

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  
生物圏情報学分野  
平成 20 年度

気温変動がもたらす森林の樹木フェノロジーへの影響の把握

**Search the Influence of air temperature variation for Tree Phenology in the Forest**

提出 2009 年 3 月  
2008 年度 3 月修了  
指導教員 齋藤 馨 准教授  
076747 米谷 法子

## 目次

1 序論.....	3
1-1 研究目的.....	3
1-2 樹木フェノロジーに関する従来の研究.....	4
1-2-1 国内における樹木フェノロジー研究.....	4
1-2-2 観測方法の多様化.....	5
1-2-3 樹木フェノロジーと気温との関係.....	7
2 対象・方法.....	9
2-1 樹木フェノロジーの観察.....	9
2-1-1 ロボットカメラの概要.....	9
2-1-2 秩父演習林・31林班の概要.....	12
2-1-3 森林モニタリング映像を使ったフェノロジー観測方法.....	12
2-2 樹木フェノロジーと気温と関係.....	15
2-2-1 秩父演習林内の気温データ観測地点の概要.....	15
1) 気象データ観測機器.....	15
2) 気象データ観測地点.....	15
2-2-2 樹木フェノロジー発現日予測モデル内のパラメーター検討.....	17
1) 有効積算温量法.....	17
2) 温度変換日数法.....	18
3 結果と考察.....	20
3-1 気温・樹木フェノロジーの経年変化.....	20
3-1-1 気象庁観測地点と秩父演習林内観測地点（栃本・小赤沢）の年平均気温の変動.....	20
3-1-2 樹木フェノロジーの経年変化.....	24
1) 生物季節観測におけるソメイヨシノ開花日の長期傾向.....	24
2) 秩父演習林内のヤマザクラ満開日の経年変化.....	27
3-2 ヤマザクラ満開日と気温との関係の検討.....	28
3-2-1 ヤマザクラ満開日と月平均気温との関係ー予備解析ー.....	28
3-2-2 ヤマザクラ満開日への樹木フェノロジー発現日予測法の適用ー本解析ー.....	31
4 結論.....	34
謝辞.....	35
付録：解析用気温データセットの準備.....	36
参考文献（アルファベット順）.....	42
要旨	

# 1 序論

## 1-1 研究目的

生物季節(フェノロジー)とは、桜の開花やウグイスの初鳴きなど、動植物がある一定周期に示す生態や、形態の変化のことである。人々は生物季節を観察することにより、季節の遅れ・進みを感じ、移りゆく季節を楽しむことができ、俳句や茶道、華道などでは、その趣を積極的に取り入れてもきた。また、人々はその年、もしくは前年の気象状況などによって、生物季節の発現日が前後することを感覚的に知っており、行事日や農業・漁業における様々な作業日や作業内容を決定する際の重要な材料として利用してきた。全国各地で気象観測が行われているような状況もなく、気温と発芽の関係の科学的な証明が不十分な時代においては、生物季節を観察する重要性は、かなり大きかったと推測できる。

しかし生物季節の重要性は、過去の人々にとってだけではないことが、最近わかってきた。例えば、生物季節の発現日が、年ごとの気象状況によって変動することは、青野(1993)などによって確認が進み、人々の直感の正しさは証明されつつある。それに伴って、生物季節の変化から環境変動を予測・計測できるのではないかという期待が高まっている。

この期待を裏付けるものの1つに、気象庁が実施したソメイヨシノの開花についての観測報告:異常気象レポート2005(気象庁)がある。これによると、ソメイヨシノの開花は、この50年間で全国平均4.2日も早まっているということであった。さらに詳細に分析してみると、大都市では平均6.1日早くなっているものの、中小規模の都市では2.8日しか早くなっていないことが明らかになり、“都市化”による気温上昇、特にヒートアイランドの影響が考えられることが示唆された、と結論づけられている。

メディアの発達・普及により、このような生物季節についての情報が広く伝わるようになってきた。生物季節や環境問題に対する関心も高まり、人々は地球温暖化の影響と生物季節の変化を結びつけて考えるようになってきた。

生物季節の中でもサクラ、特にソメイヨシノの開花については、さくら祭りやいわゆる「お花見」といった行事が多く存在することや、観光資源として重要視している地域も多いため、社会的関心が高い。また、ソメイヨシノはクローンであり、多樹種と違って全国での比較が格段に有利であること、植栽面積が多く、開花という生物季節現象の判断がつきやすく、気象庁が実施する生物季節観測の全国共通観測項目の1つとしてサクラ(離島や北海道などの一部地域を除いて、基本的にはソメイヨシノ)が選定されており、その情報が紙媒体・Web上で公開され、観測期間・範囲ともに優れたデータが蓄積されていることから、多くの研究がなされてきた。その中でも有名なものが、青野(1993)の考案した温度変換日数法にというソメイヨシノの開花予測モデルの開発であろう。これは、ある特定の日から開花までに必要な温度変換日数(ある温度が、その植物にとって何日分の成長量に相当するかを、ある定数を用いて「温度」を「日数」へと変換したもの)が一定であることから、ソメイヨシノの開花を予測する方法である。この方法は、現在、気象庁の発表し

ているサクラの開花前線の基になっている考え方であり、今ではさらに改良されたモデルが使われている。

最近では、森林樹木に対しても、生物季節の変化を観察するだけでなく、樹木フェノロジーに対する月平均気温や積算温度との関係性を解析目的とする研究（木村ら；1994、澤田ら；1999）が増えてきはいるが、気温—樹木フェノロジーの解析事例はまだまだ少ない。最も単純なフェノロジー発現日予測モデルの有効積算温量法でさえ、モデル内のパラメータの検討が十分に行われていない現状にあることが示唆されている（藤本；2007、2008）。こういったことから、地球温暖化に伴う樹木フェノロジーへの影響の把握は、予測モデルの開発・検討が不十分なため困難であった。

その主な原因は、20～30年分の「気象」と「樹木フェノロジー」の連続データをそろえることが難しいことにあったが、昨今、映像を使った森林モニタリング手法の開発により、現地に行くことなく観察が可能になってきた。

そこで、本研究では東京大学秩父演習林内で自動記録されている森林モニタリング映像を用いて、樹木フェノロジーの経年変化を把握するとともに、映像から観察されたフェノロジー発現日と秩父演習林内で観測される気温データを用いて、フェノロジーと気温との関連の検討と、予測モデルにおける適切なパラメータを算出することを目的とした。

