

デジタルカメラ画像を用いた開葉期・落葉期の 客観的識別手法の検討

上治雄介^{1*}・今泉文寿²

¹ 筑波大学農林技術センター井川演習林
428-0504 静岡県静岡市葵区井川1621-2

² 静岡大学農学部
422-8529 静岡県静岡市駿河区大谷836

要 旨

フェノロジー観測は一般に現地で目視により行うことが多く、観測結果には個人差が含まれている。本研究では客観性の高い開葉・落葉フェノロジー観測データの取得を目的として、開葉・落葉期における葉の量の変化をコンピューターにより自動判定する方法を検討する。観測にはデジタルカメラを用いた。画像解析の基礎情報として白く塗った板を画像に含むように設置した。この板の明度を基に閾値を求め画像を二値化し、葉ピクセル数の変化を調べた。落葉期に青空を葉と誤認しないよう、RGB値から青空を区別する処理も行った。解析の結果、開葉期に葉ピクセル数の上昇が、落葉期に葉ピクセル数の減少がみられ、葉フェノロジーを画像中の葉ピクセル数の変化として観察できた。4月または12月（無葉期）の平均葉ピクセル数を0%、7～9月（緑葉期）の平均葉ピクセル数を100%とし、開葉期・落葉期に葉ピクセル数が50%に最も近い日を開葉日・落葉日とする方法を提案した。

キーワード：閾値、自動化、デジタルカメラ、フェノロジー観測

緒 言

季節の移り変わりに伴う動植物の行動や状態の変化をフェノロジー（生物季節）という。フェノロジーは動植物の種や年齢（樹齢）、生育環境、気候等によって変化する。そのため多様な条件下でのフェノロジーを把握しようと、多くの野外観測がなされている。観測対象となる項目には様々なものがあり、樹木に限ってみても発芽（藤本 2007）、開葉・落葉（小見山 1991、藤本 2008、加藤ら 1999）、紅葉（門松 1998）などがある。これらの観測結果は、多様な条件下における樹木の生理・生態特性の検討に用いられるほか（門松 1998、加藤ら 1999）、フェノロジーに影響する環境因子の特定にも利用さ

れる（小見山 1991、藤本 2007）。特に近年は気候変動への社会の関心が高まっており、社会的要望から気候がフェノロジーへ及ぼす影響の評価が精力的になされている（渡辺 2006、藤本 2008、伊藤・佐野 2012）。これまでの研究の結果、気温の上昇が開葉時期の早期化や黄葉・落葉の遅延化を招くという知見が得られている（渡辺 2006、藤本 2008）。

フェノロジー観測は現地へ赴き目視によって開葉等の状態を確認し、あらかじめ定めた基準に従い記録するという方法が一般的に用いられる（例えば、藤本 2007）。目視による確認は、個人差が生じやすいという問題点を有する。また、長期観測や広域を対象とした観測を行おうとした場合に人的資源が必要となる。通常、現

*連絡者：上治雄介 筑波大学農林技術センター井川演習林
428-0504 静岡県静岡市葵区井川1621-2
E-mail：ueji.yusuke.fn@un.tsukuba.ac.jp

地で目視による観測を毎日行うことは困難であり、観測間隔が長くなることで、フェノロジーの変化を十分に捉えられない可能性もある。

近年では、自動カメラによるフェノロジー観測方法が行われるようになり、定点映像を定時に得ることが可能となった(齊藤ら 1998、Saitoh 2012)。これにより、1日間隔、あるいはそれよりも短い間隔でのフェノロジー観測が可能となり(齊藤ら 1998、Saitoh 2012)、得られるデータの時間精度が向上した。しかし、多くは画像を目視により判定しており(例えば、渡辺ら 2006)、依然として個人差を完全に排除するのは困難である。また、観測間隔の短縮が可能となったことに伴い解析にかかる人的資源の増加も見込まれる。

