東京大学大学院新領域創成科学研究科
環境学研究系自然環境学専攻
自然環境景観学分野
平成２８年度　修士論文

気候変動が与える落葉広葉樹の紅葉現象への影響評価

Evaluation of climate change impact on autumn leaf of deciduous broad leaved trees

2017 年 1 月 19 日提出
2016 年度 3 月修了
指導教員　斎藤馨 教授
47-156624　中村英史

目次

1 序論

1-1 研究背景と目的

1-1(1) 気候変動の現況

昨今地球温暖化による気候変動の影響があらゆる場面において明らかになってきている。世界中で気候変動の影響は表面化してきており，干ばつや土砂災害など異常気象や気象災害を引き起こしている。日本においても他に漏れず，気候変動の影響は社会生活のあらゆる面にも及んでおり，集中豪雨による気象災害の発生や酷暑による熱中症患者の増加を引き起こしている。地球温暖化の今後の動向は様々な温室効果ガス排出量の将来予測シナリオに基づいて予測が行われているが，いかなるシナリオにおいても昇温は継続していくという報告がなされている(IPCC, 2013; 気象庁,2016a)。近年の気候変動については多くの報告があり，IPCC(2013)によると 19 世紀後半以降において世界平均地上気温が上昇していることは確実であり，過去 30 年において 10 年単位でみた場合，各 10 年はその前の 10 年よりも高温であり続けているとしている。

さらに，昇温が継続することにより植生分布の変化や大型哺乳類の生息域拡大などが示唆されており，その影響は生物季節(phenology:以下「フェノロジー」と記す)にまで及ぶとされている(環境省, 2015)。

1-1(2) フェノロジーと気候変動

フェノロジーとは季節変化に対応して動物や植物が生態や形態を変化させる現象の事を言い,動物では鳥の初鳴きや発情期の訪れを指し,植物では開花や落葉などの現象を指す。日本においてこのフェノロジー，特に樹木に関するフェノロジーは兼ねてから人々の生活や文化に近しい存在として扱われてきた。

日本文化におけるフェノロジーの代表例としてはソメイヨシノの開花とカエデ類の紅葉が挙げられる。それぞれ春秋の風物詩として古来より親しまれてきたものであり，桜に関しては 5 世紀初頭にはすでに歌として詠まれていたという(吉野, 2012)。現代においてもソメイヨシノの開花期には「桜まつり」が全国的に行われ，紅葉の時期には「紅葉狩り」と称して近隣の山に見物に向かう行事があるほど，社会的関心は高い。

樹木のフェノロジーには開葉・開花・紅葉・落葉などの現象が含まれるが，その中の紅葉については既に様々な視点で研究がなされているものの，ソメイヨシノの開花に比べて研究例が少ない(松本・福岡, 2002)。日本における紅葉は社会的関心が高い上に，国土の高低差が大きい日本の重要な観光要素の 1 つであるため，気候変動の影響を評価する必要性は高いと考える。これまでフェノロジーに対する気候変動の影響を報告した例は幾つかあり(気象庁, 2016; 丸岡・伊藤, 2009; 樋口ら, 2009; 土居・高橋, 2010 など)，気象庁(2016)によると全国 58 地点のさくらの開花日を 1953 年からの経年変化で見ると 10 年単位で 1.0

日の変化率で早くなっており，かえでの紅(黄)葉日は全国 51 地点，さくらと同様の期間において 10 年単位で 2.9 日遅くなっているとしている。フェノロジーの予測について丸岡・伊藤(2009)ではソメイヨシノの休眠打破の機構をチルユニットという低温積算変換値を用いて表現し，ソメイヨシノの開花日と開花状況をこれまでの温暖化の推移と開花日・満開日の関係から予測している。これによると今後 100 年間においてソメイヨシノの開花日は東北地方で早くなり，太平洋側の平地から西日本ではあまり変わらず，九州地方などでは遅くなるとされている。

また，以上のようなフェノロジーの変動は生態系における生物種間の相互関係に変化を及ぼし，さらに生態系サービスの低下への影響の可能性が示唆されている(清水・大政, 2013)。現状ではこれらを定量的に評価した研究例は少ない（環境省, 2015）

1-1(3) フェノロジーの観測手法

フェノロジーの変動を把握するためには長期的な観測が必要であるが，その代表例としては気象庁の生物季節観測が挙げられる。

気象庁は生物季節観測指針を 1953 年に発行, 以後 2 回の改定を経て現在は 1983 年発行の第 3 版に基づいて動植物の生物季節現象の観測が行われている。この生物季節観測指針に記載してある観測方法は主に聴覚や視覚など主観的な感覚に伴う生物季節の観測手法である。紅葉現象について生物季節観測指針(気象庁, 1985)では「対象とする植物を全体として眺めたときに，その葉の色が大部分紅（黄）色系統の色に変り，緑色系統の色がほとんど認められなくなった最初の日を，その植物の紅（黄）葉日（Color changing date）とする。(同指針 p.9)」と記されており，具体的な数値までの言及はされていない。

また，生物季節観測は各気象官署近くで設定された観測木の観測によってフェノロジー現象の発現日が判断されるために，都市に近い場合が多く，森林域でのフェノロジー観測データは少ないのが現状である。

一方，近年ではデジタル技術の発達により，樹木フェノロジー観測の新たな手法も提案されてきている．その中の 1 つがデジタルカメラによる定点撮影を行うものである．デジタルカメラを対象の樹木が映るように設置し，一定時間毎のインターバル撮影を行い，そこでの撮影画像を解析することによって樹木フェノロジーを把握するといった手法である。この手法は気象庁の生物季節観測指針における主観的な手法ではなく，数値で評価できることからより客観的に生物季節を扱うことができるという利点がある(Richardson et al., 2007; Ide et al., 2010)。

1-2 研究目的

本研究では森林域に設置された定点観測カメラによって撮影された画像データを用い，森林域における落葉広葉樹を対象とした樹木フェノロジーの紅葉現象について気温との関係性を把握し，気候変動が紅葉に与える影響について評価することを目的とする。

2 対象および方法

2-1 定点画像と気象データ

2-1(1) 東京大学秩父演習林 31 林班の概要

対象地はロボットカメラおよびデジタル一眼レフカメラで撮影されている秩父演習林 31 林班を対象とする。31 林班は標高 900m～1300m の斜面にあり，スギ・ヒノキの人工林・落葉広葉樹の二次林で構成されている.

2-1(2) ロボットカメラとデジタル一眼レフの概要

a.ロボットカメラについて

東京大学秩父演習林内において 1995 年から定点カメラによる景観および音の自動記録を行われている(斎藤ほか，1998)。1995 年～2012 年までは定点カメラによって映像を撮影され，2012 年以降はデジタル一眼レフカメラによって画像を撮影されており，現在も記録が行われている。ロボットカメラは秩父演習林内矢竹沢地区(29 林班)において 1995 年から運用を開始し，映像を記録していた(写真 1 上部)。主に太陽光発電によって電源を得ており，これは現在のデジタル一眼レフカメラによる撮影に移行しても同様である。撮影時刻は光線がほぼ正面となる午前 11 時半頃，設定されたカメラ方角と画角によって自動で撮影されている。ロボットカメラの撮影対象となった範囲を図 1 に示す。本研究においては数ある画角のうち，shot-09 と呼ばれる図 1 の赤枠範囲を写した映像から切り出したキャプチャ画像を用いて解析を行った。キャプチャ画像は 708×524 ピクセルで構成されている(図 2)。

b.デジタル一眼レフカメラについて

2012 年からはより高解像度で観測が行えるように，先述したロボットカメラの近傍にデジタル一眼レフカメラを設置している(写真 1 下部)。こちらは現在も稼働中で，撮影時刻はロボットカメラと同様であり 11 時半頃，毎日撮影を自動で行うよう設定されている。保存される画像は 4928×3264 ピクセルで構成されている(図 3)。

※使用機材　NIKON D7000
画素数:1620 万画素
絞り優先モード
ISO 感度:100(2013 年～2014 年)
400(2015 年～)
レンズ: AF-S DX NIKKOR 55-200mm f/4-5.6
(165mm にて使用)

写真 1　ロボットカメラ(上)および
デジタル一眼レフカメラ(下)

図 1　ロボットカメラ撮影範囲
(赤枠は shot-09)

