

植物の紅葉過程に着目した環境のモニタリング（第1報）

—葉色変化の定量的評価手法の開発—

松本 太・中村 圭三

1. はじめに

植物の開花、紅葉、落葉などは気象の季節的な変化に伴う植物の変化であり、植物季節とよばれている。気候環境に敏感に反応する植物季節を観察することは『気候』、『風土』といった環境をモニタリングする方法として有効である（Clements and Goldsmith, 1924；吉野, 1961；沼田, 1974）。日本ではサクラの開花が作物の播種期、植付け時期など農作業を決める指標としてよく用いられてきた。植物季節は安価でわかりやすい指標であり、比較的多数の個体の観測値を得ることができる。

近年、都市域では地球温暖化に呼応するように春季の開花が早くなったり、秋季の紅葉が遅くなったりするなど、植物季節に変化が見られるようになったといわれている（Yoshino and Park, 1996；百瀬, 1997）。こうした植物季節の変化もまた、温暖化などの気候変化や都市のヒートアイランドといった気候環境を表す指標となりうると考えられる。今後、地球温暖化やヒートアイランドなどの環境問題が植物だけでなく、夏季の熱中症や熱帯夜の増加などの形で人間生活に影響を及ぼすことが懸念される。地域レベル（ローカスケール）で人間を含めた生物の活動、生態系への

影響をモニタリングすることは上記の環境問題への対策を考えるうえで、より重要になってくるものと考えられる。

環境を表す指標としての紅葉を考えると、葉色の変化を客観的に表現しにくいことが問題点として挙げられる。松野・山中（1951）は色票を用いて菅平盆地におけるカラマツの黄葉の局地差を表現している。また、松本・福岡（2002）は埼玉県熊谷市において、色名帳および写真撮影によってイチョウとイロハカエデの紅葉日を同定し、それらを指標として、都市気候環境の評価を試みている。また、松本（2004, 2005）はイロハカエデの紅葉過程に着目し、葉色の変化と葉緑素の減少との間に関係があることを明らかにしている。しかし、紅葉過程における葉色の変化は写真や色名帳による目視だけでは細部まで正確に捉えがたい面があり、数値を用いて客観的に表現すること、すなわち定量化するまでには至っていない。

そこで、本研究ではイチョウ、イロハカエデ、オオモミジの紅葉過程に着目し、色彩色差計、葉緑素計などによる観測を行い、さらにサーモカメラやデジタルカメラの写真撮影を併せて、紅葉過程における葉色の変化を定量的に評価することを試みた。

2. 調査方法

2.1 観測に使用した機器

(1) 色彩色差計 (CS-100)

色彩色差計 (CS-100) は離れた位置から対象物の輝度や色度を測定できる非接触ハンディタイプの計測器で、ミノルタ株式会社によって開発されたものである (写真1)。

ファインダーから測定資料をのぞき狙いを定め、測定ボタンを押すと、測定資料から出る光が分光感度フィルタを通過して3つのセンサーに受光される。そこから波長領域の違う三刺激値 (X,Y,Z) を算出する (XYZ表色系)。さらにこの三刺激値から色度点 x,y を演算して表示される仕組みになっている。その色度の表現方法は Yxy 表色系とよばれている。

XYZ 表色系は3原色といわれる赤、緑、青の要素を数学的な手法を用いて、下記のような三刺激値 XYZ として算出し、3原色の混合量として

色を表すシステムである。

X : 赤の量。ただし明度は持たない。

Y : 緑の量。唯一明度を持つ。

Z : 青の量。ただし明度は持たない。

なお、これらの色は抽象概念として作られたもので、現実に存在する特定の色というわけではないので、注意が必要である。XYZ をグラフで示そうとすると、三次元の軸が必要になり表現が難しいため、平面で表現できないかという考えから発展させたのが Yxy 表色系である。いま、三刺激値 XYZ のうち Y で明るさを示すものとし、三刺激値の相互の比率の値を x, y, z とした場合、以下のように表される。

$$x = X / (X + Y + Z)$$

$$y = Y / (X + Y + Z)$$

$$z = Z / (X + Y + Z)$$

$$x + y + z = 1$$

この x, y, z のうち2つを示せば残りの1つは自ずと決まるので、x と y で表すことができる。

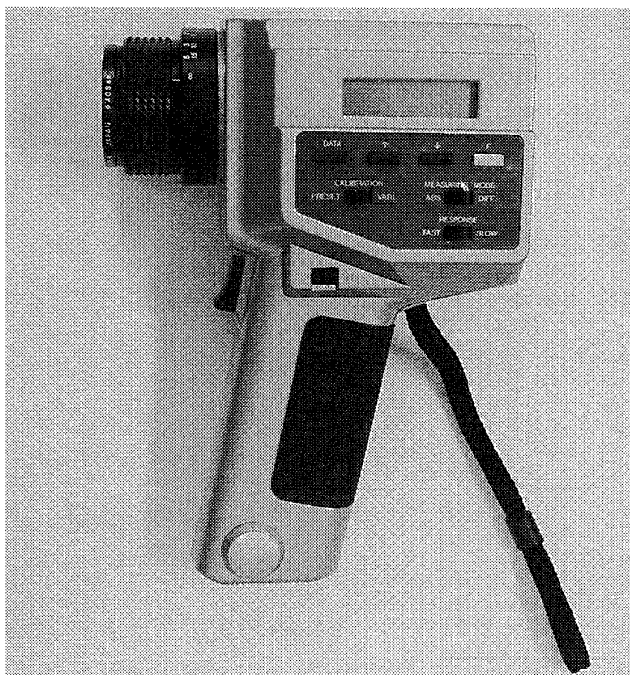


写真1 色彩色差計 (CS-100)