これらの問題を解消する方法として、コンピューターによる画像解析によりフェノロジーを判定する手法が提案されている。酒井ら(1996)は、樹木が撮影された写真画像の各ピクセルを、葉・空・枝・土・雲などに分類し、葉ピクセルのピクセル数の変化をみることでフェノロジーを調べた。ピクセルの分類は、各ピクセルの色(RGB値)を基にして行うが、天候が異なると同じ被写体を撮影しても画像上の被写体を表す色がわずかに変化するので、解析を行う際は天候による色の変化を考慮しなければならない。しかしその手法は未だ確立していない。

本研究では、客観性の高いフェノロジー観測データの取得を目的とし、開葉期または落葉期における葉の量の変化をコンピューターにより自動判定するための解析手法を検討する。解析資料にはデジタルカメラによって自動撮影された画像を用いる。天候の違いによる画像の色の変化を自動判定に考慮できるようにするため、新たな現地観測手法を提案する。

観測地および観測・解析方法

(1) 観測地および観測方法

フェノロジー観測を、静岡県北部の筑波大学農林技術センター井川演習林(年平均気温9.6℃、年間降水量約1,900mm:図1)内に成育するミズナラ(*Quercus crispula* Blume)2本を対象として行った。対象木の間隔は約20mあり、標高約1300m、南東向きの同一斜面上に成育する。周囲はヒノキ人工林(一部、二次林)で、2001年に行った除伐後のギャップに侵入した

ものと考えられる。樹高は約4mである。撮影にはGardenWatchCam(Brinno社製)(図2)を用いた。GardenWatchCamの仕様は表1の通りである。レンズが不要な太陽光を取り込まないよう、GardenWatchCamにフードを取り付けた。選定したミズナラそれぞれに1台ずつ約3m離れた位置に設置し、毎日1枚ずつ撮影

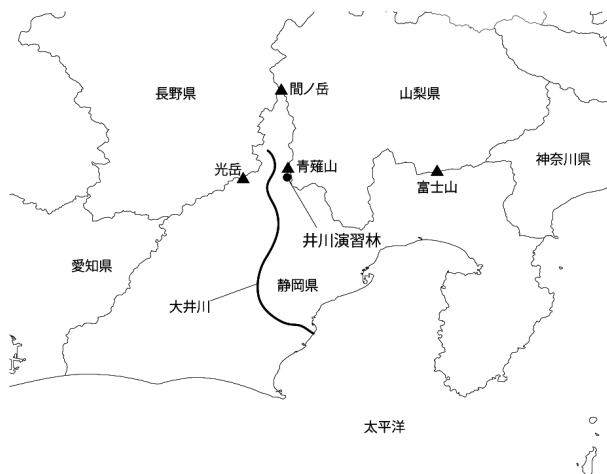


図1 調査地位置図



図2 GardenWatchCamの設置状況

表1 GardenWatchCamの仕様

項目名	仕様詳細
画素数	1.3メガピクセル
測光方法	多分割測光
焦点距離	約1.0m～(通常モード使用)
記録画素数	1,280×1,024画素
記憶媒体	USBフラッシュドライブ
電源	単三乾電池×4本
電源持続時間	4～6カ月 (撮影頻度により異なる)

表2 対象木ごとの観測期間および撮影枚数

	観測期間	撮影枚数
対象木1	2011/7/1 ~ 2011/12/13 (落葉期)	127
	2012/4/9 ~ 2012/9/29 (開葉期)	138
対象木2	2011/7/1 ~ 2011/12/31 (落葉期)	136
	2012/4/9 ~ 2012/9/12 (開葉期)	123

した。撮影時刻は対象木に直射日光の当たらない15時とした。対象木に直射日光が当たると明るい葉と暗い葉が生じ、解析の誤差となるためである。観測期間ならびに撮影枚数は表2のとおりである。ただし、雨がレンズに付着して画像が乱れたものはあらかじめ撮影枚数から除いた。