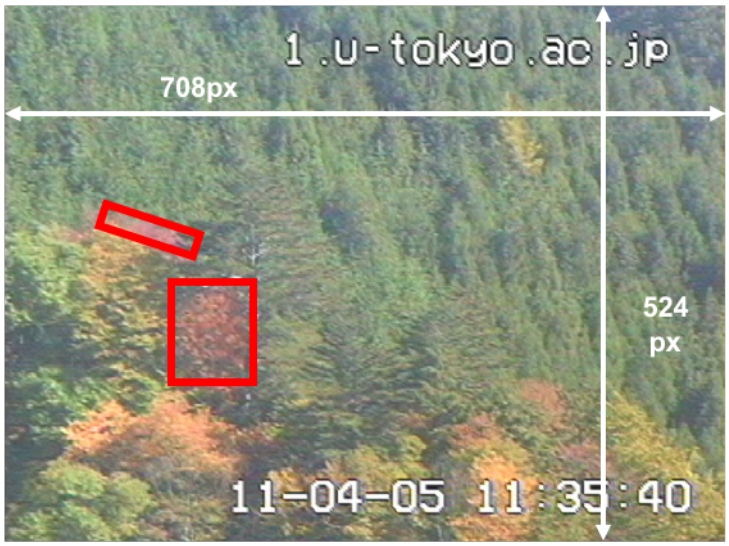

図 2 ロボットカメラ撮影映像からのキャプチャ画像例

（2005 年 11 月 4 日，赤枠は解析対象範囲）

図 3 デジタル一眼レフ撮影画像例

（2016 年 11 月 4 日，赤枠は解析対象範囲）

2-1(3) 紅葉解析対象木

対象樹種は目視判読が可能で観測期間中で比較的統一してデータの揃うコハウチワカエデ(*Acer sieboldianum*)，カスミザクラ(*Cerasus leveilleana*)の 2 種とした。コハウチワカエデ，カスミザクラは深い赤に紅葉し，目視でも判別がしやすいために抽出範囲の設定の容易さを考慮し，以上の 2 種に決定した。日本の野生植物(佐竹ら;1989a, 1989b)からそれぞれの生態特徴を抜粋下記に示す。

a.コハウチワカエデ(*Acer sieboldianum*)

低山の林内に生える落葉小高木または高木，高さ 15m に及ぶ。日本固有。本州・四国・九州に自生する。

b.カスミザクラ(*Cerasus leveilleana*)

落葉高木で，幹は高さ 20m，径 70cm になる。樹皮は紫褐色，平滑で，横並びの皮目が目だつ。北海道・本州・四国・九州に分布し，朝鮮にも産する。温帯の山地に広く見られるが，四国や九州ではたいへんまれである。垂直分布ではヤマザクラより上部を占めるが，下方ではヤマザクラと重なることがあり，混生するところもある。

2-1(4) 気象データ

a.秩父演習林気象データ

気温データは秩父演習林の協力により，観測・提供されている(http://www.uf.a.u-tokyo.ac.jp/data/)。秩父演習林内に設置されている現在稼働中の気象観測機器および気象観測地点を図 4(出典:地理院地図(国土地理院))に示す。

図 4 気象観測地点およびカメラ設置地点・対象木地点地図

［気象データ観測機器］

・気温湿度センサー　CS500(キャンベル社)

温度　1000ΩPRT，誤差:±0.6℃

※気温は 10 秒に 1 回の計測を行い，6 分に 1 回それらの平均値を観測値として記録する。

・データロガー　CR10X(キャンベル社)

［気象データ観測地点］

【小赤沢観測地点】

緯度経度:35°56'N 138°49'E

標高:1210m

観測期間:1994 年 1 月 1 日～現在

(途中、欠測期間あり)

*代替機による観測期間

2001 年 5 月 18 日~6 月 14 日

2004 年 2 月 29 日~4 月 8 日

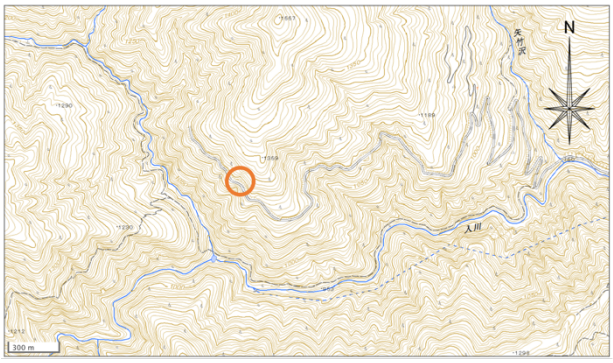

図 5 小赤沢観測地点周辺地図

出典:地理院地図(国土地理院)

【栃本観測地点】

緯度経度:35°56'N 138°52'E

標高:740m

観測期間:1956 年～現在

(途中、欠測期間あり)

*代替機による観測期間

2001 年 5 月 18 日~6 月 14 日、

7 月 10 日~22 日

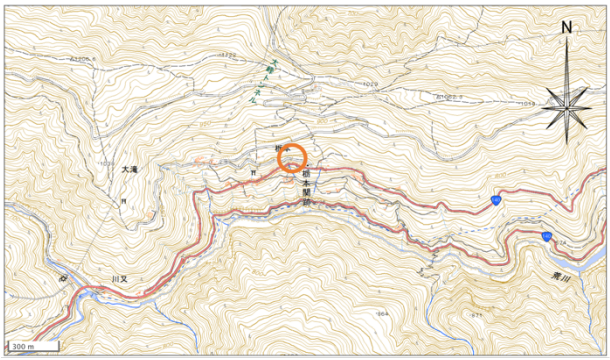

図 6 栃本観測地点周辺地図

出典:地理院地図(国土地理院)

b.使用データ

本研究における気温データは後述する秩父演習林内に設置してある小赤沢観測地点のものを使用する。

2016 年 8 月 27 日～12 月 14 日までの期間，対象樹木近傍に温度ロガー(TR-52i, T and D 社)を設置し，気温の観測を独自に行なった。現在取得できる最新の小赤沢観測地点の気温は 10 月までであったため，9 月 1 日～10 月 31 日までの日平均気温を算出し，この気温と小赤沢観測地点による観測気温との相関を見たところ，相関係数=0.996 で極めて高い正の相関が見られ，小赤沢観測地点による気温推移は本研究で用いるに妥当であると判断した。この期間において日平均気温差の平均は 0.96℃であった。対象木と小赤沢観測地点との高度差が 200m であるため，吉野(1986)によって報告された気温減率 0.55℃/100m に当てはまる結果となった。誤差は機材や設置法などの個別問題による差であると考えられる。図 7 に気温の推移を示す。

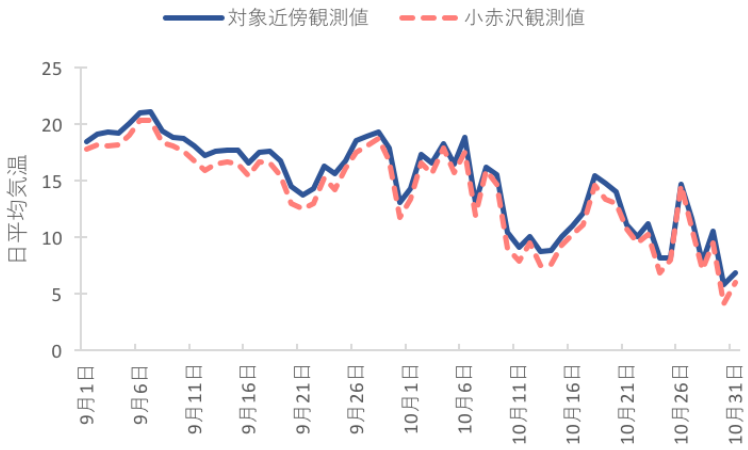

図 7　日平均気温の比較

また，本研究の対象地である秩父演習林の温暖化については田中ら(2013)によって先述した栃本観測地点における 1930 年～2008 年までの気温の変動の報告がなされている。これによると，観測機器の誤差などのばらつきは無視できる程度のものだとした上で，1940 年頃の高温傾向，1960 年頃の高温傾向，1960 年代の弱い寒冷化傾向，1980 年代半ばからは緩やかな温暖化傾向があるとしており，これは日本のバックグラウンド温暖化量の示す傾向(近藤，2010)と共通していると示唆されている。バックグラウンド温暖化量とは近藤(2010)が示した都市化等の影響を除いた日本における温暖化量のことであり，都市化の影響や露場の周辺環境の変化の影響が少ないと考えられる 34 箇所の気象官署の長期観測データから考えられたものである。

田中ら(2014)は栃本観測地点の温暖化傾向にのみ言及しており，本研究で用いた小赤沢観測地点については米谷・斎藤(2009)において温暖化傾向は見受けられないとしているが，それは機器の故障などの影響ではないかと言及されている。

そこで本研究においても1993年～2015年における日平均気温の変動を図8に示す。

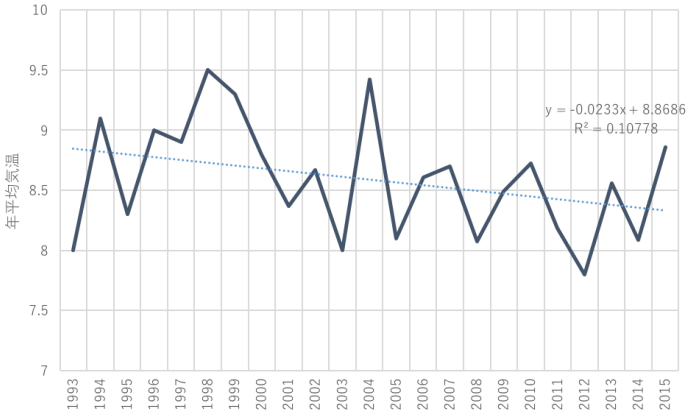

図 8 年平均気温の変動

回帰直線を引くと決定係数が-0.11 となり，緩やかな年平均気温は減少傾向にあるという結果となった。小赤沢観測地点は林内に存在し，標高1210m地点と標高も高いことから都市化の影響は少ないと考えられる。これは米谷・斎藤(2009)の報告と近しい傾向であり，田中ら(2013)の示した温暖化傾向とは沿わない結果となった。これには栃本観測地点付近にはいくらか家屋が存在しており，多少の都市化の影響があったのではと考えられる。

