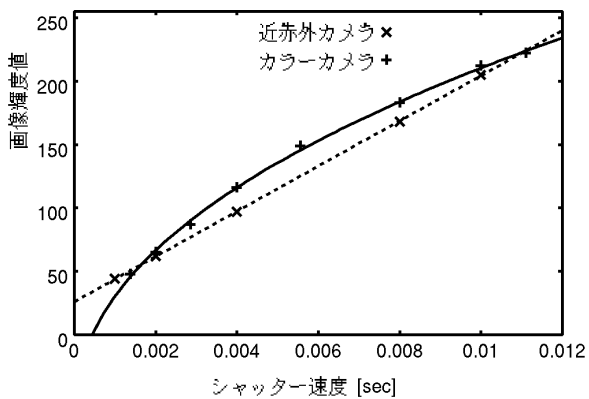


図7 シャッター速度と画像輝度値の関係

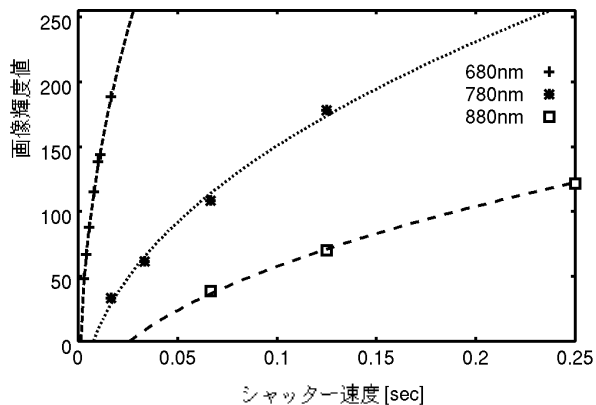


図8 フィルタ追加時の関係 (カラーカメラ)

表1 フィルタを入れたときの係数

	近赤外カメラ係数 $\alpha$ (比)	カラーカメラ係数 $\alpha$ (比)
680nm	1.0	1.0
780nm	1.07	0.38
880nm	0.50	0.21

#### 2-2-2-5. ダイナミックレンジを広げた測定方法

樹木を測定するときに、絞りやシャッター速度等のカメラの条件を変更してしまうと、正しく RI、RVI が求められないため、ある樹木を測定している間は、フィルタを交換しても条件を一定にして測定を行う。しかし、全てのフィルタで適切な光量になるように、同一条件で測定するのは難しい。

例えば、図9は条件一定 (シャッター速度=1/250 秒) で 680nm と 780nm のフィルタを入れて測定した近赤外カメラの画像データであるが、樹木の部分に注目すると、680nm の画像は暗く、780nm の画像は明るい。更に、影の当たっていない部分と当たっている部分とで明るさの差が大きくなってしまふ。

そこで、シャッター速度を変えて複数の画像を測定し、画素ごとに適切な光量のデータだけを利用して、活性度画像を合成する方法を検討した。適切な光量の範囲は、 $50 < \text{画像輝度値} < 230$  とし、同じ画素位置で適切な光量のデータが複数ある場合には、画像輝度値の高いデータを利用した。

ただし、シャッター速度の条件を変更すると、そのままでは RI、RVI を算出する値としては用いることができない。反射輝度は単位時間当りの値なので、(1)、(2)式の反射輝度として、光量をシャッター速度で割った値を用いて RI、RVI を計算した。



(a) 680nm

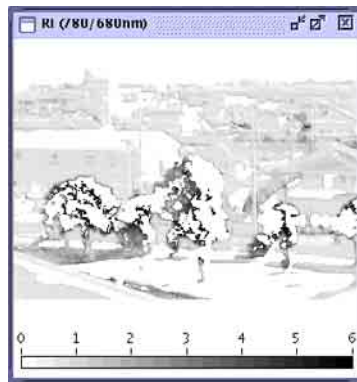


(b) 780nm

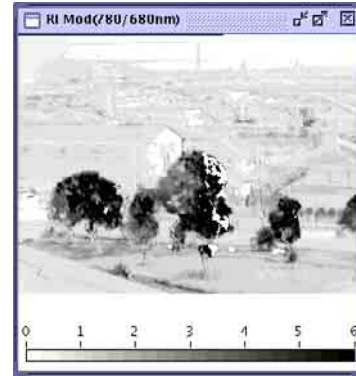
図9 条件一定の測定画像例

図10は図9の1/250秒のデータのみを用いて活性度画像(RI)を算出したもの(図10(a))と、1/100、1/250、1/500秒の複数のデータを用いて算出したもの(図10(b))である。50<画像輝度値<230のデータがないものは白表示しているため、特に図10(a)では樹木の部分が評価できていない。