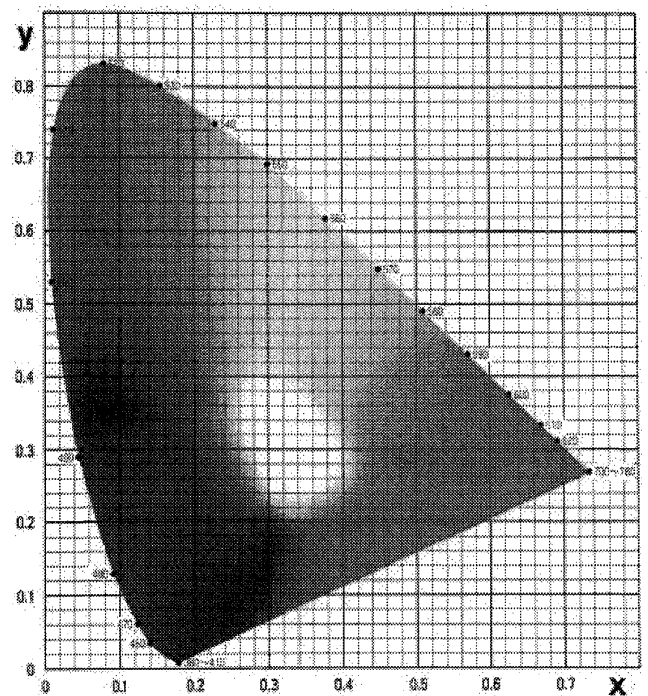


写真2 xy色度図(口絵カラー写真10を参照)

植物の紅葉過程に着目した環境のモニタリング（第1報）

そこで x を横軸にとり、 y を縦軸にして座標空間で色を表したものを xy 色度図と呼ぶ（写真2）。

ここで、 x の値が大きいと赤色成分が強くなり、 y の値が大きくなると緑色成分が強くなる。なお、 z の値が大きいと青色成分が強くなるが、その場合は x と y の値が小さいとして表現される。

（2）葉緑素計（SPAD502）

葉緑素計（SPAD-502）は、農林水産省農蚕園芸局の土壌作物物体分析機器開発事業（Soil and Plant Analyzer Development, 略称SPAD）において、事業の実施主体である農産業振興奨励会、農林水産省農業研究センター、農業環境技術研究所および都道府県各試験研究機関の指導と検定協力により、ミノルタ株式会社によって開発されたものである（只木・木下，1988）（写真3）。植物の葉に含まれるクロロフィル濃度を非破壊的かつ迅速に測定できるのが本器の特徴である。本器の先端の測定ヘッドのすきまに測定する葉を差し入れ、測定ボタンを押すと、瞬時に『SPAD値』が計測される。SPAD値はクロロフィル含有量に比例した指数で、0～50までの数値で表される。クロロフィルの含有量の割合が高いほど最大値50に近い値をとる。よって、葉のクロロフィルの絶対量を計測することはできないが、本研究のような相対的な変化を知ることを目的とする調査の場合には有効である。

葉緑素計（SPAD-502）はもともと農作物の栄養診断のために開発された機器で、農作物の追肥の時期や効果の判定に利用する目的で用いられている。葉緑素計を用いた紅葉の調査・研究に関しては、只木・木下（1988）がドウダンツツジ、ハルニレ、アンズ、倉橋・梶（1994）がポプラ



写真3 葉緑素計（SPAD502）

について試みており、これらの植物における紅葉を評価する上での葉緑素計（SPAD-502）の有効性が確認されている。只木・木下（1988）は紅葉期において、実際のクロロフィル濃度とSPAD値との相関が高いことを明らかにした。倉橋・梶（1994）は葉色が緑から黄色に変わっていく過程とSPAD値の変化傾向に相関があることを述べている。