年平均気温は減少傾向にあるものの，本研究においては米谷・斎藤(2009)によって撮影地点の気温と相関の高いと示された小赤沢観測地点を用いることとした。

2-2 方法

2-2(1) 画像解析指標の検討

デジタルデータにおける画像は多くの画素（ピクセル）で構成されており，この画素数が多いほどきめ細かい画像だと人間は認識する。画素は赤・緑・青（RGB）の3原色がそれぞれ256までの値を取ることによって色を表現し，その集合体として画像が成り立っている。

本研究ではPython2.7というプログラミング言語とPython用に提供されているOpen CVライブラリ(Open Source Computer Vision Library)を用い，画像を構成している一つの画素に含まれるRGBの値を抽出し，計算に使用した。

1つの画像における各画素のRGBの値を全和し抽出を行った全画素数で割ったものをそれぞれR_{dn}，G_{dn}，B_{dn}とした。この3値を以下の指標の計算値として用いた。

本研究において紅葉現象を表現するのに用いた指標の計算式を以下に示す(数式①～⑤)。

$$rR = \frac{R_{dn}}{R_{dn} + G_{dn} + B_{dn}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

$$rG = \frac{G_{dn}}{R_{dn} + G_{dn} + B_{dn}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

$$rB = \frac{B}{R_{dn} + G_{dn} + B_{dn}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

$$2G - RBi = 2rG - (rR + rB) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

$$GRVI = \frac{(rG - rR)}{(rG + rR)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

rG，rB，rR および 2G-RBi という指標は Richardson et al.(2007, 2009）によって提案された指標である。rR，rG，rB の 3 指標については R_{dn}，G_{dn}，B_{dn} を 3 値の和で割ったもので，正規化デジタル値と呼ばれている。

これについてカラマツ林を対象に同様の指標を用いた小野ら(2015)は地形と大気の双方の効果を大幅に抑制し，土地被覆分類，特に植生の解析に有用であるとした上で，日射量やホワイトバランスの影響は残るもののそれぞれの特徴に合わせて利用できる指標であるとしている。下記にそれぞれの特徴を示す。

rG は葉量の季節変化や植生被覆率(緑被率)をよく反映しており，NDVI と似た季節変化を示す。しかし，繁茂期から紅葉期にかけて滑らかに変動するため，移行時期の判定が難しい。

rR, rB は紅葉期，落葉期における変動幅が大きいため，NDVI で把握が難しいこれらの時期の植生の生育・活性状況の解析に役立つ。

2G-RBi は先述の rR，rG，rB を計算に組み込んだ式である。Richardson et al.(2007)によるとこの指標は植生の繁茂に鋭く反応し，値が高くなるような推移を見せることから，春における展葉時期を正確に表現できるとしている。

GRVI はこの指標については Motohka et al.(2010)によると植生の繁茂に対しても反応するが，秋の葉の色づきに効果的であると言及している。

2-2(2) 紅葉日設定方法の検討

紅葉現象の推移を RGB 値により数値化する。指標が導いた結果に基づいて紅葉日を設定する。解析に用いる切り出し画像はすべて Adobe 社の Photoshop Lightroom CS5 を用いて対象木が全て収まるように目視によって切り出しを行い，その後に解析を行った。切り出しを行う際には 2 つのカメラ間で解像度の違いにより切り出し画像の構成ピクセル数が異なる可能性があったため，差違を小さくするために縦横比を固定してそれぞれ対象範囲の設定を行った。2001 年～2007 年のロボットカメラ撮影画像からのコハウチワカエデ切り出し画像は 73×104 ピクセルで構成され，カスミザクラ切り出し画像は 114×18 ピクセルで構成された。2013 年～2016 年のデジタル一眼レフ撮影画像からのコハウチワカエデ切り出し画像は 58×357 ピクセル，カスミザクラ切り出し画像は 640×101 ピクセルで構成されている。切り出し画像の例を図 9～図 12 に示す。