50<画像輝度値<230以外のデータを用いて算出すれば、図10(a)でもある程度の値が算出されるが、光量が飽和しているデータ等を使用することになり、実際の値と異なってしまう。それと比較し、図10(b)では樹木の大部分の活性度が評価できており、影等があってもダイナミックレンジの広がった測定ができ有用であると考えられる。



(a) 条件一定で算出



(b) シャッター速度を変えて算出

図10 活性度画像(RI)例

ダイナミックレンジを広げた測定は有用であることを確認したが、以降の測定結果では、樹木の活性度を年間を通して計画的に測定しており、シャッター速度を変えた複数の画像は測定していない。

## 2-2-3. 測定結果

### 2-2-3-1. 鉢植えの測定

樹木活性度計測システムの基本性能を確認するために、緑色の濃い樹葉のある健康なシラカシの鉢植えと、やや黄色がかった樹葉のある不健康なシラカシの鉢植えとを、固定設置型の近赤外カメラを用いて測定した。比較のために、葉緑素計(ミノルタ(株)SPAD-502)により10枚の葉をそれぞれ測定し平均したところ、健康な鉢植え、不健康な鉢植えの葉緑素計値はそれぞれ38.1、27.5であった。葉緑素計値は値が大きいほど活性度が大きいとされる。

図11は測定したマルチスペクトル画像を示しており、測定時には、左側に健康な鉢植え、右側に不健康な鉢植えを配置した。マルチスペクトル画像を撮影するとき、近赤外カメラの撮影条件一定としており、近赤外領域における近赤外カメラの感度及びレンズの透過率が低いため、880nmのフィルタを通した画像は全体として暗い。

図12は算出したRI、RVIの活性度画像を示している。RI、RVI=0~6の範囲で、RI、RVIの各指標値の大きさをそれぞれ濃淡で表示している。RI、RVIの何れの活性度画像も、不健康な鉢植えと比較して健康な鉢植えの樹木の部分の指標値が高く表示され、活性度の違いが識別可能である。特にRIの活性度画像については、健康な鉢植えが背景や不健康な鉢植えからはっきりと区別されて表示されることが分かる。

また、写真の左側が屋外であり、左側から日光が差し込んでいたが、鉢植えを左右入れ替えて同じように測定しても健康な鉢植えのRI、RVIの各指標値が大きい結果が得られた。このことから、太陽光の照度の違いによる活性度画像への影響は見られないことが確認できた。

また、活性度を評価する方法としては、近赤外光領域を利用した RVI を用いることが多いが、今回の結果から、可視光領域だけを用いた RI でも活性度の違いが判別できることを確認できた。