(2) 解析方法

開葉・落葉期それぞれにおける葉の量の変化を葉のピクセル数の変化によって評価する。評価は1. 閾値による明度(R(赤)、G(緑)、B(青))の平均値による画像の二値化)、2. 明度により葉と区別することが困難な青色の空をB値が高いという特徴をもとに区別、という2段階の手順により行った。解析にあたり、画像内に写った遠方の山は葉と誤認されるので、撮影範囲はできるだけ背景が空となるよう留意し、山が写り込んだ場合はトリミングによって領域ごと削除した。トリミングした範囲は観測地点ごとに異なる。また本研究の観測では、2011年の冬季に動物によるものと考えられる影響で撮影範囲が変化したため、観測年によっても異なる。

二値化は葉(幹や枝を含む)の明度が空の明度よりも低いことを利用して行なう。三上ら(2006)は各ピクセルのR値とB値を用いて葉ピクセルを抽出しているが、黄葉・紅葉期では葉の色や明るさが変化するため、葉ピクセルの抽出精度は緑葉期と比べると低い。葉ピクセルの明度は黄葉・紅葉期となってRGBの各値が変化しても顕著な変化が見られない(図3)ため、明度を二値化の指標として用いる。二値化には画像ごとに閾値を設ける必要がある。閾値は天候等の影響により変化する。そこで閾値を求める基礎情報として白色(ロックコート(白):ロックペイント社製)に塗った板(以下、白色板)を画像に含まれるように設置した。そして白色板の明度を基に閾値を求める以下の一次式を作成する。

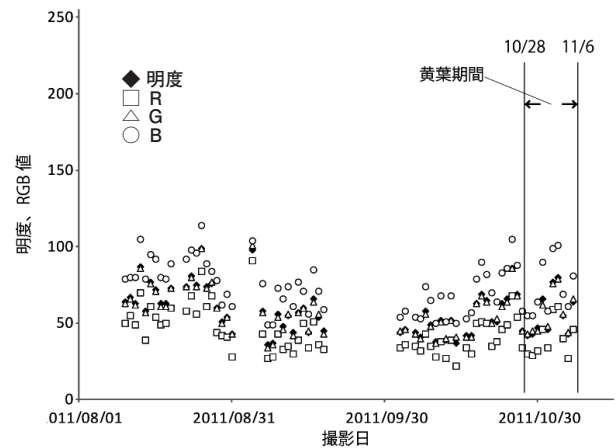


図3 緑葉期と黄葉期における葉の明度およびR, G, B値の変化(サンプル数:67)

$$T = aW + b \quad (1)$$

ここに T : 閾値、 W : 白色板の明度、 a 、 b : 定数である。定数 a は白色板の明度(W)に乗じる数値なので、定数 a が大きいほど白色板の明度が閾値に与える影響は大きい。ミズナらは春に一斉に開葉し、秋に一斉に落葉する(菊沢1986)ため、開葉終了から落葉開始までの葉の量は一定であると考えられる(以下、緑葉期)。そこで、 a と b に様々な値を代入し、この期間中(本研究では7~9月)に撮影した各画像における葉を表すピクセル数の標準偏差が最も小さくなるような a と b の組み合わせを定数として採用した。一次式は対象木ごとに作成した。また、本研究では2011年の落葉期と2012年の開葉期の間で動物の影響により撮影方向、範囲が変化した。葉の明度は同一樹冠内においても直射日光の当たり方等の影響を受けて場所により変化する、さらに空の明度も撮影方向により変化する、ことから、撮影方向の変化に伴い二値化に最適な閾値が変化すると考えられる。そのため、それぞれの時期で別の一次式(計4種類の式)を作成した。この一次式と開葉・落葉期を含めた各画像の白色板の明度より、各画像の二値化に用いる閾値を求め、画像別に葉のピクセル数をカウントした。