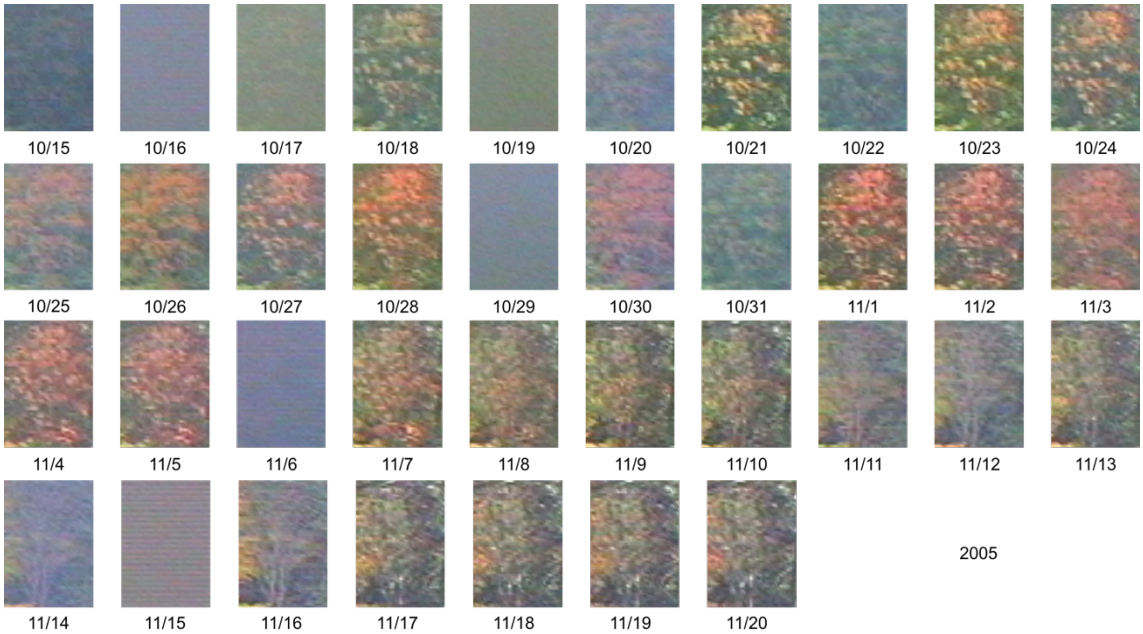

図 9 2005 年のコハウチワカエデ切り出し画像

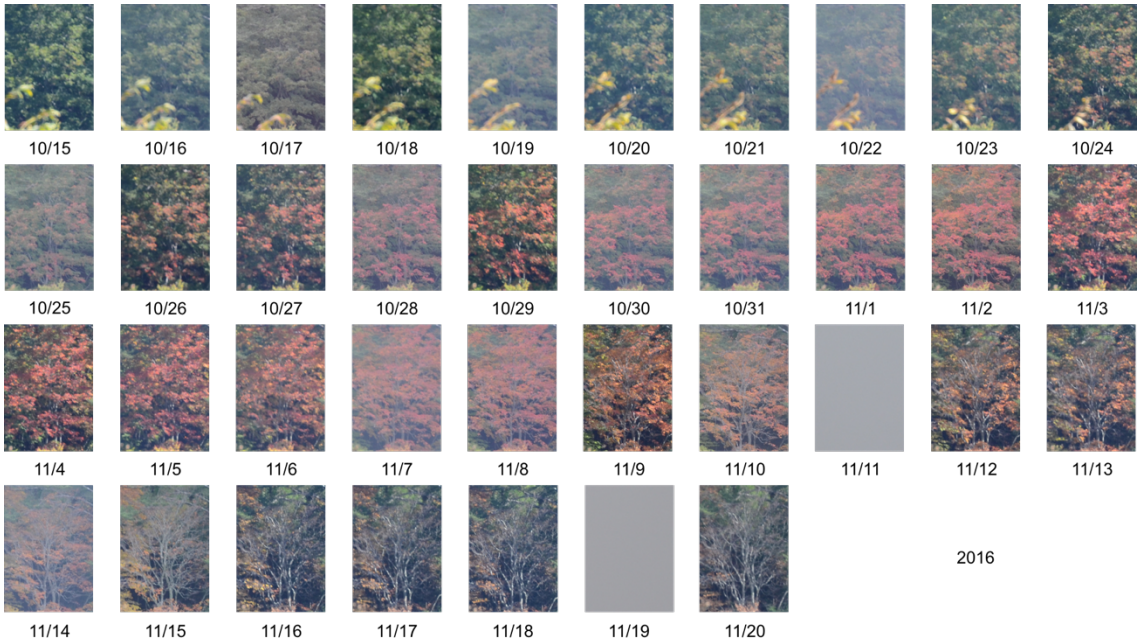

図 10 2016 年のコハウチワカエデ切り出し画像

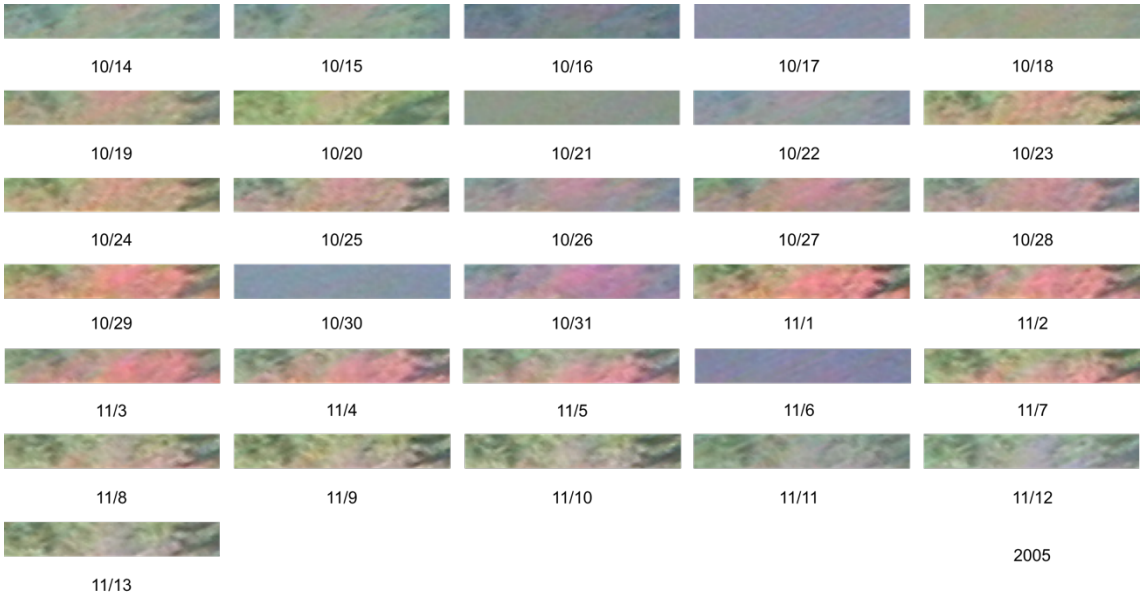

図 11 2005 年のカスミザクラ切り出し画像

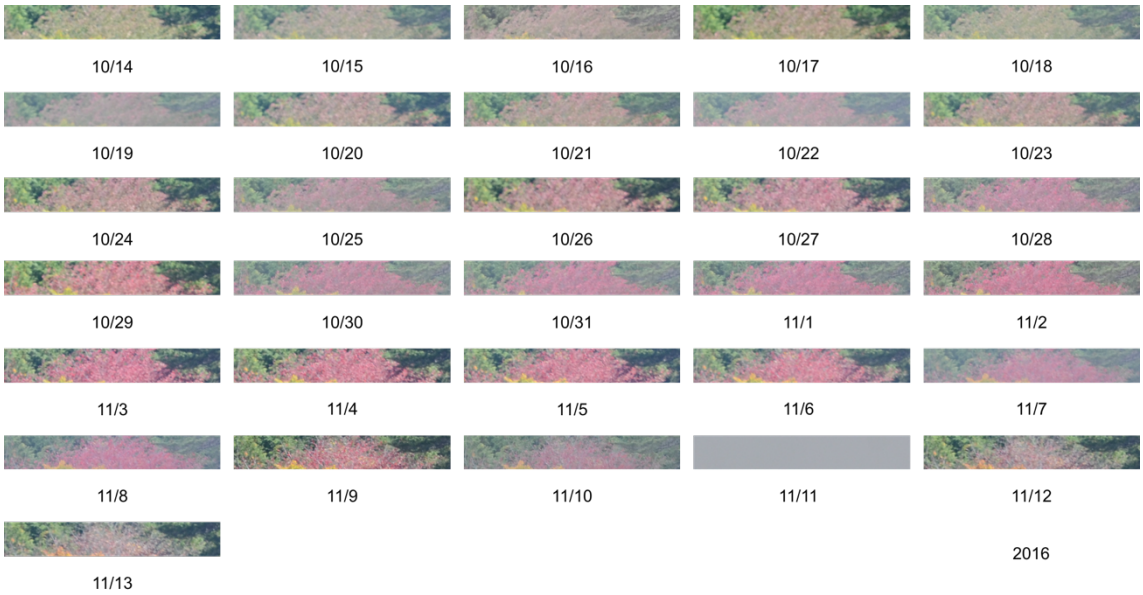

図 12 2016 年のカスミザクラ切り出し画像

また，本研究に用いた画像データは画像解析に向けて撮影されたものではなく，ロボットカメラおよびデジタル一眼レフ設置地点から撮影地点まで直線距離で約 1km 離れているために，記録された画像データには撮影時の天候や湿度などの大気条件がノイズとして多分に含まれている。そこでノイズの影響を最小限に抑えるために日全天日射量と目視によるスクリーニングを行った。撮影地点に近い気象官署では日照時間のみの観測であり，日全天日射量については観測が行われていなかったため，篠原ら(2007)を参考に撮影地点から 200km 未満に存在する気象官署のうち最も近い甲府地方気象台の日全天日射量を用いた。気象庁が提供している気象統計情報(気象庁, 2016b)で甲府地方気象台の日全天日射量ダウンロードし, 3MJ/㎡以下の日を天候不順日とし, これを第一スクリーニングとした。さらに，日全天日射量によるスクリーニングを回避した画像について，突発的な気候の変化等により撮影時点において完全に不可視なものが含まれていた(図 13)。これらの画像は本研究の解析には明らかに不適切であると判断し，筆者による目視判読によって樹木が確認できない画像について天候不順日として除いた。これを第 2 スクリーニングとした。

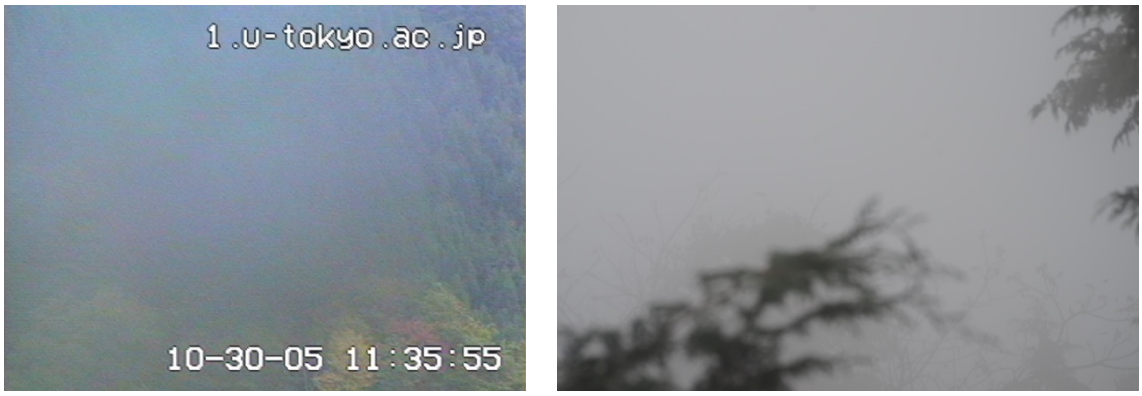

図 13 対象樹木が不可視な画像例

(左:2005 年 10 月 30 日;9.7MJ/㎡，右:2015 年 10 月 23 日;7.5MJ/㎡)

さらに，Richardson et al.(2007)や Sonnentag et al.(2012)において落葉広葉樹を対象として年間を通した指標値の計算は行われてきているが，紅葉時期といったある一部の期間を詳細に取り扱っている例は少ない。そこで本研究では指標値を用いた独自の基準を設けることとした。

紅葉日決定後，各指標値の日毎の推移が日々の気温の変動を反映しているかを確認するために，各年の最低気温の推移と指標値との比較検討を行った。指標値のピークがそれぞれ紅葉の時期に重なっていることと松本(2005)によって SPAD 値の低下とある種の低温量の積算とは関係があるとの報告がなされていることから，気温の変動と指標値の変動には相関があると考えた。今回の気温の変動との関係の検討には日平均気温を用いている。

指標値はスクリーニングを行っているために値を隠している日が複数存在する。そこで，(当日の日最低気温)－(前日の日最低気温)という計算方法で導いた前日差最低気温と(当日の指標値)－(前日の指標値)という計算方法で導いた前日差指標値を比較検討することでそれぞれの日毎の変化量を適切に反映できると考え，使用した。期間は各年の 3 種の指標が示した紅葉日を平均した平均紅葉日までとして計算を行った。

2-2(3) 有効積算温量法による紅葉日予測

フェノロジー発現日を予測する手法として現在よく用いられているのは有効積算温量法と温度変換日数法である。有効積算温量法は起算日からフェノロジー発現日までのある一定以上(以下)の気温(限界温度)を積算することでフェノロジー発現日を予測する手法である。温度変換日数法は小野ら(1998)によって開芽や花の開花など平均発育速度と温度との関係がアレニウスプロットを行うことによって近似できるとして開発された手法である。

これまで，以上の予測手法はフェノロジー研究において多く用いられてきており(澤村・奈良井, 2008 など)，新しく開発された手法が古いものと比べて精度が良いと言い切れないこと(Hunter and Lechowicz,1992)や，青野(1993)によって適切な起算日と限界温度を用い