## 1-2 樹木フェノロジーに関する従来の研究

### 1-2-1 国内における樹木フェノロジー研究

地球温暖と植物の開花や紅葉、動物の所見や初鳴きなど生物季節の変化に関する事例は国内外を問わず、Hepper（2003）など多くの研究例がある。また、昨今では、IPCCの温暖化防止にむけた国内外の取り組みが本格化する中で、植物への影響、特に自然植生や森林、希少動物、農作物などへの影響の解明と、その影響の評価のために必要な予測手法の開発が急務とされている。

しかし、気候変動がもたらす樹木フェノロジーへの影響評価を直接試みた研究事例は意外に少なく（青野、1993；甲斐ら、1996 など）、気候変動との関連はいまだ論争状態にあるといえる（Hänninen, 1995；Chaine, 2000）。その大きな理由としては、フェノロジー発現日予測法の開発の遅れがあげられ、開芽時期は比較的開発が進んでいるものの、樹木の光合成量や森林の純生産量の変化を推定する上で重要となる開芽晩期（展葉終了期）の予測モデルの開発は進んでおらず、落葉期についても、気温以外の気象因子の関与＝夏の乾燥・日長・老化など様々な要因が働きあって起こる現象であることから、気温との相関が明瞭でないため、気温との関係の分析事例自体が少なく（木村ら、1995；甲斐ら、1996；澤田ら、1999 など）、予測モデルの開発は殆ど進んでいないことが藤本（2007）により指摘されている。加えて、フェノロジー発現日の予測法が検討されている研究の多くは、気象庁

の生物規則観測の情報を使っており（例えば、中原、1969；高木ら、2006）、都市部以外の森林樹木のフェノロジーがどのようなモデルで表現できるのかを検討することは重要であると考える。

モデルの開発が進展しない理由の一つとして、生物季節と気象条件の関係性を知るための基礎解析に必要な、10～30年分の【気象データ】と【生物季節データ】の2つを揃えることが困難である事が挙げられる。その原因として、日本の森林には個々の研究者による調査区が世界でも群を抜いて存在するものの、研究サイト間のネットワーク・情報公開システムの脆弱性、短期的に成果が出にくく、人材・予算の不足から研究の継続が困難になってしまい、せっかくのデータが死蔵してしまうケースが多いことが言われている。

また、欧米諸国と違って国土が南北に広がり急峻な地形である事から、その気候が複雑であり、その結果、生物季節だけでなく植物種も多様であるため、全国共通項目の植物を選定する事が難しく、その場所でのみ適用できるモデルにとどまってしまい、一般的モデルとしての開発が難しいことが考えられる。

ただし、昨今では、全国演習林協会（LTER）によって全国各地にある大学演習林の生物季節観測方法の一元化や気象情報の公開システムの構築が高木ら（2007）によって進められたり、Web上で配信されている映像を使って生物季節の観測を渡辺（1996）が行ったなど、徐々にではあるが森林域の情報の収集方法が整いつつある。

日本における、フェノロジー発現日の予測には、青野（1993）の考案したソメイヨシノの開花予測方法である温度変換日数法が有名である。これは全国で統一された予測方法を考案し、起算日：2月1日、温度特性値： $17\text{kcal mol}^{-1}$ で多くの地点で推定誤差RMSEが1～2日となる予測方法である。これは、精度も高く、桜祭りなどの時期を予測するなどの社会的関心の高さから、非常に多くの研究がなされ、改良が加えられている。ただし、開花の予測には、最適な開花日予測モデルを使う必要があるのはもちろんのこと、気温予測が必要であり、その気温の予測精度が、そのまま開花日予測の精度にも影響してしまうために、開花日を予測する事は非常に難しいと言われている。

### 1-2-2 観測方法の多様化

気象庁では、生物季節観測を全国90都市、統一観測方法で1953年から実施している。生物季節観測は、量・質ともに優れたモニタリングデータであり、その情報は紙媒体やHPでいち早く公開され、気象データも一緒に入手できることから、このデータを使った様々な研究がなされてきた（例えば、中原；1969、高木ら；2006）。

植物季節に及ぼす都市化＝ヒートアイランドの影響に関する研究では、ソメイヨシノの開花日の気象官署間や大都市と小都市との比較（小元ら；1990、増田ほか；1999）、東京都市区部内での比較（松本；2006）が行われ、開花日がヒートアイランドなどのローカルス

ケールでの気候環境を表す指標となりうることが示されている。

日本の大都市（札幌、仙台、名古屋、京都、福岡）と、都市化などによる環境変化が比較的少ない中小都市 17 地点（網走、根室、寿都、山形、石巻、伏木、長野、水戸、飯田、銚子、境、浜田、彦根、宮崎、多度津、名瀬、石垣島）の過去 100 年間の気温変化が気象庁（2002）に報告されている。これによると、大都市では+2.5℃、中小都市では 1.0℃の昇温が観測されており、都市化の影響がはっきりと現われている。IPCC（2001）では、地球上において過去 100 年間で  $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$ （陸上では  $0.7^\circ\text{C}$ ）上昇したと報告しており、前述した日本の中小都市の気温上昇量 1.0℃は全球平均値よりも大きく、ソメイヨシノの開花の早まりは、都市化による気温の上昇傾向をより強く反映している可能性が考えられる。

では、都市化の影響や周囲状況の変化が少ない場所での生物季節はどうなっているのか。この疑問に答えるのは、日本における都市部以外での生物季節の情報が公開されていることが少ないため、困難な状況にあると考える。日本においては、2003 年に国の主導で全国に長期モニタリングサイト 1000 カ所の設置と、研究のバックアップの仕組みや情報の共有化がすすめられ、比較的古くから演習林（＝長期観測サイト）を保有する大学においてさえ、1999 年になって、それまで大学独自の方法で行っていた観察方法・対象項目を共通レベルに設定し、観測データの一元化を進めるなど、ようやく仕組みが出来上がってきたといったところである。生物季節観測データは、長期間観測（約 30 年間）されて初めて信頼・解析に耐えうるものとして利用されるのだが、森林域での観測データのほとんどが観測途中で途切れるか、死蔵してしまうケースが多い。その理由として、長期観測の多くが個人の努力によって運営され、データ公開や解析の遅れ、結果が出るのにも時間がかかるために、人的・経済的において研究の継続が困難な状況にあることが、本間（2001）により指摘されている。また、筆者が考えるに、都市化の影響が少ないような場所は、概してアクセスが悪く、従来のような目視による毎日の観察方法では、観察者への負担が大きく、生物季節観察が継続し難い状況だったのではないかと考える。