開葉・落葉期には開空度の上昇に伴いGardenWatchCamが測光を行なう対象がミズナラから空に移るため、落葉前と比べて落葉後は空の明度が低下し、葉と誤認される場合がある。このようなときには空は青色として撮影される。そこで、空のB値がR, G値と比べて高いことを利用して空を抽出する式を作成し(式(2))、あわせて葉と空の分類に用いた。

$$2B > R + G + c \quad (2)$$

ここに c : 定数であり、本研究では経験的に $c = 120$ と設定した。

結果と考察

(1) 閾値の算出と画像の二値化

各対象木および各観測期間において式 (1) に用いる定数 (a 、 b) は表3のようになった。対象木2、落葉期の a 値は、対象木1、落葉期・開葉期および対象木2、開葉期と比較して小さな値となった。対象木2、落葉期の判別に用いた緑葉期の二値化後の画像を見ると風によると思われる枝の動きが確認できた。この時、葉が重なり合っており、画像上に占める葉の面積が減少していた。このため、葉が占める面積が一定という前提が成立しなかったことが a 値の低下した原因であると考えられる。 a 値が低いと、白色板の明度による閾値の補正効果が低くなり、画像間で二値化のための閾値の差が小さくなる。つまり、天候による画像の明度の変化を適切に補正できなくなる可能性がある。このことが緑葉期の標準偏差が他の解析結果よりも大きい (表4) 原因のひとつとなったと考えら

れる。

式 (1) と表3で示した定数 (a 、 b) を用いて、開葉期・落葉期を含む全画像の二値化を行った。二値化前後の写真の例を図4に示す。図4 a は2011年8月15日に対象木1を撮影した画像である。対象木1に露出が合っているた

表3 対象木・観測期間別の閾値算出用定数

		a	b
対象木1	落葉期	1.41	80
	開葉期	1.55	26
対象木2	落葉期	0.19	130
	開葉期	1.27	142

表4 対象木・観測期間別の緑葉期における葉ピクセルの標準偏差

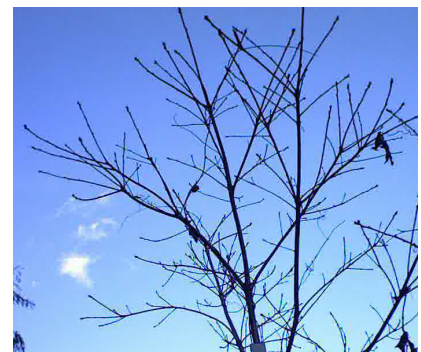
		緑葉期間	撮影枚数	葉ピクセルの標準偏差
対象木1	2011/7/1 ~ 2011/9/18		61	9855.83
	2012/7/2 ~ 2012/9/29		77	9005.03
対象木2	2011/7/1 ~ 2011/9/16		55	23911.55
	2012/7/2 ~ 2012/9/12		60	16129.93