れば精度の高い予測結果が得られるという報告があるため，本研究では有効積算温量法を用いることとした。

本研究における対象樹種の紅葉日については適切な起算日や限界温度に関する検討がなされていないため，予測に適切な起算日と限界温度を算定する必要がある。本研究では藤本(2008)を参考に式(6)，式(7)に基づいて算定を試みた。

$$\sum_{t-t_0}^{y} T(x_t) = f_1 \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

$$T(x_t) = 0 \qquad x_t \geq S\text{の場合}$$

$$T(x_t) = x_t - S \qquad x_t < S\text{の場合}$$

有効積算温量(f_1)、限界温度(S)、起算日(t_0)の 3 つのパラメータからx_t(t 日目の日最低気温)の変動に基づいてフェノロジー現象発現日(y)を予測する手法である。有効積算温量(f_1)は各年(i)年の起算日から実際のフェノロジー現象発現日(y_a)までの積算温量の平均を取ることで設定する。そこで式(7)に基づいて各年の各限界温度と起算日の組み合わせが取る有効積算温量(f_1)の値を算出した。

$$f_1 = \sum_{i=0}^{n} \left\{ \sum_{t-t_0}^{y_a} T_i(x_{ti}) \right\} /9 \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

x_{ti}はi年目のt日目の日最低気温を示しており，T_iはi年目の積算温量を示す。式(6)によってフェノロジー現象発現日(y)を求め，その値と実際のフェノロジー現象発現日との推定誤差が最小になるような組み合わせを算出した。推定誤差には平均二乗誤差の平方根(RMSE:Root Mean Square Error)を用いた。

ここでは小赤沢観測地点の気象データを補正すべきであったが，補正値が 2 ヶ月間による差から導かれたものであるため，信頼性に欠けると判断し，小赤沢観測地点のデータにて計算を行うこととした。また，2006 年は 11 月 2 日から欠測期間が存在したため，有効積算温量法には適さないと判断し，2001 年～2005 年，2007 年，2013 年～2015 年の 9 年間を対象に計算を行った。

2-2(4) 現地調査

これまでの定点画像を用いたフェノロジー観測手法は樹冠周縁部を撮影したに過ぎず，実際の樹木の内部の観察はされていないために樹木フェノロジーを正確に把握できていない可能性があった。そこで，本研究では現地調査として 2016 年の紅葉時期(10 月 17 日～11 月 11 日)に対象樹木の至近目視と樹冠下からの写真撮影を行うことで，これまでの定点画像の補完と本研究における紅葉日設定手法が妥当かどうか検討を試みた。撮影には定点観測に使用している一眼レフと同じ NIKON 社の D7000 を使用した。

3 結果・考察

3-1 紅葉日の設定

3-1(1) 気候の影響の排除

スクリーニングの過程によって除かれた画像数を表 1，表 2 に示す（ⅰ:元の画像数，ⅱ:第 1 スクリーニング後の画像数，ⅲ:第 2 スクリーニング後の画像数）。また，スクリーニングの画像例を図 14 に示す。

表 1 コハウチワカエデ解析使用画像数

年	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2013	2014	2015	2016
ⅰ	34	36	37	37	33	34	37	37	37	37	37
ⅱ	29	34	31	34	31	31	35	34	34	34	36
ⅲ	29	32	30	29	30	30	27	28	33	30	34

表 2 カスミザクラ解析使用画像数

年	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2013	2014	2015	2016
ⅰ	28	31	31	31	31	27	28	31	31	31	31
ⅱ	23	29	28	27	28	26	25	29	28	29	30
ⅲ	23	27	26	26	25	26	22	23	27	27	29

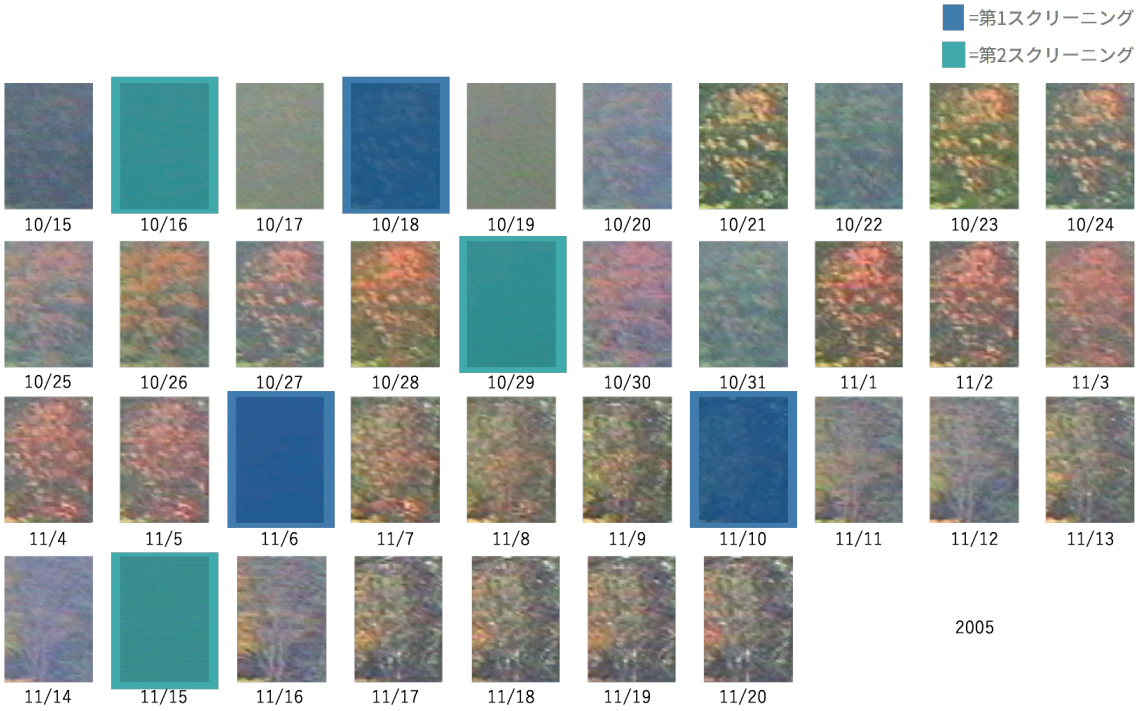

図 14 スクリーニング画像例(2005 年)

3-1(2) 紅葉日設定法の検討

指標値を計算，検討を行った結果，各指標のうち rR については紅葉時期に最大値を取り，2G-RBi, GRVI については紅葉時期に最低値を取るような 2 次の近似曲線を引くことができた。2005 年の例を図 15 に示す。これらの値は筆者が確認したところ最も紅葉が鮮やかであるような日を示していたため，これらの値を取る日をフェノロジー発現日として紅葉日の設定を各年の画像において行った。

指標値による紅葉現象の検出について Sonnentag et al.(2012) では rR が紅葉期に高い傾向になることを示しており，既往研究と近しい結果と言える。

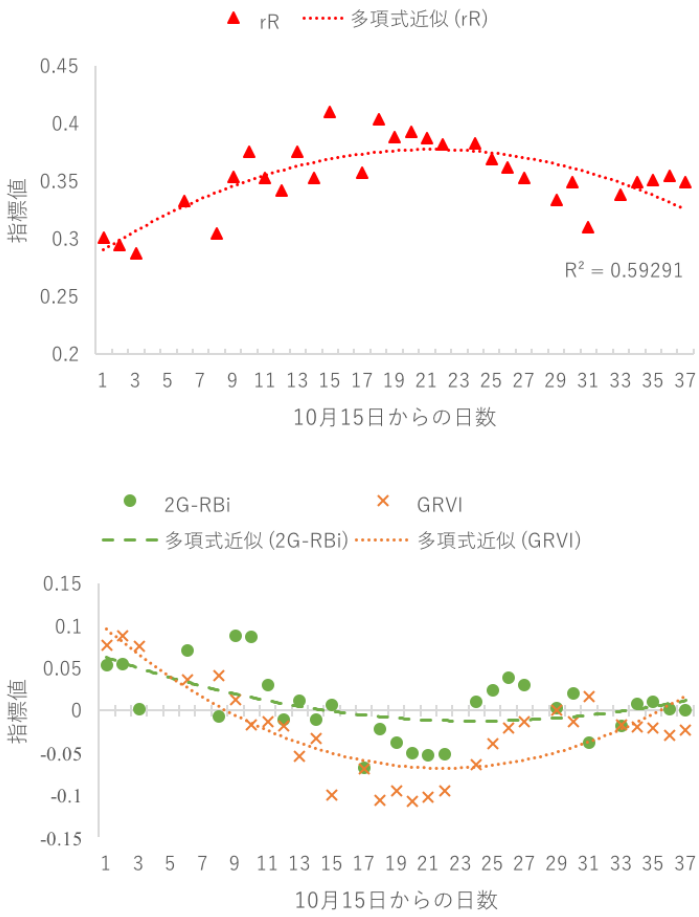

図 15 各指標値の推移例(2005 年)

紅葉の時期に各年の rR の最大値を取る日および 2G-RBi, GRVI の最小値を取る日を抽出し，目視判読を行った結果，各年においてもそれぞれ生物季節観測指針(1985)に基づけば紅葉日として判断していい日付近となった。本研究においては指標値によって導かれた日付をその年の紅葉現象のフェノロジー発現日として設定した。

しかしながら，目視判読によれば最も赤いと言えるような日を指標値による紅葉日では設定していない年が見受けられた。これは大気の状況を補正できていないことが大きな要因であると考えられる。本研究においては日全天日射量によるスクリーニングを行ったが，撮影地点は森林域であることとカメラ設置地点と撮影地点の間には約 1km の距離があるために，湿度等の影響をうまく考慮しきれなかったことが原因と考えられる。

森林域の樹木フェノロジーを観測する場合，樹冠の大部分が見える必要があるなど様々な制限がある。本研究においてもその制限を受けた結果だと言える。

3-1(3) 現地調査による妥当性の検討

2016 年 10 月 17 日～11 月 12 日の期間において対象樹種であるコハウチワカエデの至近目視と樹冠下からの写真撮影を行った。樹冠下からの観察と定点撮影画像を比較した結果を記す。