そのほかの観察方法として、衛星画像や定点写真・ライブカメラ映像を用いたものがある。Reed ら（1994）は可視域と近赤外線反射率から計算される正規化植生指標（NDVI）の変動が、植物の葉量やバイオマス量の季節変化と高い相関関係にあることを示し、広域の観測に衛星データが用いられている。ただし、衛星の寿命が 10 年未満であり長期変化を同一プロトコルで（協定）で追跡できない点や、雲や大気などのノイズを除去・補正するなどの専門的な技術が必要であるため、一般的者向けではないと考える。一方、ライブカメラ映像を用いての観察は、ある程度の初期費用がいるものの比較的少ない労力で運用でき、映像から直観的に事象を把握できるため、今後有望な手段の一つとして期待されている（地球温暖化 WG 報告書；2008）。昨今の技術革新から、個人でも手軽に Web カメラの購入・設置が容易になったことから、世界各国の今の状態を定点映像として見る事ができる。環境省の運用するインターネット研究所の映像を使って、浜田（2004）が乗鞍岳の積

雪モニタリングを、渡辺（2006）が志賀高原において植物季節の年変動の観察を行っている。乗鞍岳では、2003年から市民と協力して、山岳写真を定期的に撮影してもらい、多地点における山岳の残雪データの収集・蓄積を行っている（長野研報告書；2008）。これらの映像や市民の協力により撮影された写真を使って、地域的なレベルでのモニタリング継続への期待が高まっているものの、観測が継続され、その結果が発表・公開されていることは、非常にまれである。

映像による生物季節の観察では、画質や気象状況によって観察できる事象が限られ、カメラのメンテナンスが不可欠であり、必ずしも目視による観察より優れているとは言い難い。ただし、一枚の映像の中で複数の観察対象が写っている場合、数値データと違って、その変化の様子を直観的に理解でき、多様な情報を得る事が出来ることができ、また、映像データを蓄積していれば、過去数年分との比較が可能になり、観測者による誤差を最小限に抑えることが示唆されている（浜田；2004、藤原；2005）。

### 1-2-3 樹木フェノロジーと気温との関係

古来の人々は、植物季節と気象状況の間には何らかの関係があることを感覚的・経験的に分っており、その現象の発現日を農作業の目安などに使っていた。樹木フェノロジーに関しては、これまでに様々な研究が展開され、開芽期と開芽期の平均気温との間に高い相関関係があることや（木村ら；199、澤田ら；1999など）、ソメイヨシノの開花には、3月の平均気温との高い相関関係があることが松本（2006）により明らかにされている。また、植物の生長速度がアレニウスの式に近似的に表現できるという金野（1989）の実験結果を基に、青野（1993）が開発した温度変換日数法により、ソメイヨシノの開花日の予測だけでなく、他にも、農作物や園芸樹木の授粉時期や播種時期を決めるための予測方法の検討が行われている。

信頼性が高く、精度の高い予測法を確立するためには、どのようなモデルに着目するかを検討や、モデルを構成するパラメータの十分な調整も必要である。しかし、予測モデルには、最も単純で古典的な有効積算温量法(Lindsey；1963、Cannell & Smith；1983など)以外に、冬季の低温要求を組み込んだ並列モデル（parallel model、Hänninen、；1990）、ソメイヨシノの開花予測式などに使われる温度変換日数法（DTS model、青野；1993）、統合モデル（Unified model、Chuine；2000）など、様々なモデルが考案・利用されているものの、必ずしも、新しいモデルの方が古いモデルよりも実測データとの誤差（平均二乗誤差）が小さいとはいえず（Hunter & Lechowicz；1992）、唯一のモデルは確定していない。

加えて、気象庁と並び、サクラの開花予報を発表している Weather News の解析においては、従来は通常 30年～50年程度の長期間のデータを使用していたのを、昨今の平均気温の上昇傾向により、長期の統計データでは、正確な予測が難しくなっており、気温の

上昇傾向にある15年または20年の統計データを基本として開花予測を行っていることが言われている。既に、パラメーターの検討がなされている樹種についても、再度、近年の気温を使用したパラメーターの見直しをする必要があるのではないかと考える。

森林域においては、これまでに樹木フェノロジーと気温との関係を解析する研究があるものの、フェノロジー研究で一般に用いられている予測モデル（例えば、有効積算温量法や温度変換日数法）を森林樹木へ適用するといった事例は少ない。また、予測モデルのパラメーター設定は、開芽開始期に関するものに限られることが多く、樹木や森林の光合成量や純生産量を予測する上で重要となる開芽晩期（展葉終了期）や落葉期のパラメーター調整が十分に検討されているとは言えず、樹種間や地域間の比較など、研究の余地がまだまだ残っている分野と考える。藤本（2008）が、森林樹木においては予測モデルのうち最も単純なモデルである有効積算温量法のパラメーター：限界温度と起算日の値さえ調整が充分なされていない状況にある、と指摘していることから、本研究では、有効積算温量法と、この方法と共にフェノロジー研究の分野で多用されている、温度変換日数法を使って、樹木フェノロジーと気温との解析を行うこととした。



## 2 対象・方法

### 2-1 樹木フェノロジーの観察

東京大学秩父演習林内では、定点カメラ（以下、ロボットカメラ）による景観・音の自動記録を 1995 年から行っている（斎藤、1998）。本研究では、このロボットカメラによって撮影された映像（以下、ロボットカメラ映像）の目視という方法を用いて樹木フェノロジーの観察を行う。あくまで、樹木フェノロジーが記録された映像を、パソコン画面上、もしくは紙に印刷した状態で、ある観察基準をもとにフェノロジー観察を行っているのであり、デジタル画像解析は行っていない。映像を用いた観測の特徴は、同一観察者による繰り返しの観測、他の観察者による全く同じ方法での観測ができることから、観測値の分散や観測者による観測値の偏りを評価でき（藤原、2005）、山間地などのアクセス性の低い場所においても、装置の故障などのトラブルがない限りは基本的に毎日の観測が可能である。また、初期設備や、定期的なメンテナンスなどが必要ではあるものの、現地に行くことなく観察できることから観察者の負担を減らすことができ、即ち、この分野における課題である、研究の継続性が保たれやすくなり、浜田（2004）が行った Web 上で配信されている映像を使った残雪モニタリングや、渡辺（2006）のシラカンバの生物季節変化など研究から、映像を使ったモニタリングの有効性が示唆されている。