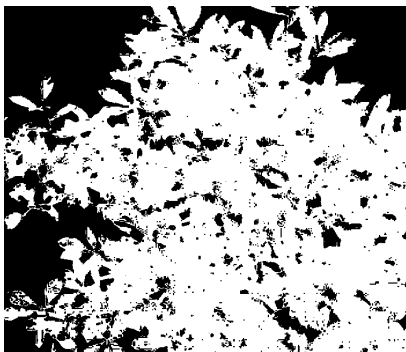
(a) 対象木1 撮影日：2011/8/15



(c) 対象木1 撮影日：2011/11/6



(e) 対象木1 撮影日：2011/12/10



(b) 画像 (a) の二値化画像

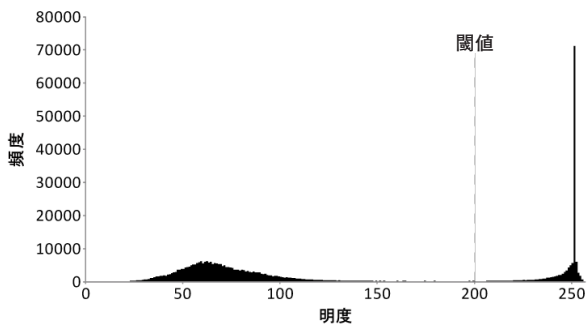


(d) 画像 (c) の二値化画像

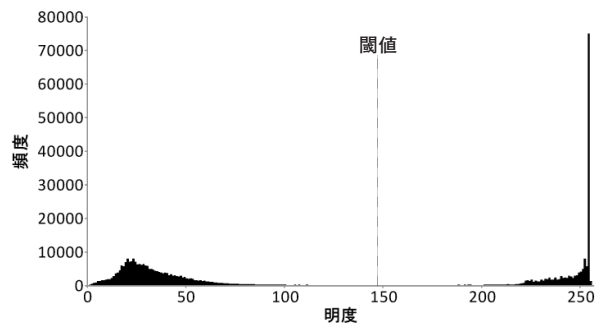


(f) 画像 (e) の二値化画像

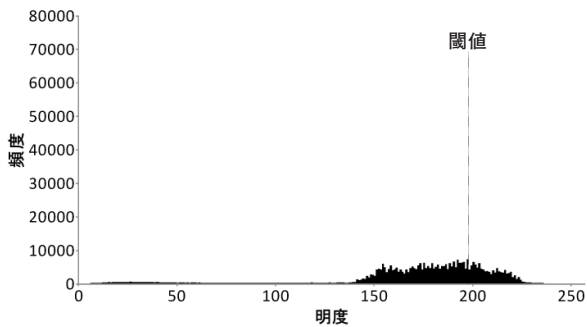
図4 基画像と二値化後の画像



(a) 対象木 1 撮影日：2011/8/15
閾値：201



(b) 対象木 1 撮影日：2011/11/6
閾値：146



(c) 対象木 1 撮影日：2011/12/10
閾値：196

図 5 基画像の明度と閾値

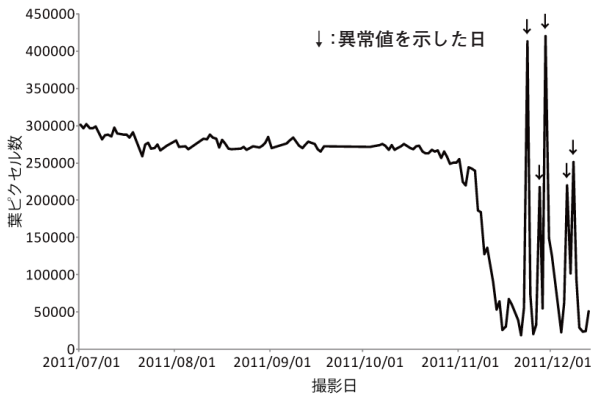
め背景の空は露出オーバーとなり写っている。このため空と樹木が明瞭に区別でき、図 4 b のように二値化により葉ピクセルを分けることができた。図 4 c は 2011 年 11 月 6 日に対象木 1 を撮影した画像である。図 4 a 同様に空と樹木が明確に分かれている。図 3 のように明度は黄葉期になっても変化がないため、黄葉期の画像でも二値化により葉ピクセルの抜き出しができた (図 4 d)。図 4 e は 2011 年 12 月 10 日に対象木 1 を撮影した画像である。露出が空と樹木両方に合っているため、空が青く写っている。枝の細い部分の一部は空と誤認された (図 4 f) が、二値化により葉ピクセルの識別をほぼ行うことができた。図 4 a、4 c、4 e の各画像における 1 ピクセルごとの明度を求めヒストグラムにまとめた (図 5)。図 5 a ~ 5 c いずれの図でも葉ピクセルである明度の低い集団と空ピクセルである明度の高い集団が分かれている。図 5 a、5 b では閾値がそれらの間にあり、適切に二値化できたと判断できる。図 5 c では閾値が空ピクセルを表す集団の中にあるため、閾値による二値化は正しく行うことはできない。図 4 f のように葉ピクセルの識別をほぼ行うことができたのは、式 (2) によって青空と葉の