定点観測において紅葉日と判定された日の樹冠下からの画像を確認するとほとんどの葉において紅葉が確認されるものの，一部は緑の葉が残存していた。生物季節観測指針(気象庁,1985)に基づき，樹冠内部の葉の大部分が紅葉したと筆者の目視により確認できたのは 11 月 7 日であった。実際の撮影画像と比較した画像は図 16 に示す。

藤本(2008)の有効積算温法による落葉日推定において誤差が最も小さいイロハモミジでも 2.57 日であったことを鑑みるに，本研究の紅葉日設定手法は妥当なものと判断できる。

しかしながら，この結果は定点観測の欠点も同時に見出したものである。高頻度で遠隔地を観察できる定点撮影による生物季節観測では樹冠周縁部のみしか観測を行えず，生物の生理反応を把握するのには限定的なものであると言える。生物季節観測を定点観測によって補うには樹冠部が完全に確認できる撮影画像と樹冠下からの撮影画像を組み合わせて議論するのが望ましいと言える。現状では森林域において継続的にこのように観測を行うのは定期的にメンテナンスの必要性もあり，困難であると言え，遠隔による正確な樹木の生物季節観測を行うにはまだ課題が残る。

図 16 定点観測画像(上) と現地撮影画像(下)

(赤枠:指標値による紅葉日，橙点線枠:目視による紅葉)

3-2 紅葉日の経年変化

先述した手法によって設定した紅葉日の経年変化を検討した。2001 年～2007 年の画像データと 2013 年～2016 年の画像データは解像度の異なるデータとなるため，紅葉日の設定の際には解析範囲を指定した上で指標値の計算を行った。

3-2(1) 各樹種の紅葉日

1)2001 年～2007 年

ロボットカメラ映像から切り出した画像から指標値を計算し設定したコハウチワカエデとカスミザクラの 2001 年～2007 年における紅葉日を図 17 に示す。

コハウチワカエデではこの間において 3 つの指標値で設定した紅葉日に 1 次回帰直線を引くと決定係数はそれぞれ rR で 0.17, 2G-RBi で 0.52，GRVI で 0.01 となり，高くない数字であるものの rR と GRVI では紅葉日が遅くなっている傾向が見られた。

カスミザクラでは紅葉日の決定係数は rR で 0.04, 2G-RBi で 0.05, GRVI で 0.03 と低い値になり，傾向は見出だせない結果となった。

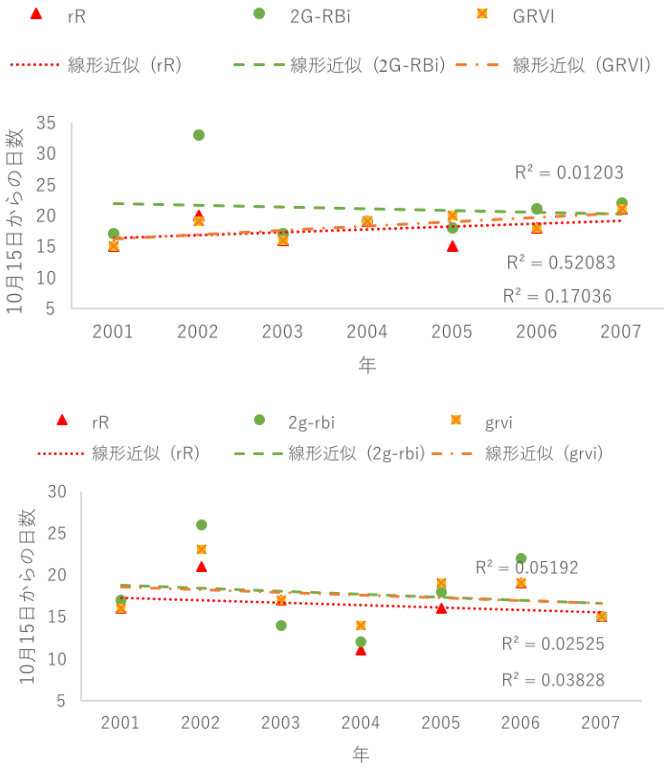

図 17 年毎の各指標値の紅葉日
(上:コハウチワカエデ，下:カスミザクラ)

コハウチワカエデにおいて rR と GRVI により推定した紅葉日が 2001 年，2003 年，2004 年，2006 年，2007 年において同じであったことが特徴的であり，これは rR と GRVI は RGB のうち R の値を重視している指標であるために似たような傾向を示したのだと考えられる。

2)2013 年～2017 年

2001 年～2007 年のものと同様の手法で設定した紅葉日を図 18 に示す。コハウチワカエデの 2013 年～2016 年の紅葉日についての回帰直線に対する決定係数は rR で 0.45，2G-RBi で 0.23，GRVI で 0.48 となり，この間においてはすべての指標において後年ほど遅くなる傾向が見られた。

カスミザクラでは回帰直線に対する寄与率は rR で 0.25，2G-RBi で 0.03，GRVI で 0.2 となり，こちらもすべての指標からの紅葉日において遅くなる傾向が見られた。

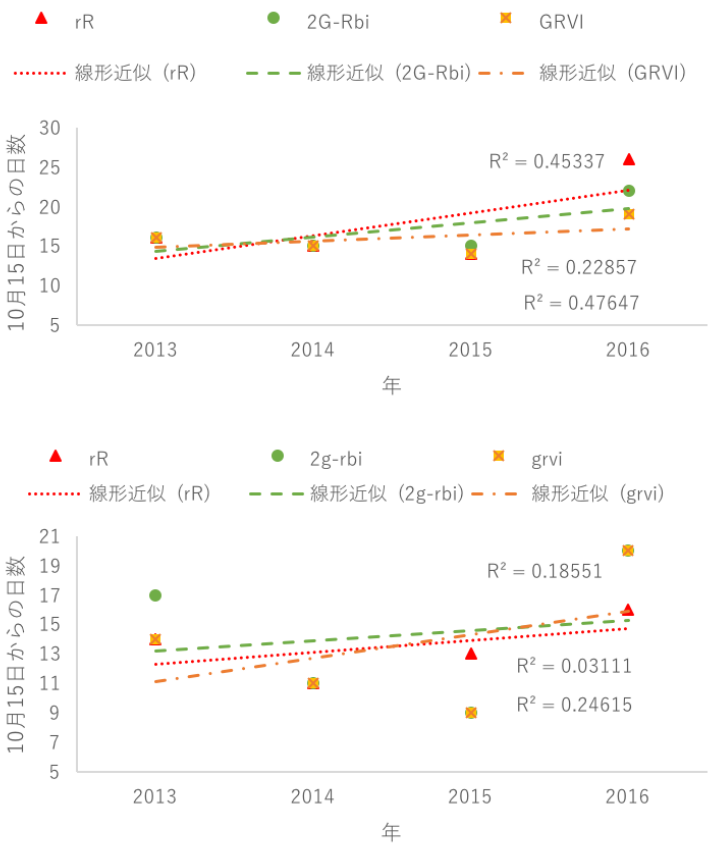

図 18 年毎の各指標値の紅葉日
（上:コハウチワカエデ，下:カスミザクラ）

また，この期間において rR と GRVI の示した紅葉日が同様の日にちを示す年があり，この 2 指標に関しては変化傾向が近しいものになることが示唆された。

3-2(2) 気温の変化と指標値の変化の関係

コハウチワカエデとカスミザクラにおけるその結果を図 19 に示す。

年ごとの比較の結果としては全ての年において統一して一つの指標値が適しているという断定はできない結果となった。それぞれの変化量の相関は緩い傾向を見出すことができたものの，統計的に有意ではない結果となった。

指標値によって見出された紅葉日は目視すると紅葉日としては適切ではないものが多数存在した。この要因としては計算に用いる指定範囲の設定に限界があったことが挙げられる。本研究において用いた画像はもともと画像解析的手法に用いる前提ではなく，生物季節観測指針にあるような視覚を用いてフェノロジー現象を把握する趣旨のもとで記録されてきたものである。そのために，撮影時のブレなどは一定程度考慮されているものの厳密に固定されているわけではなかったために，日ごとにカメラによる撮影範囲に絶対的なブレが存在していた。本研究においては画像解析用ではない画像において用いたために，ブレを考慮した上で広めに解析範囲を設定した結果，他の樹種を解析範囲に含めざるを得なかった。また，晴天時の影など天候の影響があったと考えられる。スクリーニングしたものは明らかに悪天候なものであり，日々の細かな晴天・曇天の違いなどは捉えきれていない。小熊・井出(2014)では撮影範囲に空を含めた上で映る雲の量によってスクリーニングするなどの方法を取っていたが，今回用いた画像群ではその基準を用いた判断は困難であった。以上の他樹種の映り込みと細かな天候の影響が指標値にばらつきをもたらしたのではと考えられる。