2.2 観測対象および方法

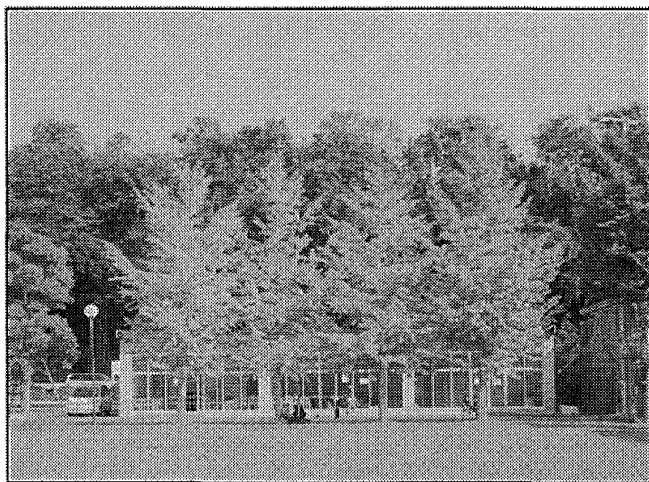
観測対象は千葉県佐倉市の敬愛大学構内においてイチョウが4本、佐倉市内の公園においてイロハカエデ1本、オオモミジ3本である。観測は晴天の日を選び、2005年10月28日、11月3日、10日、17日、24日、12月1日、8日に行い、観測時間は概ね12:00～14:00とした。紅葉の観

測ではデジタルカメラによる写真撮影、色彩色差計、葉緑素計などによる計測を行った。色彩色差計については、各観察木について上部・中部・下部の3ヶ所に焦点をあて計測を行った。イチョウが約40m、イロハカエデが約20m、オオモミジが約20m、離れた位置から計測を行った。葉緑素計の計測は各観察木について下部（高さ1.5～2.0m）の位置にある日当たりの良い数本の枝を選び、観察期間中は同一の枝を測定するようにした。それらの枝から葉を任意に20枚程度選び、計測の対象とした。この20枚のうちSPAD値の上位2枚、下位2枚の葉を除いて残りの葉で平均値をもとめ、それをもってその観察木のSPAD値とした。また、サーモグラフィを用いて観察木の周辺の温度環境を測定した。

3. 結果および考察

3.1 色彩色差計の値と葉色の变化との関係

写真4は2005年10月28日（黄葉初期）と11月24日（最盛期）におけるイチョウの観察木であるが、イチョウの木全体が緑色から黄色へと変
(10月28日)



化していく様子がみてとれる。図1は敬愛大学構内におけるイチョウの色度の推移を示したものである。各観察木（No.1～No.4）の上層部、中層部、下層部による色度の推移にあまり違いはみられない。4本の観察木とも①から⑤へ向かって、時間の経過とともに、 y の値はあまり変化しないが、 x の値が増加していく傾向がある。写真2の xy 色度図でもイチョウの x, y の数値から、大まかに見て緑色成分から黄色の成分へ移行する傾向がうかがえる。以上のことからイチョウの葉色の变化すなわち黄葉過程は x の値の時間変化によって裏付けられる。

写真5は10月28日と11月24日におけるイロハカエデの観察木であるが、木全体が緑色から赤色へと変化していく様子がわかる。図2は佐倉市内の公園におけるイロハカエデの色度の推移を示したものである。時間の経過と共に、 y の値が減少、 x の値は増加していく傾向がある。特に⑤の11月24日と⑥の12月1日は x の値、 y の値ともに急激に下がっている傾向がみてとれる。写真 xy 色度図でもイロハカエデの x, y の数値から、大まかに見て緑色成分から赤色の成分へ移行する傾
(11月24日)