分類ができたためである。このように、開葉期、落葉期、緑葉期に限らず、式 (1) により客観的に定めた閾値および式 (2) によって葉ピクセルの抽出を行うことができた。

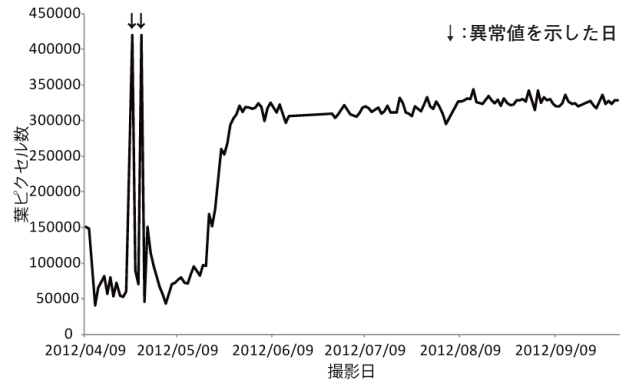
(2) 葉ピクセル数の推移

画像ごとに葉ピクセルをカウントした結果を図 6 に示す。いずれの対象木・観測期間でも葉ピクセルの増加または減少を観察できた。葉ピクセルが増加または減少する時期には、解析前の画像を目視によって観察しても開葉または落葉が確認された。このため葉ピクセルの増加または減少は開葉期または落葉期の様子を表していると考えられる。

一方で、開葉前または落葉後に明らかに異常な値を示す画像がみられた。図 6 には開葉前または落葉後の期間 (以下無葉期; 本研究では 4 月および 12 月) における葉ピクセル数の平均値から、同期間の標準偏差以上離れた場合を異常値として矢印で示した。異常値は比較的暗い雲が空を覆う場合や空が霞がかかった場合に多く見られた。無葉期は測光対象が空となるため、空が露出オーバーとならずに多様な色として識別される。式 (2) は葉と青空の分



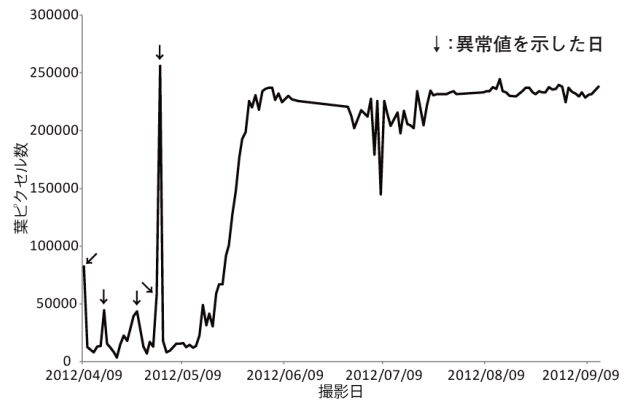
(a) 対象木1、落葉期



(b) 対象木1、開葉期



(c) 対象木2、落葉期



(d) 対象木2、開葉期

図6 葉ピクセル数の変化 (図中の矢印は異常値)

類を想定しており、空が雲等の存在により他の色となった場合には空の分類に適さなくなる。このことが無葉期の異常値の出現につながったと考えられる。この他に、濃霧の発生やGardenWatchCamの露出がオーバーとなったことで白色板の明度が上がり、閾値も上昇したため、画像のほとんどが葉と誤認した場合もあった。このような画像は、一見すると対象木を正しく写しているように見えるが、雨がレンズに付着した場合と同様に解析対象から除外の方がよい。このような異常値を自動かつ客観的に解析対象から除外手法する手法についても今後の検討課題である。