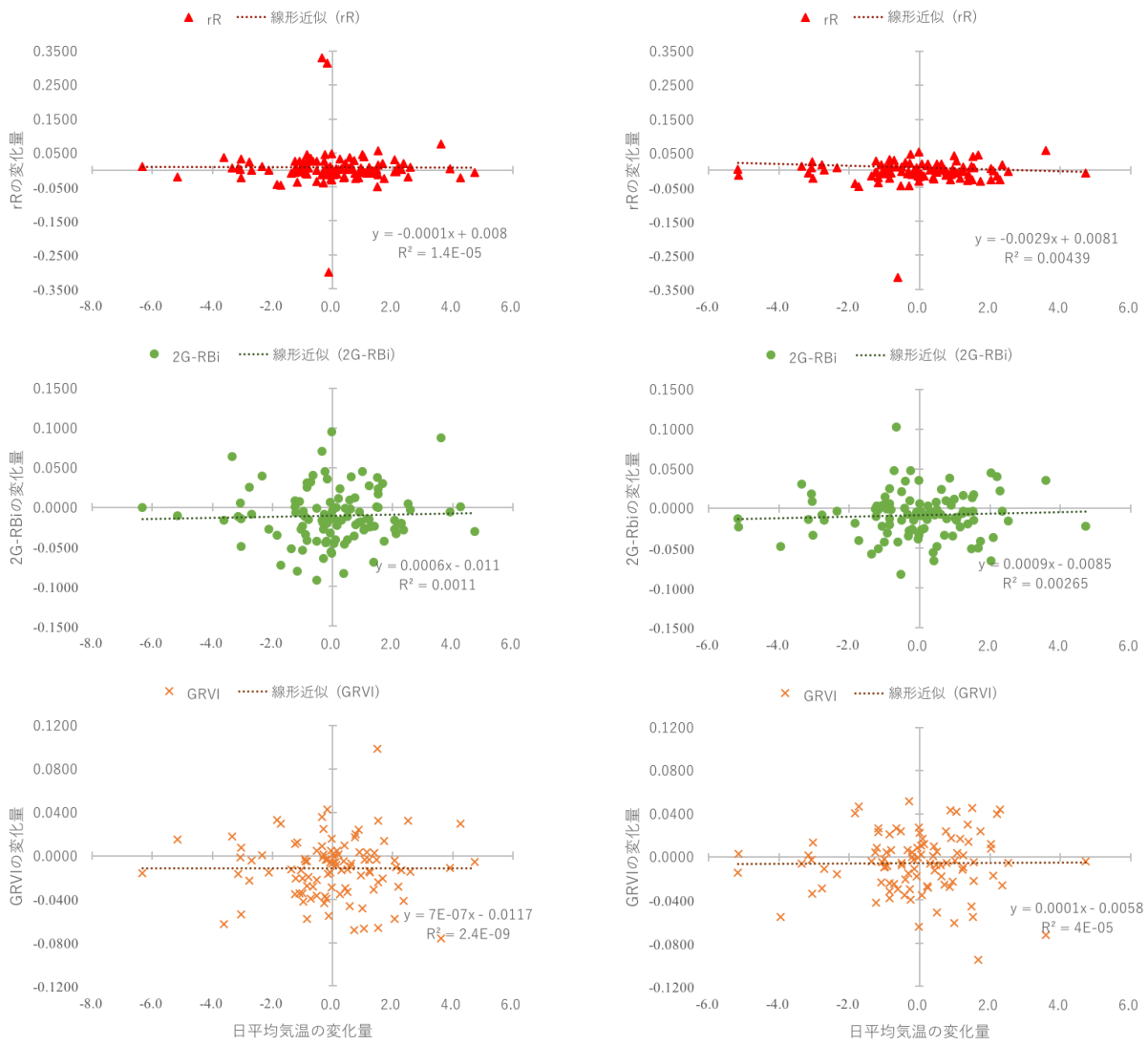

図 19 日最低気温の変化量と各指標値の日変化量
（左:コハウチワカエデ，右:カスミザクラ）

3-3 気候変動の影響評価

3-3(1) 紅葉日と気温の関係

各指標から設定した紅葉日と各年における日平均・日最低気温の年年間平均値の相関係数を算出することで気候変動を正確に反映している指標を検討した。結果は表 3 と表 4 に示す。

表 3 コハウチワカエデ各指標と気象値の相関係数

気象値	rR	2G-RBi	GRVI
日平均気温 年間平均値	0.49	0.23	0.24
日最低気温 年間平均値	0.53	0.28	0.34

表 4 カスミザクラ指標値と気象値の相関係数

気象値	rR	2G-RBi	GRVI
日平均気温 年間平均値	-0.24	-0.10	-0.17
日最低気温 年間平均値	-0.12	-0.08	-0.10

この結果は 2G-RBi や GRVI に比べて rR は直接的に R の値を反映していることから他の 2 指標と比べて相関が高い結果となったと考えられる。2G-RBi は年間を通して植生の繁茂を反映させるように検討された指標であるため，本研究のような紅葉現象のみに着目して検出しようとした場合は rR や GRVI など R の値に重きを置いているような指標がより適していることが示唆された。

また，カスミザクラにおいては年平均気温，年平均最低気温とのすべての指標との相関係数において負の値を取った。紅葉日は気温が高いほど遅れると考えられるが，異なる結果となり，気温ではない他の気象値との関連性が示唆された。これまで定説として紅葉は気温以外に降水量と日射量によって進むとされているため，これらの解析は今後の研究の課題とする。

3-3(2) 有効積算温量法による予測式の検討

ここでフェノロジー研究においてよく用いられている，有効積算温量法を用いた紅葉現象日の予測式の検討を行った。

ここでカスミザクラの紅葉日は日平均･日最低気温の年平均値との相関が弱かったため，コハウチワカエデのみを対象とし，有効積算温量法による予測式の検討を行った。

有効積算温量法における最適な起算日と限界温度を推定するために，起算日を7/1~10/20までの112日間において14日間毎の9通り，限界温度は10℃～40℃まで2.5℃ずつの13通りで合わせて117通りの組み合わせについて予測紅葉日と実際の紅葉日との平均二乗誤差の平方根(RMSE)を計算した。表4にそれぞれの組み合わせのRMSE値を示す(縦軸:限界温度，横軸:起算日)。

最もRMSEが小さくなった組み合わせは起算日が8/11(8/1から42日後)，限界温度は30℃でなった。この時のRMSEの値は5.39日であった。この値はソメイヨシノの開花日推定を有効積算温量法によって試みた青野(1993)において報告されているRMSEの全国平均値1～3日と比べると大きい。しかしながら，藤本(2008)では落葉広葉樹15種の落葉を対象にした有効積算温量法による落葉日の予測において平均の最小RMSE値が6.28日であり，示した値と近しい結果であった。これにはそもそも紅葉期の期間が長くあり，ある特定の一日を示すのが容易ではないことがあげられる。紅葉時期に関する生理的，化学的な研究を森林域において行うと同時に定点観測を行うことでより定量的に指標値の推移を議論することができると思われるが，毎日森林域の樹木まで徒歩で行く必要があり時間的な制約が存在するなど，現時点で困難な可能性は高い。

また，この結果が妥当なものか検討するために平均紅葉日と最適な起算日と限界温度の組み合わせによって算出した9年間の平均紅葉日までの積算温量とで相関分析を行った。その結果は決定係数が0.33であり，危険率5%において有意性は確認されない結果となった。

表 5 有効積算温量法のパラメータの各組み合わせにおける RMSE 値

	7 月 1 日	7 月 14 日	7 月 28 日	8 月 11 日	8 月 25 日	9 月 8 日	9 月 22 日	10 月 6 日	10 月 20 日
10.0°C	16.88	17.23	17.23	17.23	17.23	17.23	17.38	15.43	34.34
12.5°C	13.49	13.49	13.49	13.49	13.49	13.49	12.41	75.97	34.34
15.0°C	11.18	10.95	11.36	11.36	10.44	11.92	10.44	73.89	34.34
17.5°C	12.53	11.87	9.75	10.25	9.33	9.00	8.54	75.97	34.34
20.0°C	13.45	11.09	9.54	9.33	8.49	7.94	8.06	73.89	34.34
22.5°C	12.33	9.54	8.83	8.77	7.07	7.35	7.48	75.97	34.34
25.0°C	10.58	8.66	7.42	7.21	6.48	6.32	7.68	75.97	34.34
27.5°C	9.70	8.06	7.07	7.28	6.48	6.71	7.62	75.97	34.34
30.0°C	8.49	7.00	6.24	6.16	5.39	6.93	7.62	75.97	34.34
32.5°C	8.19	7.00	5.83	6.24	5.66	6.71	7.62	75.97	34.34
35.0°C	7.81	6.56	5.92	6.00	5.66	6.93	7.62	75.97	34.34
37.5°C	6.93	6.56	6.00	6.08	5.74	6.93	7.62	75.97	34.34
40.0°C	7.00	6.00	6.00	5.83	5.74	6.40	7.62	75.97	7.48

=最小 RMSE 値

4 結論

本研究では森林域に生育する樹種に対して画像解析的な紅葉日設定手法を用い，地球温暖化による気候変動が紅葉現象に与える影響を評価，予測式の検討を行った。

本研究において指標値によって設定された紅葉日は当該期間(2001 年～2007 年，2013 年～2016 年)では有意な傾向を見出すことができず，明確な気候変動の影響を評価することは困難であった。

解析用の画像ではない景観撮影画像を解析に用いたが，正確に指標値を算出するには樹木の全体像が見えた方が良い，できるだけ撮影対象まで距離が近い方など，多くの条件が存在することが明確になった。一方，1km 程度の撮影距離にある樹木を対象とすれば，景観撮影画像は一定程度の解析には耐えうるものであり，今後は画像の数を増やすことで斜面全体の生物季節観測が可能になるなどが考えられる。