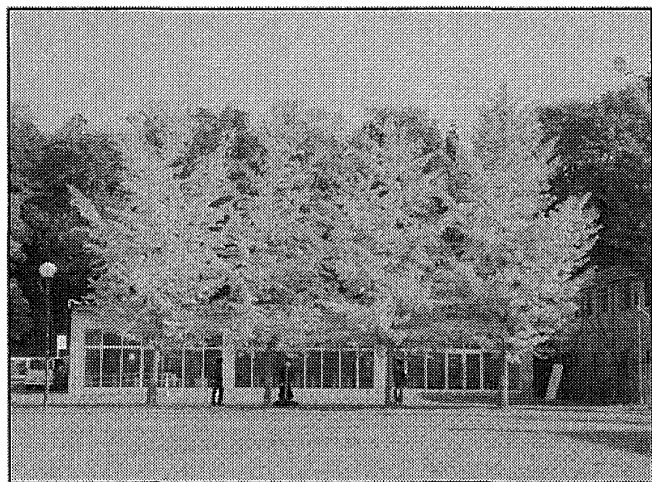


写真4 イチョウの黄葉の様子（口絵カラー写真11を参照）

植物の紅葉過程に着目した環境のモニタリング（第1報）

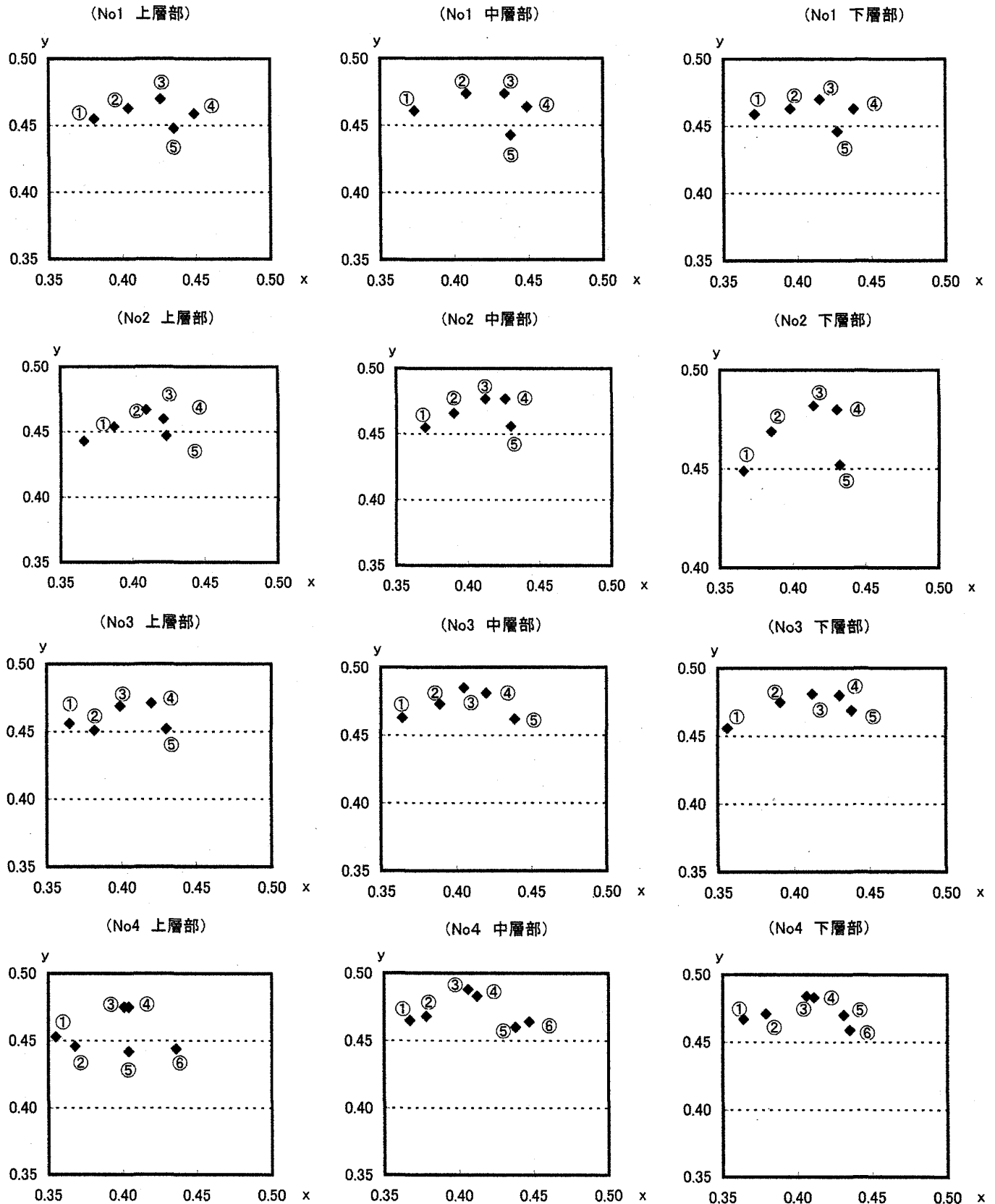
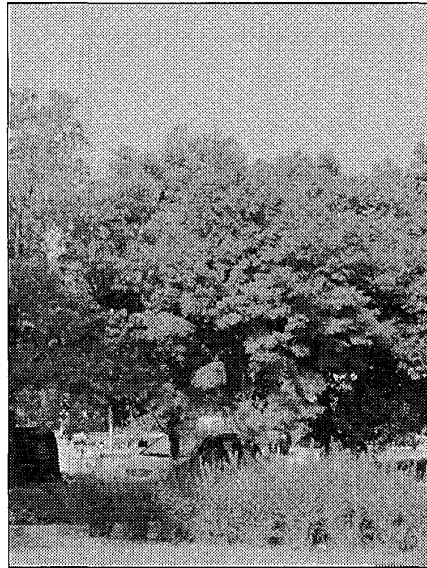


図1 イチョウの色度の推移
全図とも ①10月28日 ②11月3日 ③11月10日 ④11月17日 ⑤11月24日 ⑥12月1日

向がうかがえる。よってイロハカエデの葉色の变化すなわち紅葉過程は x , y の値の時間変化によって裏付けられる。

一方、図3はオオモミジの色度の推移を示したものである。 x , y の値は必ずしも時間変化に対応しておらず、一定の傾向もみられない。写真6は10月28日と11月24日におけるオオモミジの観察木の写真であるが、両日とも緑色系、赤色系、黄色系の色が混在しており、そのことが色度の推移の

(10月28日)



(11月24日)