開葉日・落葉日の判定については、図6から明らかなように、開葉や落葉は10~15日程度かけて徐々に起こるものであるため、開葉日、落葉日を定める基準が必要である。そこで本研究では判別の客観性を確保するため、緑葉期における葉ピクセル数の平均を100%、無葉期における葉ピクセル数の平均を0%とした場合に、葉ピクセル数が50%に最も近い日を開葉

表5 対象木別開葉日・落葉日

	落葉日	開葉日
対象木1	2011/11/8	2012/5/18
対象木2	2011/11/9	2012/5/24

日・落葉日とした。なお、図6で示した異常値は事前に解析対象から除いた。その結果を表5に示した。2011年の落葉日は対象木1と対象木2の違いは1日であった。しかし対象木2、落葉期における閾値を求める式(1)のa値は低く、緑葉期における葉ピクセル数の標準偏差も大きかったので、この結果についてさらに検討する必要がある。一方で、2012年の開葉日は対象木1より対象木2は6日遅れた。対象木2、開葉期は展葉が進み、枝が重く垂れ下がるにつれて解析範囲外にあった多くの葉が解析範囲に入った。対象木2の開葉期における葉ピクセル数の上昇は開葉そのものに加え解析範囲外の枝葉が範囲内に入って来たことによる影響が大きかった。このため葉ピクセル数が50%に

到達する日が対象木1に比べて遅れたのだと考えられる。枝の動きによる葉ピクセルの変動が起きたのは、対象木の選定方法にあると思われる。対象木1が比較的通直であるのに対し対象木2は、周囲の優先木（ヒノキ）の影響で斜めに伸長成長が行われた。このため、葉の重みでたわみやすくなり、今回のような結果となったと考えられる。

開葉期と落葉期における葉ピクセル数の変化を比較したところ、落葉期では葉ピクセル数が急激に減少する前に少しずつ減少する期間（10/20～11/5頃）がみられた。開葉期では葉ピクセル数が少しずつ増加するような期間はみられず、急激に増加した。

おわりに

本研究では客観性の高い樹木の葉フェノロジー観測データの取得を目的として、フェノロジー観測手法および解析方法の検討を行った。現地自動撮影観測においては、画像の二値化に必要な閾値を求めるために必要な基礎情報として白色板を設置した。解析においては白色板の明度を基にした解析者の主観を含まない方法によって閾値を求め、画像の二値化を行った。これにより開葉または落葉の様子を画像中の葉のピクセル数の変化として観察する事が出来た。

一方で、雨天時における画像の乱れ、動物によると思われる撮影範囲の変化、風や葉の重みによる枝の移動、一部の空や雲を葉と誤認するなどの課題がみられた。これらの課題に対してはGardenWatchCamに取り付けるフードの改良、フレームを合わせるための目印の撮影範囲内への設置、通直に伸長成長した樹木の選択、青色以外の空も識別する手法の検討、などの対策が考えられ、今後はこれらの対策を実際に検討していきたい。

このように課題は依然残るものの、本研究が提案した手法はデジタルカメラ画像をコンピュータによって自動解析することが可能であるので、長期観測や広域を対象としたフェノロジー観測など膨大な画像を扱う場合にも人的資源の不足に陥る危険性が低く、かつ客観性を保ったまま解析が可能であると考えられる。フェノロジー観測データは様々な研究に用いられる基礎データである。本研究がデータ収集の一助になれば幸いである。

謝 辞

本研究を行うにあたり、筑波大学農林技術センター井川演習林の遠藤好和技術職員には、現地における観測方法において貴重なご意見ならびに観測機器の作成に多くの支援をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。本研究では平成20年度地球再生プログラムの資金を用いて行われた。