指標値によって設定された紅葉日は 2 つの期間(2001 年～2007 年および 2013 年～2016 年)においてともにその期間内では遅くなっている傾向が見受けられた。しかしながら，小赤沢観測地点の年平均気温の年変動は温暖化傾向を示さなかった。どちらも有意に傾向があるとは言えない結果だったために，明確に断言できないものの，それぞれの期間内では相関関係の存在が確認でき，気温の変動を反映した紅葉日を算定することができたと考えられる。

また，有効積算温量法によって算出した平均二乗誤差(RMSE)が最小となるような起算日と限界温度の組合わせを用い，推定誤差 5.39 日で紅葉日の予測が可能な式を見出した。この誤差はあまり小さいものとは言えないものの，これはこれまでの平均気温の回帰直線による予測式とは異なるものであり，観光としての紅葉を構成しているような森林域に生育する樹種には有効なものであると示唆された。

現地観測との比較ではこれまでの定点観測手法における問題点を明らかにした。樹冠内部まで今後より推定精度の高いモデルを見出すためには複合的なデータを必要とされ，本研究で行った樹冠下から観測を含め，化学的な調査と組み合わせるなどして多様な観測を行うことが望ましい。

本研究で用いたような景観撮影画像は現代においては既に無数に存在し，それらを解析の対象とできることが示唆された。

長期間の森林域における定点観測データを解析した事例はいまだ少ないのが現状であり，本研究はその一つの知見の蓄積となったと言える。

謝辞

本論文を執筆するにあたり，多くの方にご協力頂きました。ここに心より感謝申し上げます。

東京大学大学院新領域創成科学研究科自然環境学専攻自然環境景観学分野の齋藤馨教授には学部の時にはないフィールドワークの楽しさをご教示いただき，研究を進める上においても多くのご指導を賜りました。

東京大学空間情報科学研究センターの中村和彦特任研究員には研究における相談から測定器材，秩父演習林までの送迎など多くの場面においてご協力いただきました。

東京大学大学院新領域創成科学研究科自然環境学専攻生物圏情報学分野の山本博一教授には合同ゼミの際にいつも鋭い指摘をしていただきました。

東京大学大学院農学生命科学研究科附属秩父演習林の職員の皆様，特に千嶋武氏，五十嵐勇治氏，高野充広氏には利用時に多大なる協力をいただきました。

同分野の荒井智晟氏，周云萱氏，内田竜嗣氏，大塚啓太氏，長濱和代氏，OB である濱泰一氏および生物圏情報学分野の中島綾一郎氏, 阿部周平氏, 小林昂太氏には研究室の諸々からゼミ時の指摘などあらゆる場面で大変お世話になりました。

様々な場面で生活を支えていただいた両親・兄に感謝いたします。サポートがなければ研究を進めることは困難でした。

以上の皆様のお力添えにより本論文は完成しました。篤く御礼申し上げます。

また, 最後まで読んでくださった読者の皆様に感謝いたします。ありがとうございます。

本研究は JSPS 科研費 JP15H02722 の助成を受けたものです。

付録：解析用コードの例

本研究では画像を構成する各画素から RGB 値を抽出し，指標値の計算を行った。その際に用いた Python のプログラムコードを記載する。

```
#coding: UTF-8

import numpy as np
import cv2
import csv
import glob

for file in glob.glob('*.JPEG'):
    img = cv2.imread(file)
    print (file)
    print (img.shape)
    acer = img[:,:]
    #任意のサイズを指定
    #cv2.imshow("image", acer)
    #cv2.waitKey(0)
    #cv2.destroyALLWindows()
    meanB = np.mean(img[:,:,0])
    meanG = np.mean(img[:,:,1])
    meanR = np.mean(img[:,:,2])
    rR = meanR/(meanR + meanG + meanB)
    rG = meanG/(meanR + meanG + meanB)
    rB = meanB/(meanR + meanG + meanB)
    rbi1 = rG*2 - (rR + rB)
    rbi2 = meanG*2 - (meanR + meanB)
    grvi1 = (meanG - meanR)/(meanG + meanR)
    grvi2 = (rG - rR)/(rG + rR)
    f = open('acer.csv','ab')
    csvwriter = csv.writer(f)

csvwriter.writerow([meanR,meanG,meanB,rR,rG,rB,rbi1,rbi2,grvi1,grvi2
])

    f.close()
    print ("end")
```

引用文献

青野靖之. (1993) : 温度変換日数法によるソメイヨシノの開花に関する気候学的研究. 大阪府立大学紀要　農学・生命科学, 45, 155-192.

綾美幸・山本勝博. (2005) : 紅葉のメカニスズムにせまる－イロハカエデとオオカナダモの人工的な紅葉－. 大阪と科学教育, 19, 7-10.

土居秀幸・高橋まゆみ. (2010) : マクロスケールからみる温暖化の植物フェノロジーへの影響：気象庁・生物季節データセットによる解析. 日本生態学会誌, 60, 241-247.

藤本征司. (2008) : 気候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.

樋口広芳・小池重人・繁田真由美. (2009) : 温暖化が生物季節、分布、個体数に与える影響. 地球環境, 14(2), 189-198.

Hunter, A.F., Lechowicz, M.J.. (1992) : Predicting the timing ofbudburst temperate in trees. J Appl Ecol, 29, 597-604.

Ide, R., Oguma, H.. (2010) : Use of digital cameras for phenological observations. Ecol, Info 5, 339-347.

IPCC. (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

環境省. (2015) : 日本における気候変動の影響に関する評価報告書.

気象庁. (1985) : 生物季節観測指針. 気象庁.

気象庁. (2016a) : 気候変動監視レポート 2015. 参照日: 2016 年 12 月 20 日, 参照先: http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2015/pdf/ccmr2015_all.pdf

気象庁. (2016b) : 気象統計情報. 参照日: 2016 年 11 月 8 日, 参照先: http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php

近藤純正. (2010) : 日本における温暖化と気温の正確な観測. 日本電熱学会誌, 49(208), 58-67.

丸岡知浩・伊藤久徳. (2009) : わが国のサクラ(ソメイヨシノ)の開花に対する地球温暖化の影響. 農業気象, 65(3), 283-296.

松本太・福岡義隆. (2002) : 熊谷市における都市気候と生物季節の関係（第 1 報）―イチョウ, イロハカエデの紅（黄）葉日を例として―. 日本生気象学会誌, 39(1,2), 3-16.

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. 日生気誌, 42(2), 65-75.

百瀬成夫. (1998) : 四季動植物前線. 千代田区: 技報堂出版.

Motohka, T., Nasahara, N., Oguma, H., Tsuchida, K.S.. (2010) : Applicability of Green-Red Vegetation Index for Remote Sensing of Vegetation Phenology. Remote Sensing, 2, 2369-2387.

小熊宏之・井手玲子. (2014) : 自動撮影カメラを用いた高山植生の季節性のモニタリング. 地球環境, 19(1), 79-86.

小野朗子・林田佐智子・小野厚夫. (2015) : デジタルカメラを用いた落葉針葉樹カラマツ林の植生解析. 写真とリモートセンシング, 54(1), 20-31.

大谷俊二. (1985) : 紅葉の化学. 化学と生物, 23(11), 701-708.

Richardson, A.D., Braswell, B.H., Hollinger, D.Y., Jenkins, J.P., Ollinger, S.V.. (2009) : Near- surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology. Ecol. Applic., 19, 1417-1428.

Richardson, A.D,. Jenkins, J.P., Braswell, B.H., Hollinger, D.Y., Ollinger, S.V., Smith, M.L.. (2007) : Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleaf forest. Oecologia, 152, 323-334.

斎藤馨・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. 造園学会誌, 61(5), 597-600.

佐竹義輔・原寛・亘理俊次・冨成忠夫. (1989a) : 日本の野生植物 木本Ⅰ. 平凡社.

佐竹義輔・原寛・亘理俊次・冨成忠夫. (1989b) : 日本の野生植物 木本Ⅱ. 平凡社.

清水庸・大政謙次. (2013) : 温暖化の生物季節への影響. 遺伝, 67(6), 708-711.

篠原慶規・小松光・大槻恭一. (2007) : 日最高, 最低気温から全天日射量を推定する方法―日本への適用可能性―. 水文・水資源学会誌, 20(5), 462-469.

Sonnentag, O., Hufkens, K., Teshera-Sterne, C., Young, A.M., Friedl, M., Braswell, B.H., Milliman, T., O'Keefe, J., Richardson, A.D.. (2012) :Digital repeat photography for phenological research in forest ecosystems. Agricultural and Meteorology, 152, 159-177.

田中延亮・鎌田直人・芝野博文・尾張敏章・大川あゆ子・五十嵐勇治・荒木田きよみ. (2013) : 東京大学演習林生態水文学研究所・北海道演習林・秩父演習林における年平均気温の長期データの推定. 東京大学農学部演習林報告, 128, 1-19.

米谷法子・斎藤馨. (2009) : 気温変動がもたらす森林の樹木フェノロジーへの影響把握. 東京大学大学院新領域創成科学研究科修士号論文.

吉野正敏. (1986) : 新版小気候. 地人書館.

吉野正敏. (2012) : 季節感・季節観と季節学の歴史. 地球環境, 17(1), 3-14.