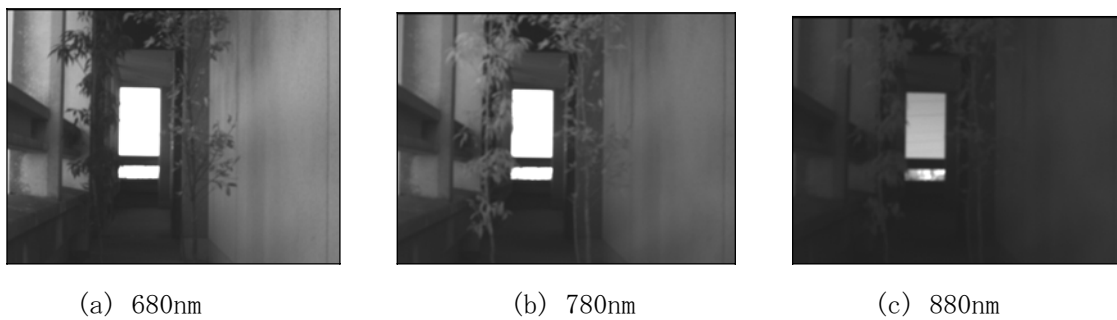


図 1 1 シラカシの鉢植えのマルチスペクトル画像

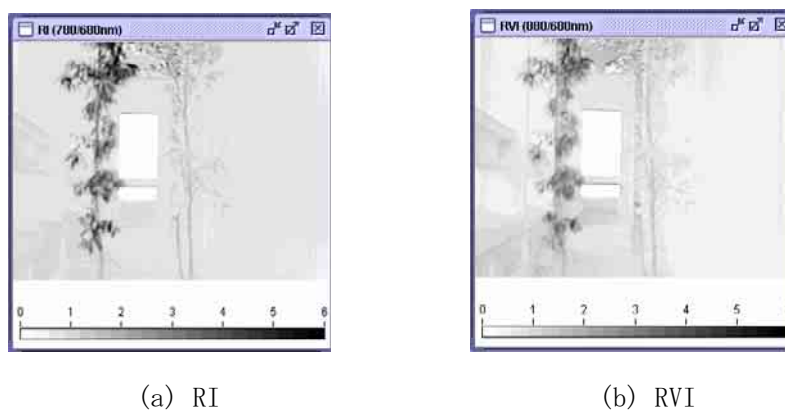


図 1 2 活性度画像による樹木の比較

### 2-2-3-2. 桜の測定（季節を通した測定）

近赤外カメラを用いて、年間を通して桜の木の測定をした。図13は桜のRVIの活性度画像を濃淡表示したものであり、図14は適当な指定範囲のRVI（平均）の経時変化を示す。680nm、880nmの元画像が50<輝度値<230の範囲外であるときは、その部分を白表示している。

桜が満開のとき（2002年4月5日）にはRVIは低いが、花が散って葉が出てくるとRVIが徐々に高くなる。若葉だけのとき（4月18日）は葉が濃い緑色になり、RVIが高くなった。その後RVIは高く、紅葉したとき（11月12日）はRVIが低くなった。落葉したとき（12月3日）にはRVIが最も低くなり、背景との区別がつかなくなった。

このように、桜の開花、緑葉、紅葉、落葉等の特徴のある時期には、開発したシステムにより、活性度の違いに基づく季節の変化が見られた。ただし、4月中旬から10月までの緑葉のときにRVIの変動が大きい、太陽光強度、スペクトルの変動等も含めたシステムによる測定誤差の影響が考えられる。



(a) 4月5日（満開） (b) 4月18日（緑葉） (c) 11月12日（紅葉） (d) 12月3日（落葉）

図13 桜の活性度画像（RVI）

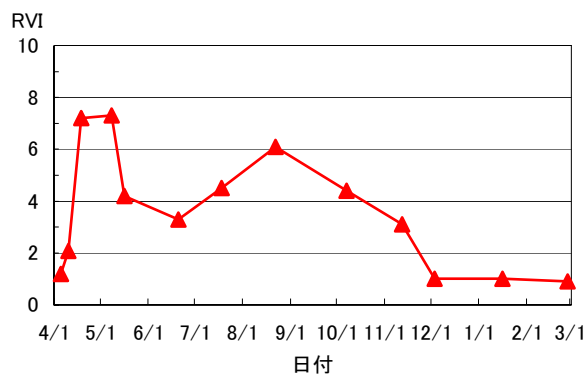


図14 桜のRVI値の経時変化



### 2-2-3-3. 産業技術研究所内での測定（季節を通した測定）

次に、産業技術研究所内で樹木の活性度評価を試みた。図15はカラーカメラにより測定した樹木の活性度画像（RI）を示している。丸い線の部分が落葉樹のラクウショウ、長方形の線の部分が常緑樹のクスノキである。680nm、780nm の元画像が  $50 < \text{輝度値} < 230$  の範囲外であるときは、その部分の活性度画像を白表示している。

2002年10月22日ではラクウショウ、クスノキ共にRIが高いが、11月6日はラクウショウが黄葉してRIが低くなった。また、ラクウショウが落葉したとき（12月3日）にはラクウショウのRIが最も低くなった。常緑樹のクスノキは期間を通してRIが高かった。

また、図16に落葉樹のラクウショウ、クヌギ、常緑樹のクスノキ、シラカシの活性度画像の適切な範囲のRI（平均）の経時変化を示す。落葉樹のラクウショウ、クヌギは11月の初旬には黄葉し、RIも次第に低くなっていくが、常緑樹のクスノキ、シラカシはグラフの期間を通して高い値を保っている。なお、クヌギの12月以降のデータは枝だけになり樹葉がないので省略してある。