引用文献

- 藤本征司 (2007) 広葉樹29種の10年間の開芽フェノロジー観測に基づく開芽日予測法の検討. 日本林学会誌89 (4) : 253-261
- 藤本征司 (2008) 気温変動が暖温帯域の樹木の葉フェノロジーに与える影響の予測. 保全生態学研究13 (1) : 75-87
- 伊藤公一、佐野淳之 (2012) 雪解け時期と気温上昇が稚樹の開葉フェノロジーに与える影響. 生態学会誌62 (2) : 111-120
- 門松昌彦 (1998) ナラ類における開葉時期と紅葉時期との関係、北海道大学農学部 演習林研究報告55 (1) : 31-39
- 加藤正吾、山本美香、小宮山章 (1999) 落葉広葉樹林の上層と下層での葉フェノロジー—1997年の莊川村六所における解析—. 森林立地学会誌41 (1) : 39-44
- 菊沢喜八郎 (1986) 葉の生存戦略 森林樹木を中心として. 日本生態学会誌36 : 189-203
- 小池重人、樋口広芳 (2006) 気候変動が同一地域の鳥類、昆虫、植物の生物季節に与える影響. 地球環境11 (1) : 27-34
- 小見山章 (1991) 落葉広葉樹の幹肥大成長の開始・休止時期と着葉期間の相互関係、およびそれらに関係する環境因子. 日本林学会誌73 (6) : 409-418
- 三上寛了、西田顕郎、村岡裕由 (2006) 魚眼デジタルカメラ画像による林冠の開空域の自動識別と葉面積指数の推定. 写真測量とリモートセンシング45 (5) : 13-22
- 齊藤馨、藤原章雄、熊谷洋一 (1998) ランドスケープ情報基盤構築のための景観モニタリング手法. ランドスケープ研究61 (5) : 597-600
- Taku M. Saitoh, Shin Nagai, Nobuko Saigusa, Hideki Kobayashi, Rikie Suzuki, Kenlo Nishida Nasahara, Hiroyuki Muraoka (2012) Assessing the use of camera-based indices for characterizing canopy phenology in relation to gross primary production in a deciduous broad-leaved and an evergreen coniferous forest in Japan. Ecological Informatics11 : 45-54
- 酒井徹朗、菅原哲二 (1996) フェノロジー調査の画像処理について. 京都大学農学部演習林集報29 : 95-100
- 渡辺隆一、大久保明紀子、井田秀行 (2006) 志賀高原における温暖化の植物季節への影響—1986—2004年の定点写真からのダケカンバの開葉日・黄葉日の年変動—信州大学教育学部附属志賀自然教育研究施設研究業績43 : 13-16

Objective Identification Method for Leaf Development and Defoliation Periods Using Digital Camera Images

Yusuke UEJI^{1*} and Fumitoshi IMAIZUMI²

¹ Ikawa University Forest, Agricultural and Forestry Research Center, University of Tsukuba,
1621-2 Ikawa, Aoi, Shizuoka 428-0504, Japan

² Faculty of Agriculture, Shizuoka University, 836 Ohya, Suruga, Shizuoka 422-8529, Japan

Abstract

Tree phenology has been generally investigated by eye observations that have personal difference. In this study, we suggested objective identification method for leaf development and defoliation periods using computer analysis of digital camera images. Pixels in images were classified into leaves and the others (e.g., sky, clouds) by binarization of brightness. Appropriate threshold value for the binarization is highly affected by weather. Therefore, we set up white boards in the shooting area of the camera in order to investigate appropriate threshold value for each image. Our method could detect leaf development and defoliation periods as changes in number of leaf pixels. We also investigated timings when leaf pixel number is just half of the leaf pixel number in summer. We suggested that these timings can be used as index of leaf development and defoliation days.

Key words: Automation, Digital camera, Phenology observation, Threshold value

*Corresponding Author: Yusuke UEJI Ikawa University Forest, Agricultural and Forestry Research Center, University of Tsukuba
1621-2 Ikawa, Aoi, Shizuoka 428-0504, Japan
E-mail: ueji.yusuke.fn@un.tsukuba.ac.jp