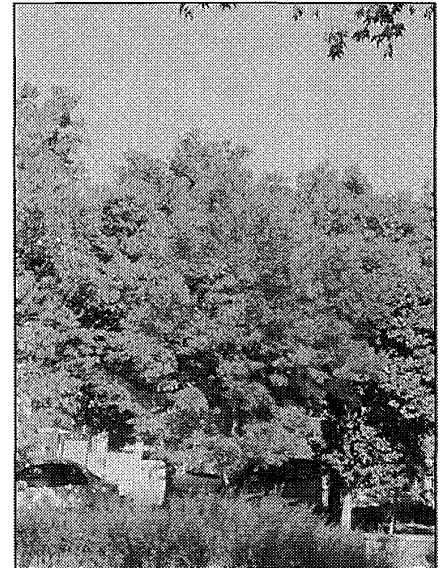


写真5 イロハカエデの紅葉の様子(口絵カラー写真12を参照)

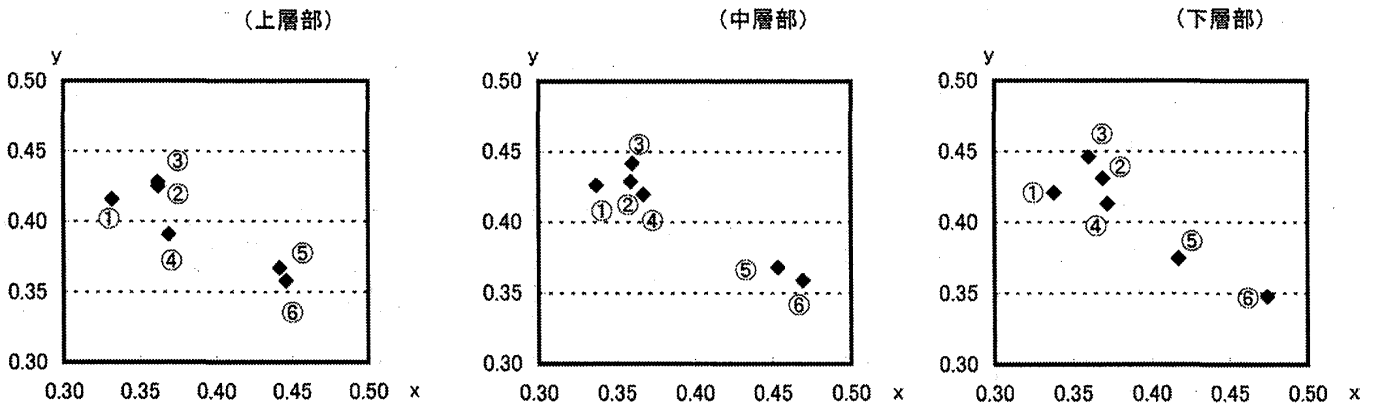


図2 イロハカエデの色度の推移

全図とも ①10月28日 ②11月3日 ③11月10日 ④11月17日 ⑤11月24日 ⑥12月1日

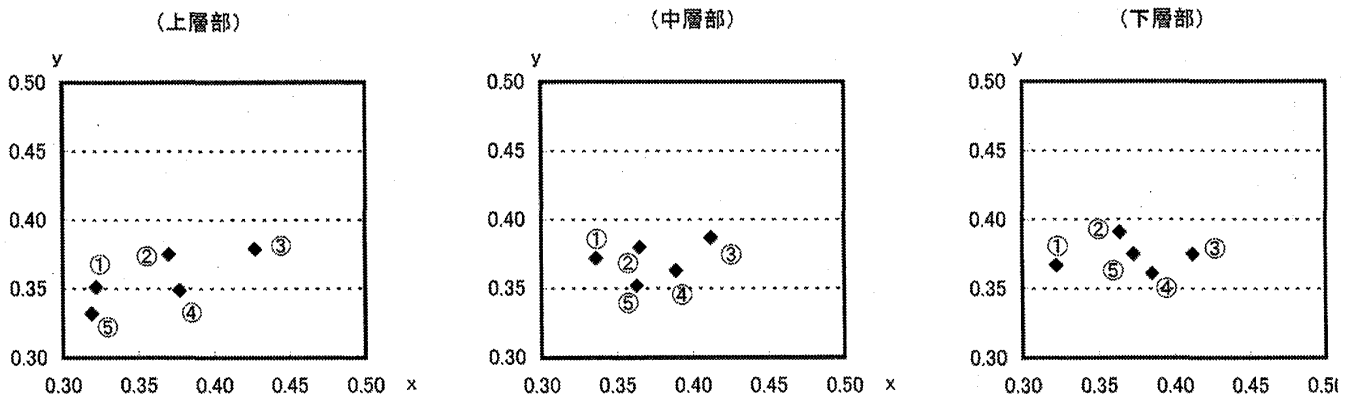
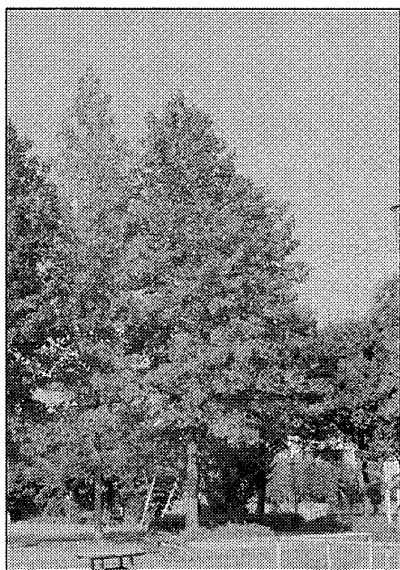