これまでの研究では、森林域の樹木フェノロジーを直接観察する、という方法を用いて観察がなされることが多く、この場合、アクセス性の悪さなどから毎日の観察が困難であり、3～7 日おきの観測値を%で把握し、例年の傾向と比較しながら予測している。しかしながら、1・2 日で劇的に変化するサクラの開花や、落葉などのフェノロジー発現日を決定するには映像による観察の方が、より実際と近いフェノロジー発現日を把握できるだけでなく、過去の映像と比較でき、観察誤差を防げるという利点があるのではないかと考える。

#### 2-1-1 ロボットカメラの概要

ロボットカメラが設置されているのは、埼玉県最西端にある旧大滝村：35° 56'N、138° 48'（ウオツ地図より計測）に位置する、東京大学秩父演習林内である。秩父演習林は荒川源流域にあり、秩父多摩甲斐国立公園に包含されている。その周囲約 20km 以内には 1 万人を超えるような規模の都市がなく（写真の赤点線）、ヒートアイランドの影響は極めて低いものとする。

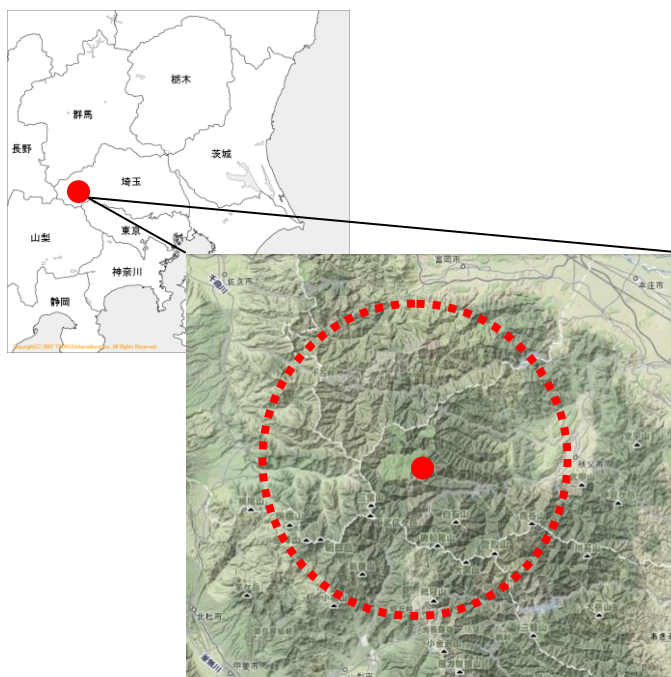


図 1 秩父演習林の位置（赤点線が半径 20km を示す）



写真1 (左)      ロボットカメラ設置の様子 (赤部分にロボットカメラと気象観測装置)  
 写真2 (中央)    ロボットカメラとステレオマイク、気象観測装置の一部  
 図2 (右)        ロボットカメラによる撮影方向

ロボットカメラは秩父演習林内矢竹沢地区 (写真) において 1995 年 10 月から運用を開始し、いくつかの変更点 (斎藤ら、2002) がありながら現在も継続中である。ロボットカメラの制御には AC100V が不可欠であり、商用電源のない林内では、ガソリン発電機と太陽光発電を用いて電源を得ている。撮影時刻は光線がほぼ正面となる午前 11 時半ごろ、あらかじめ設定したカメラ方向と画角 (以下、ショットと呼ぶ) を毎日自動で記録している。約 1 km 対岸の 31 林班の様子を 1 ショット 15 秒×約 40 ショットをビデオテープに記録している (撮影ショットは図 3 を参照、赤枠がそれぞれの撮影ショット)

これらの映像は、藤原 (2008) によって試験運用中ではあるものの長期定点森林映像アーカイブ【robotcamera movie】<http://bis01.nenv.k.u-tokyo.ac.jp/~akio/playmp4smil.php> において検索・閲覧することができ、さらに、斎藤 (2008) の開発した定期配信システムによりその日の様子を、携帯やブログで見ることが出来るようになった。このように、森林モニタリング映像は Web 上にデジタルデータとしてアップされていることで、比較的簡単にアクセス・利用できる形で存在している。



図3 森林モニタリング映像で撮影されているショットの代表例

青枠が、ヤマザクラが記録されている Shot-09 を示し、標高約 1000m 付近である。  
各ショット（赤枠）には、固有の番号が割り振られている。

## 2-1-2 秩父演習林・31林班の概要

撮影対象地である 31 林班は、スギ・ヒノキを中心とする人工林と、落葉広葉樹を主体とする二次林で構成されており（図 3 参照）、関東の一般的な山地の植生であり、その大部分は南西斜面に位置している。さらに詳しい情報を、秩父演習林の保有する 31 林班現況簿より、抜粋した。

基岩：秩父古生層に属し緑色珪質板岩、珪岩（信州道付近に並行）、黒色千枚岩（中腹部一帯）、輝緑凝灰岩（入川に接する部分）があり、その間に石灰岩が散在する。

地形：入川および矢竹沢左岸地域を占め標高 730～1,510m の間にある。地形は矢竹沢沿いに僅かに陰阻な部分がある他、緩慢で良好な地形をしている。入川および矢竹沢沿いの山脚部に崩壊地が数箇所見られる。傾斜方向は全体的に南に傾き部分的には南 40%、南西 40%、南東 20%である。