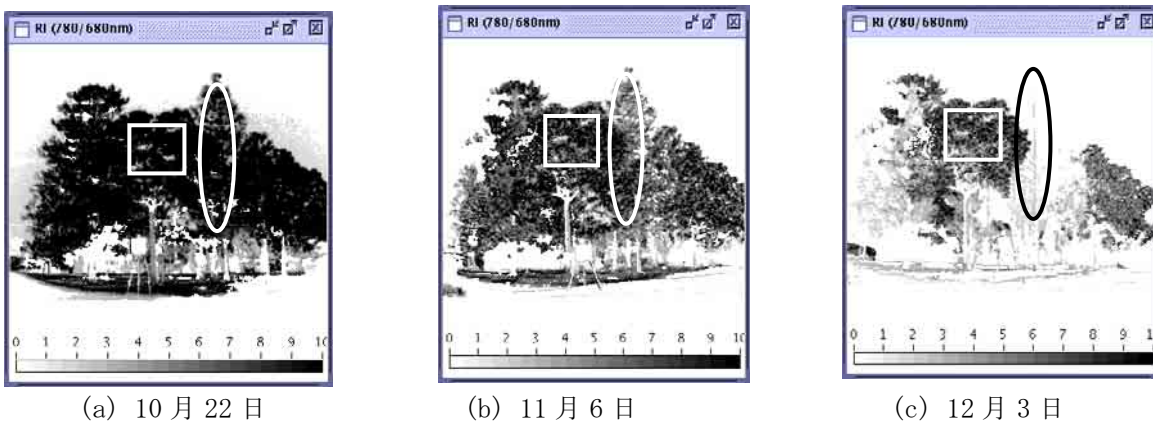


図15 常緑樹と落葉樹の活性度画像(RI)

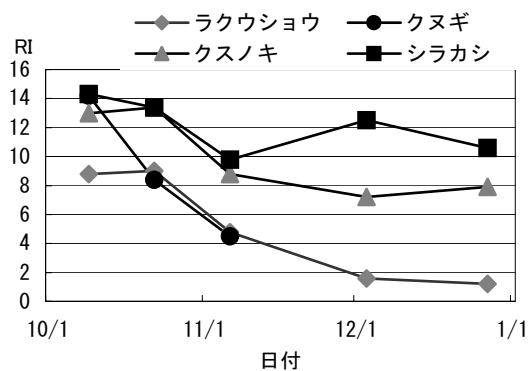


図16 常緑樹、落葉樹のRI値の経時変化

### 2-3. 考察及びフェーズⅠのまとめ

本研究では、遠隔地の樹木の活性度を効率的に計測するために樹葉の反射光スペクトル特性を利用して光学的に測定するリモート画像センシングシステムを開発した。活性度画像を指標値の大きさに応じて表示したところ、樹葉の部分が背景と明瞭に区別され、開発したシステムにより樹木の活性度画像を表示し、活性度のある樹木の判別が可能であることを確認できた。

開発したシステムでは、カメラ、フィルタの感度を考慮した補正を行い、ダイナミックレンジを広げて活性度を算出する方法を検討し、活性度の評価の向上に有用であることを確認した。活性度を評価する方法としては、近赤外光領域を利用した RVI を用いることが多いが、可視光領域だけを用いた RI でも活性度の違いが判別できることを確認できた。

また、年間を通して桜の木を計測したところ、桜の開花、緑葉、紅葉、落葉等の活性度の違いに基づく季節の変化が見られた。更に、システムを携帯可能な構成とし、愛知県産業技術研究所内でクスノキのような常緑樹とラクウショウのような落葉樹とを測定したところ、緑葉のときは同じであったものが、黄葉すると活性度の相違が見られた。

ただ、今回のシステムの測定では緑葉のとき等の活性度指標値が高いときの値に不確定さが見られた。また、活性度指標値は葉面積等の他の要因からも影響を受けると考えられるので、他の要因からどのような影響があるかを検討する必要がある。

### 文献

- 1) 森脇康文, 古川郁夫: 鳥取大学農学部演習林研究報告, **24**, 55(1996)
- 2) 倉橋洋一, 堀場隆広, 盛田耕作: 愛知県工業技術センター報告, **37**, 4(2001)
- 3) 依田康宏, 堀場隆広, 盛田耕作: 愛知県産業技術研究所研究報告, **1**, 21(2002)
- 4) 依田康宏, 山本昌治, 浅井徹, 松永重信: 愛知県産業技術研究所研究報告, **2**, 24(2003)

### 3. フェーズⅡの成果

当研究テーマは計画どおり達成し、フェーズⅠで完了した。