図3 オオモミジの色度の推移

全図とも ①10月28日 ②11月3日 ③11月10日 ④11月17日 ⑤11月24日

植物の紅葉過程に着目した環境のモニタリング（第1報）

（10月28日）



（11月24日）



写真6 オオモミジの紅葉の様子

要因として考えられる。

3.2 色彩計の値と葉緑素計の値（SPAD値）および気温低下との関係

図4はイチョウ、イロハカエデ、オオモミジの葉緑素計の値（SPAD値）の推移である。各観測場所におけるその変化傾向を見ると、全体としてイチョウ、オオモミジが11月10日頃まではSPAD値が徐々に下がっており、その後、急速に減少している。また、色彩計の値との関係を見ると、イチョウ（No.2，No.3）のSPAD値の減少と図1のxの値が増加する傾向に対応しているのがみてとれる。図5は観察期間におけるイチョウのSPAD値と色度（xの値）との関係を示しているが、両者間の寄与率（ R^2 ）は0.77で相関が高いと言える。これらのことからイチョウについては葉緑素（クロロフィル）の減少によって、葉の緑色成分から黄色成分への変化が起こっているものと考えられる。一方、オオモミジについてはSPAD値の減少と色度の推移との間に特に関係性

はみられない。

次にイロハカエデについてみると、11月17日頃まではSPAD値が徐々に下がっており、その後、顕著に下がり始めた。色彩計の値との関係を見ると、SPAD値が減少するにしたがって、図2のxの値が増加するとともにyの値が減少する傾向がみられる。図6、図7はイロハカエデのSPAD値と色度（x，yの値）との関係を示しているが、xの値との寄与率（ R^2 ）は0.98，yの

値との寄与率（ R^2 ）は0.88となっており、どちらも相関が高いと言える。これらのことから、x,yの変化傾向は葉の緑色成分から赤色成分への変化に対応していることがうかがえる。この要因としては、葉緑素（クロロフィル）の減少と同時に赤色素であるアントシアニンが増加しているからであると考えられる。^{注1)}

また、図8、図9は紅葉過程の観察期間におけるSPAD値の変化と敬愛大学構内における日最低気温の推移とを比較したものである。イチョウに関しては気温の推移とともに変化していく傾向

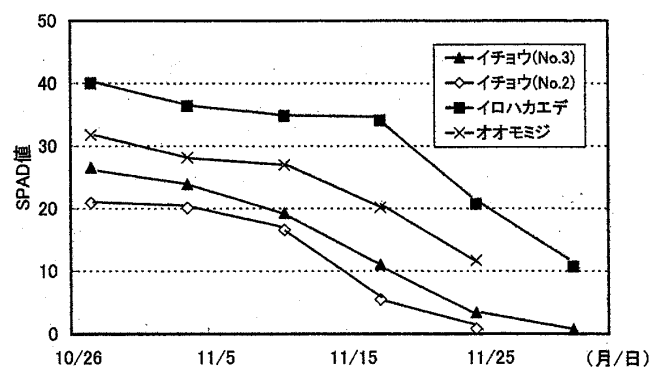


図4 イチョウ、イロハカエデ、オオモミジのSPAD値の推移

がある。イロハカエデの場合は、日最低気温が常時8℃を下回る時期から、SPAD値の減少が顕著にみられ、松本（2004，2005）によっても同様の傾向が得られている。

以上の結果からイチヨウ、イロハカエデに関しては、色彩計の値が紅葉課程に対応していることが明らかになった。すなわち紅葉過程を評価する手法としての色彩計の有効性が示唆されるものである。

4. まとめ

本研究では色彩計を用いてイチヨウ、イロハカエデ、オオモミジの紅葉（黄葉）過程について評価することを試みた。その結果以下のことが明らかとなった。

- ① イチヨウの黄葉に関しては、時間の経過とともに、計測された色度のyの値はあまり変化しないが、xの値が増加していく傾向がある。これらの数値と対応するように、写真上の葉色がだまかに見て緑色成分から黄色の成分へ移行する傾向がうかがえる。よってイチヨウの葉色の変化すなわち黄葉過程はxの値の時間変化によって裏付けられる。
- ② イロハカエデの色度の推移は時間の経過とともに、yの値が減少、xの値は増加していく傾向がある。イロハカエデの葉色が緑色成分から赤色成分へ移行する傾向と色度の値がよく対応している。よってイロハカエデの葉色の変化すなわち紅葉過程はx，yの値の時間変化によって裏付けられる。一方、オオモミジに関しては色度のx，yの値は必ずしも時