土壌：埴土、埴質壤土を主とし腐植質に富み、礫の混入が少なく地味は良好である。土層は深く特に入山の緩斜地は頗る深い。

気候：日当りは良く温暖だがやや乾燥しやすい。秩父演習林の年平均気温は 11.5℃、平均降水量は約 1400mm である。

## 2-1-3 森林モニタリング映像を使ったフェノロジー観測方法

森林モニタリング映像を使つての観測は、基本的には毎日の観察が可能ではあるものの、映像に写る対象樹木を観測することであり、葉の重なりにより後ろ部分の観察ができないなど樹木の一部を観測しているにすぎない。従来 of 直接対象木を目視して、樹木全体の様子を把握しているのとはことなり、かつ、現段階におけるロボットカメラ映像では、画像が粗いなどの理由から判読できる樹木フェノロジーが限定されるため、まず始めに、映像から観察可能な樹種と樹木フェノロジーを抽出した。その抽出の手順としては、1) 1995 年から撮影場所・画面構成が比較的变化の少ない、定点観測されているショットの選定、2) そのショット内で、周囲との区別がしやすい樹木の選定（色の変化や樹冠部分の判読が容易、フェノロジー発現時期が隣接する樹木よりも特徴的）、3) 選定された樹木の樹種が既知である。ことを基準に行った。

以上から、ロボットカメラ映像からある程度の精度を持って観察できるフェノロジーは【満開日・開葉初期日・紅葉初期日・紅葉日・落葉日】、樹種は【ヤマザクラ、カラマツ、クリ】であった。今回はそれらの中でも、精度高く観察できる、“Shot-09 ヤマザクラ満開日”（以下、“満開日”）を観察対象として決定した。Shot-09 の映像を、写真 3 に示す。

直接目視する観察方法によって蓄積されてきた豊富な生物季節データとの比較をするためには、従来の方法と映像による観察方法との間で、観察されるフェノロジー段階が、



写真3 樹木フェノロジー観察対象ショット：Shot-09  
\* 画面左上の白い花が咲いているのが、ヤマザクラである。  
画面右下には、撮影された日付・時刻が記録されている。  
(この映像は、2006年5月6日の11時39分4秒に撮影)

出来る限り近い状態であるのが望ましいと考えた。気象庁の制定する生物季節観測指針(後述\*参照)を参考としている研究が多いことから、本研究においてもこれを参考に、花の割合・様子が変わらない日の前日を満開日、として定義した。

\*生物季節観測指針(気象庁)：満開日＝対象樹木の約80%以上のつぼみが開いた状態となった最初の日、紅葉・黄葉日＝対象樹木全体を眺めた時に大部分の葉の色が紅色・黄色になった最初の日、として定義されている。全国演習林などでは、3~7日おきの観測時に、樹木全体の何%が変化しているかを記録し、対象とする開花日・紅葉日などを数年間のデータから予測する方法を採用している。

“満開日”の観察を始めるの前に、データの劣化防止や取扱いやすくするためにも、ビデオテープに記録された1ショット15秒×約40ショットのロボットカメラ映像をDVファイルへデジタル化し、さらに、15秒のうち、より鮮明な時点の静止画(JPEG)を切り出した。

事前にDVファイルにより作成した静止画を、Windows Media Playerを使って日付順に表示、前後数日を比較検討しながら樹木フェノロジーの観察、“満開日”の決定を行いました。詳しい観察方法を以下に示します。

最初に、その年の花が散って、展葉するまでの一連を見た後に、満開日と思われる日に目星をつけ、その周辺の前後日数の映像を行ったり来たりして、例えば、2005年では4/30から5/2までの3日を繰り返し見直し、花の割合・様子が変わらない日と判断した2日間、つまり青枠の部分を決定します。

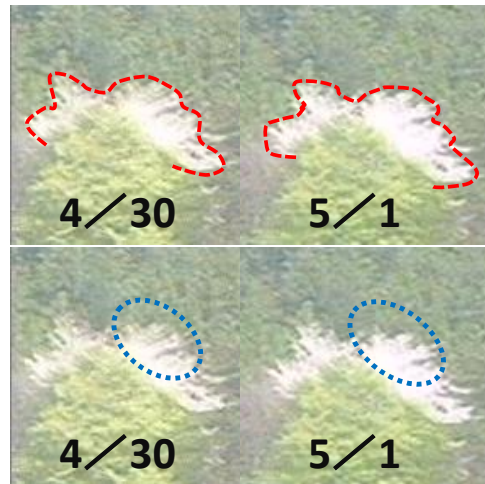
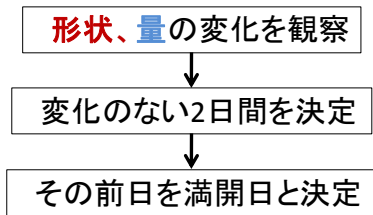
“満開日”はその前日と定義しているため、黄色い枠の日が、観察から決定した満開日になります。この作業は、主観に頼ることが大きいため、別の日に同様の手順を行うなどして繰り返し判定を行い、再現性の確保に努めました。また、“満開日”を基準とした一覧表を作成し（図5、図6）、年毎による誤差を補正、満開日の確度を高めました。

○観察方法のまとめ

●観察対象：Shot-09 ヤマザクラ満開日

＝満開日の定義＝ 花の割合・様子が変わらない日の前日

●方法：Shot-09 の目視観察



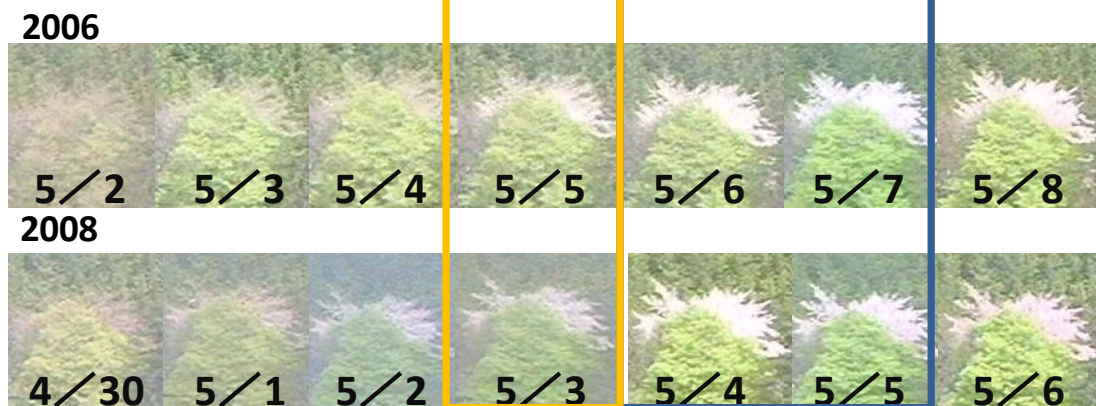
・2005年においては4月30日と5月1日では、形状の変化は見られないものの、量の変化（4月30日の方が、後ろのすぎが見えやすいこと）が確認できる。

図4 ヤマザクラの割合・様子の変化  
\* 2005年の様子。赤印が形状を、青印が量の変化を示している。

1) 映像の連続再生で比較



2) “満開日” 一覧表で年毎の誤差を補正



満開日

19 96	5/7	No Date	No Date	5/10	5/11	5/12	5/13
19 97	4/27	4/28	4/29	4/30	5/1	5/2	5/3
19 98	4/19	4/20	4/21	4/22	4/23	4/24	4/25
19 99	4/28	4/29	4/30	5/1	5/2	5/3	5/4
20 00	5/5	5/6	5/7	5/8	5/9	5/10	No Date 5/11
20 21	4/30	5/1	5/2	5/3	5/4	5/5	5/6
20 02	4/18	4/19	4/20	4/21	4/22	4/23	4/24
20 03	4/27	4/28	4/29	4/30	5/1	5/2	5/3
20 04	4/18	4/19	4/20	4/21	4/22	4/23	4/24
20 05	4/26	4/27	4/28	4/29	4/30	5/1	5/2
20 06	5/1	No Date	5/3	5/4	5/5	5/6	5/7
20 07	4/30	5/1	5/2	5/3	5/4	5/5	No Date 5/6
20 08	4/29	4/30	5/1	5/2	5/3	5/4	5/5

図5 Shot-09 ヤマザクラ満開日の一覧表 (1)



No Date						No Date	19 96
5/14	5/15	5/16	5/17	5/18	5/19	5/20	
					No Date	No Date	19 97
5/4	5/5	5/6	5/7	5/8	5/9	5/10	
							19 98
4/26	4/27	4/28	4/29	4/30	5/1	5/2	
							19 99
5/5	5/6	5/7	5/8	5/9	5/10	5/11	
					No Date	No Date	20 00
5/12	5/13	5/14	5/15	5/16	5/17	5/18	
							20 21
5/7	5/8	5/9	5/10	5/11	5/12	5/13	
							20 02
4/25	4/26	4/27	4/28	4/29	4/30	5/1	
							20 03
5/4	5/5	5/6	5/7	5/8	5/9	5/10	
							20 04
4/25	4/26	4/27	4/28	4/29	4/30	5/1	
							20 05
5/3	5/4	5/5	5/6	5/7	5/8	5/9	
					No Date		20 06
5/8	5/9	5/10	5/11	5/12	5/13	5/14	
						No Date	20 07
5/7	5/8	5/9	5/10	5/11	5/12	5/13	
				No Date	No Date		20 08
5/6	5/7	5/8	5/9	5/10	5/11	5/12	

図 6 Shot-09 ヤマザクラ満開日の一覧表 (2)