間変化に対応しておらず、一定の傾向もみられない。

- ③ 葉緑素（SPAD値）の減少と色度との関係については、イチヨウの黄葉の場合、SPAD値の減少にともない、色度のxの値が増加する傾向がみられた。このことからイチヨウにつ

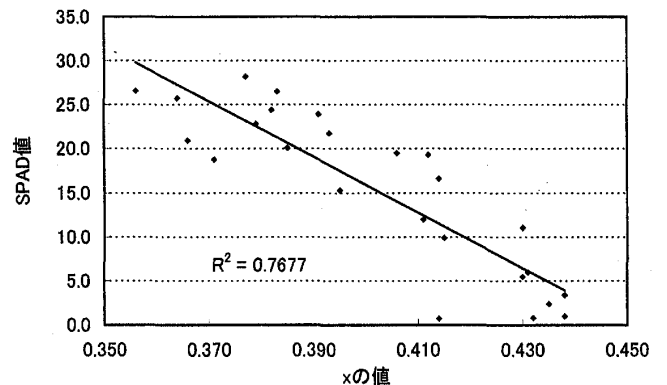


図5 イチヨウのSPAD値と色度（xの値）との関係

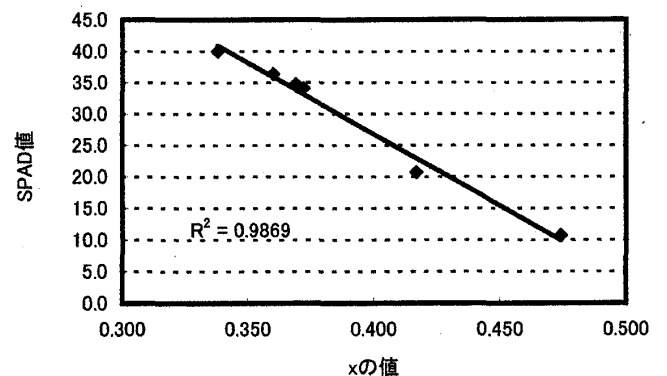


図6 イロハカエデのSPAD値と色度（xの値）との関係

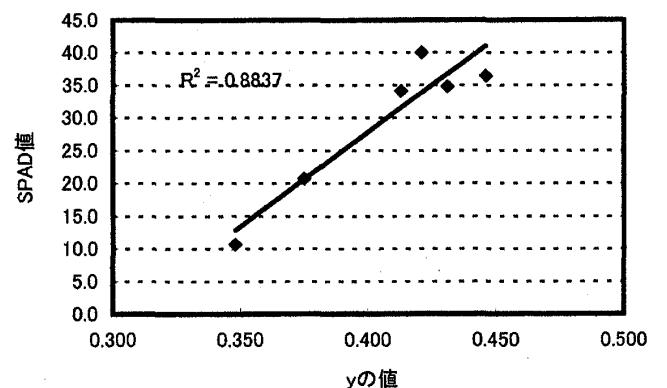


図7 イロハカエデのSPAD値と色度（yの値）との関係

植物の紅葉過程に着目した環境のモニタリング（第1報）

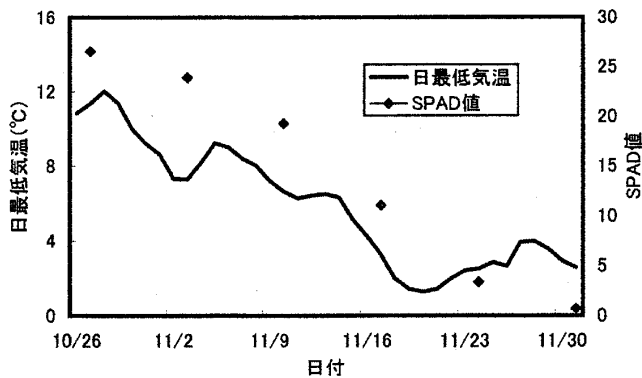


図8 イチョウのSPAD値と敬愛大学における日最低気温との関係

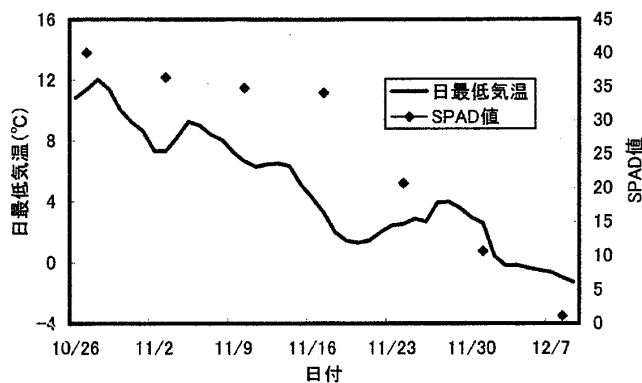


図9 イロハカエデのSPAD値と敬愛大学における日最低気温との関係

いては葉緑素の減少によって、葉の緑色成分から黄色成分への変化が起こっているものと考えられる。また、イロハカエデの場合はSPAD値が減少するにしたがって、色度のxの値が増加するとともにyの値が減少する傾向がみられる。このx,yの変化傾向は葉の緑色成分から赤色成分への変化に対応していることがうかがえる。この要因としては、葉緑素の減少と同時に赤色色素であるアントシアニンが増加しているからであると考えられる。