## 2-2 樹木フェノロジーと気温と関係

### 2-2-1 秩父演習林内の気温データ観測地点の概要

気温データは秩父演習林職員の方々の協力により、観測・提供されています。

出典：科学の森教育研究センター <http://www.uf.a.u-tokyo.ac.jp/>

#### 1) 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°C
- ・ ロガー CR10X (キャンベル社)

\* 気温は 10 秒に一回の測定を行い、その平均値を 6 分に一回、観測値として記録。

#### 2) 気象データ観測地点

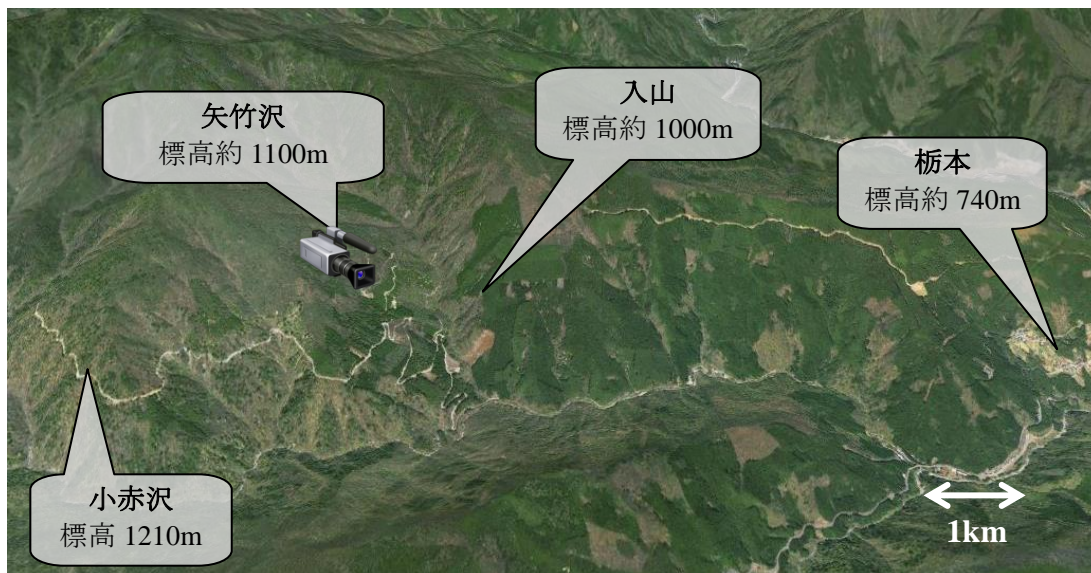


図7 秩父演習林における気象観測地点  
出典：ウォッチず：地図閲覧サービス（国土地理院）

#### 【小赤沢】：図8

緯度経度：25° 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

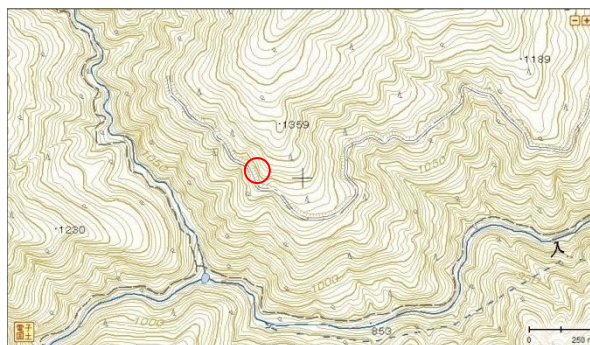


図8 小赤沢観測点の2万5千分の一の地形図  
出典：ウォッチず：地図閲覧サービス（国土地理院）

### 【矢竹沢】 図 9

緯度経度：35° 56'N 138° 48'E

標高：1050m

観測期間：2004年8月27日～

2008年6月5日

2008年7月6日～現在

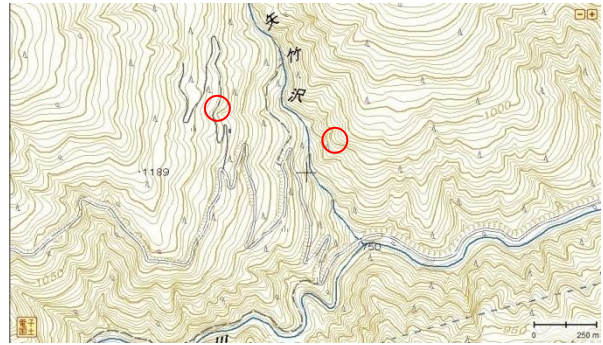


図 9 矢竹・入山観測点の2万5千分の一の地形図  
出典：ウォッチず：地図閲覧サービス（国土地理院）

### 【入山】 図 9

緯度経度：35° 56'N 138° 49'E

標高：約1000m

観測期間：1999年1月27日～1999年6月24日、1999年12月5日～2000年9月3日

2000年10月12日～2001年2月28日、2001年3月7日～2001年12月25日

### 【栃本】 図 10

緯度経度：35° 56'N 138° 52'E

標高：740m

観測期間：1971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

⇒上記4地点と違い、周囲に民家が存在する。

また、観測地点は、栃本集落の中でも非常に日当りの良い場所に立地する。



図 10 栃本観測点の地形図と周辺の様子  
出典：ウォッチず：地図閲覧サービス（国土地理院）

秩父演習林内で観測された気温データ

の各期間の平均気温は以下の通り算出した。

$$\text{日平均気温} = (\text{6分毎の平均気温の積算}) / 240$$

$$\text{月平均気温} = (\text{日平均気温の月積算}) / 1ヶ月の日数$$

$$\text{年平均気温} = \text{月平均気温の年積算} / 12$$

また、各観測地点の日平均気温の比較については付録に記載している。

## 2-2-2 樹木フェノロジー発現日予測モデル内のパラメーター検討

有効積算温量法とは、ある一定温度（標準温度）以上の温度上昇に伴って、植物の変化が線形と仮定された積算モデルであり、温度変換日数法とは、小野ら（1998）の植物の開花や開芽などの平均発育速度と温度との関係が、アレニウスの式によって近似的に表せるという実験的理論から、温度上昇に伴う植物の変化が指数関数的に変化すると仮定したモデルである。

今回、予測モデルの評価として用いている平均二乗誤差の平方根【RMSE】は、誤差の標準的な大きさを示す指標で、気象庁の天気予報の精度評価にも使われており、以下の式で表すことができる。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{F(i) - A(i)\}^2}$$

F(i)：推定値＝予測フェノロジー発現日

A(i)：実測値＝実際のフェノロジー発現日

n：サンプル数＝解析対象年

フェノロジー発現日予測法のパラメーター設定の解析に用いたのは【小赤沢】の日平均気温データである。本来であれば、観察対象地とほぼ同じ位置にある【入山】のデータを使いたかったのだが、観測期間が短く、かつ気温データが不連続であるために解析ができず、代わりに、観測期間が比較的長く、入山との日平均気温との相関関係が非常に高い、【小赤沢】のデータを用いた。解析期間は、樹木フェノロジーデータと日平均気温データを共に揃えることのできた、1997年から2003年、2005年から2008年の合計11年間である（入山と小赤沢の気温の関係についての詳細は、付録Iを参照）。また、今回は解析対象年が11年間と少なく、異常気温が現れた年には植物季節の発現日が著しく変化することが清水（2006）により指摘されていることから、次のような検出を行った。なぜなら、解析対象期間に異常気象年などが含まれてしまうと、その影響を強く受けて解析が行われてしまう危険性があったため、11年間のデータのうち、特定の1年を除いた10年間分のRMSEを算出し、他の年を除いた時と比べてRMSEに強く影響する年＝外れ値の検出を行っている。

### 1) 有効積算温量法

有効積算温量法とは、ある起算日からフェノロジー発現日（例えば、開花日など）までの、限界温度（もしくは、基準温度）以上の温度の積算値が一定であると仮定して、各年の積算温度がこの平均値に達する日を予測フェノロジー発現日とする方法である。作物・

園芸樹木において開花期・収穫期（例えば、小角ら；2005）や、昆虫の産卵・羽化の予測に安藤ら（2006）によって利用されるなど、この式の適用範囲は幅広いことが伺える。この方法と樹木フェノロジーの既往研究では、地点ごと・樹種毎に多くの標準温度の値が報告され、その場所において適切な起算日と基準温度を用いれば、かなり精度の高い予測結果が得られることが示されている（例えば、青野；1993）。

ヤマザクラ満開日について、秩父演習林内ではこのような検討がなされていなかったため予測に適切な起算日と、限界温度を決める必要があり、以下の方法で算定を試みた。

$$\sum_{t=t_0}^y T(x_t) = f_1$$

$$T(x_t) = 0 \quad x_t \leq S \text{ の場合} \quad (1)$$

$$T(x_t) = x_t - S \quad x_t > S \text{ の場合}$$

有効積算温量； $f_1$ 、限界温度； $S$ 、起算日； $t_0$ の3つのパラメーターから成る上記の推定式(1)により、 $x_t$ ； $t$ 日目の日平均気温、の経時変動に伴いフェノロジー現象の起こる日； $y$ （1/1からの経過日数）がどう変化するか予測する方法である。