以上の結果からイチョウ、イロハカエデに関しては、色彩計の値が紅葉課程に対応していることが明らかになった。すなわち紅葉過程を評価する手法としての色彩計の有効性が示唆されるもので

ある。

昨今地球温暖化などの環境問題が顕在化しつつある。市民レベルでの環境モニタリング，例えば開花日や紅葉日などの植物季節観測のネットワークをつくるといった取り組みがますます重要になってくるであろう。本研究のような実験的な研究はこうした環境モニタリングの基準作りを行う上で，重要な基礎資料となりうると考えられる。

今後さらに検討を加え，色彩色差計による紅葉過程の評価が，環境の指標となりうるような有用性のあるものにしていきたいと考えている。

注1) 紅葉（黄葉）現象は光合成活動が最盛期を迎えた後，冬芽形成から落葉に至るまでの過程の1段階である。これらの秋の植物季節は日長（短日条件），気温との関係が深い。紅葉（黄葉）現象は葉の老化による機能の低下によって起こる化学的变化に特徴づけられる（池本，1978）。すなわち，秋，気温が低くなってくると，落葉樹は葉の付け根に離層と呼ばれる細胞層を形成する。離層は木化して，植物体内の水の流れを遮断し，葉が光合成によって作り出したデンプンや糖分などが，葉から茎へ移動することを妨げる。これらの輸送が絶たれた結果，葉の中に残った糖分が使われて，アントシアニンという赤い色素が細胞内に広がる。同時に気温が低くなって，落葉が近づいた葉はタンパク質の分解が始まり，葉緑体の中に含まれている緑色の色素であるクロロフィルが破壊される。その結果，赤い色素が目立つようになる。これが紅葉である。

参考文献

- 池本彰夫 (1978) : 樹木の調節. 佐藤大七郎・堤利夫編, 樹木－形態と機能－, 文永堂, 東京, pp.192－224.
- 倉橋昭夫・梶幹男 (1994) : ポプラのフェノロジー観察の状況と結果の概要. 藤原洗一郎編「森林地域における酸性雨など地球環境モニタリング体制の確立」(科学研究費試験研究 (A) 05506001), 第3回研究会レポート, 61－81.
- 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.
- 松本 太 (2004) : 熊谷市における都市気候と植物季節の関係 (第2報)－葉緑素計を用いたイロハカエデ紅葉の評価－. 日本生気象学会雑誌, 40, pp.337－349.
- 松本 太 (2005) : イロハカエデの紅葉に及ぼす低温の影響に関する実験的研究. 日本生気象学会雑誌 42 : pp.65－75.
- 松本 太・福岡義隆 (2002) : 熊谷市における都市気候と植物季節の関係 (第1報)－イチウ, イロハカエデの紅 (黄) 葉日を例として－. 日本生気象学会雑誌, 39, pp.3－16.
- 百瀬成夫 (1998) : 『四季・動植物前線』. 技報堂出版, 334p.
- 沼田 真 (1974) : 都市生態の構造と動態. 中野尊正・沼田 真・半谷高久・安部喜也著『都市生態学』. 共立出版, pp.23－94.
- 吉野正敏 (1961) : 『小気候』. 地人書館, 274p.
- Clements, F.E. and G.W. Gldsmith (1924) : The Phytometer Method in Ecology. *Carnegie Institution of Washington*, 106p.
- Yoshino, M. and Park, H.S. (1996) : Variations in the plant phenology affected by global warming. Omasa, K. Kai, K. Taoda, H. Uchijima, Z. and Yoshino, M. eds. *Climate change and plants in East Asia*, Springer Verlag, pp. 93－107.

ABSTRACT

Monitoring Climatic Environment Using on Leaf – Color – Change process (1) – Development of method about Evaluating –

Futoshi MATSUMOTO and Keizo NAKAMURA

In this study, it was tried that the leaf – color – change (turning red or yellow) of the tree was evaluated using the colorimeter.

The results of this study consist as follows:

- 1) The chromaticity measured by the colorimeter was correspondent to the change of the color judged by the photograph. The tendency was remarkable of the leaf – color – change of *Ginkgo biloba* and *Acer palmatum*.
- 2) In the observation, leaf – color – change was evaluated using chlorophyll meter (SPAD value) with measurement of the colorimeter. The decrease of SPAD value was correspondent to the change of the value of the chromaticity. Therefore it is considered that the value of the chromaticity of *Acer palmatum* is possible to be related to the increase in the red pigment, namely the anthocyan.

From the above fact, the observation using the colorimeter is verified with that it is effective as a method for evaluating the leaf – color – change.