有効積算温； $f_1$ は、各年（ $i$ 年）の起算日から実際のフェノロジー発現日； $y_a$ までの積算温量； $f_{1i}$ の平均値（11年間分の平均値）で代替できるとみなして、まず、限界温度と起算日の組み合わせ毎の有効積算温； $f_1$ を下式（2）で求めた。

$$f_1 = \sum_{i=1}^{11} \left\{ \sum_{t=t_0}^{y_a} T_i(x_{ti}) \right\} / 11 \quad (2)$$

$x_{ti}$ は $i$ 年目の $t$ 日目の日平均気温と、 $T_i$ は $i$ 年目の $t$ 日目の積算温量である。(1)式より各年の予測フェノロジー発現日； $y$ を算定し、その値と実際のフェノロジー発現日との推定誤差が最小となる限界温度と起算日の組み合わせを求めた。分析に際し、11年間の平均誤差については予測フェノロジー発現日と実際のフェノロジー発現日の平均二乗誤差の平方根 RMSE で評価する。

## 2) 温度変換日数法

温度変換日数法は、上記の有効積算温量法における $T(x_t)$ と $f_1$ をそれぞれ、温度変換日数； $D(x_t)$ と有効積算温度変換日数； $f_2$ に変えて用いる方法で、下式（3）・（4）で表す。

$$\sum_{t=t_0}^y D(x_t) = f_2 \quad (3)$$

$$D(x_t) = \text{EXP}\{[E_a \cdot (x_t - T_s)] / (R \cdot x_t \cdot T_s)\} \quad (4)$$

温度変換日数； $D(x_t)$ 、別名 DTS（日）は、温度変化によって変わる、生物側の変化量を表す指標の一つであり、時間  $t$ （日）における変化量が、特定の標準温度下でのその何日分に相当するかを表している（金原ら、1986）。 $x_t$ ； $t$  日目の日平均気温で、絶対温度変換値を用いる。 $E_a$ ；みかけの活性化エネルギー（ $\text{cal} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、温度特性値）、 $R$ ；モル気体定数（ $1.987 \text{ cal} \cdot \text{deg}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ ）である。また、 $T_s$ ；標準温度（K）で、変化量が最大となる温度を示すが、今回の解析での標準温度は、青野ら（1993）が全国共通ソメイヨシノ開花日の  $T_s$  として使用していた  $25^\circ\text{C} = 298.15\text{K}$  と、その後、青野ら（2003）によって考案されたソメイヨシノの開花日予測の簡便モデルでの  $15^\circ\text{C} = 288.15\text{K}$  の 2 つの値があったが、どちらの  $T_s$  値を用いて解析を行っても、対象期間である 11 年間のフェノロジー発現日までの平均温度変換日数が異なるだけで、RMSE には差が出ていなかったため、これまでの研究で多く使用されている、 $25^\circ\text{C} = 298.15\text{K}$  を標準温度  $T_s$  として本研究では使用する。

つまり、(4) 式は  $T_s$  を定数とみなすと、 $f_2$ 、 $E_a$ 、 $x_0$  の 3 つのパラメーターによる予測式である。この方法においても、 $f_2$  の値を各年の起算日から実際のフェノロジー発現日までの有効温度変換日数の平均値で推定可能とみなして算定した後、満開日予測日と実際の満開日の推定誤差 RMSE が最小となる、 $E_a$  と起算日の組み合わせを求めた。

### 3 結果と考察

#### 3-1 気温・樹木フェノロジーの経年変化

##### 3-1-1 気象庁観測地点と秩父演習林内観測地点（栃本・小赤沢）の年平均気温の変動

気象庁（2005）によると、日本の気温上昇率は、1898～2004年の100年あたりの長期変化傾向は $1.06 \pm 0.25^\circ\text{C}$ であり、北半球平均気温の100年あたりの長期変化傾向である $0.77^\circ\text{C}$ を上回っている。特に、近年は年ごとの変動が大きくなり、全国平均の年平均気温において、1901～1930年間の標準偏差は $0.36^\circ\text{C}$ であったのに対し、最近の1975～2004年間の標準偏差は $0.54^\circ\text{C}$ と、有意（危険率5%）に増加していることが言われている。また、季節別の平均気温の平年差の長期変化傾向においては、春（3～5月）が地域的にも全国的にも、ほかの季節と比べ大きな長期変化傾向となっており、冬（前年12月～2月）の気温も、北日本・東日本については、年平均の変化傾向を上回っている。今後もこのような傾向が続くのであれば、ソメイヨシノの開花が3月の平均気温と高い相関関係がある事から、より顕著にサクラの開花の早期化がおこるものと思われる。

表1 日本の平均気温平年差の長期変化傾向（ $^\circ\text{C}/100$ 年） 気象庁HPより引用

	年	春(3～5月)	夏(6～8月)	秋(9～11月)	冬(前年12～2月)
全国	+1.06 ±0.25	+1.37 ±0.37	+0.87 ±0.37	+0.94 ±0.36	+1.09 ±0.49
北日本	+0.96 ±0.31	+1.34 ±0.44	+0.53 ±0.60	+0.68 ±0.42	+1.33 ±0.63
東日本	+1.10 ±0.29	+1.44 ±0.44	+0.84 ±0.42	+0.95 ±0.45	+1.17 ±0.56
西日本	+1.15 ±0.27	+1.44 ±0.38	+1.12 ±0.38	+1.12 ±0.40	+0.91 ±0.53
南西諸島	+1.03 ±0.22	+1.10 ±0.40	+1.16 ±0.27	+1.11 ±0.28	+0.73 ±0.48

\* 一次回帰分析による長期変化傾向（線形回帰から求めた95%の信頼限界を±を付記した数値で示している）。統計期間は1898～2004年。色（黄、ピンク）をつけた値は、上昇傾向あるいは下降傾向が危険率5%で有意であることを示している。また、それぞれの地域においてピンク色で示した季節は、その季節平均の長期変化傾向が年平均の変化傾向を上回ったことを示す。

次に、1970年代以降の土地と秩父演習林周辺の年平均気温の長期傾向を示す。

現在、気象庁による観測が長期間継続して気温の観測が行われている地点から、人口の多い上位3都市：東京・横浜・千葉を大都市（グラフ上◇）の代表として、秩父演習林に近い秩父、神流、勝沼の3地点を秩父演習林周辺（△）の代表として選択し、それぞれ3地点の値を平均したものを大都市平均・秩父演習林周辺平均として求めた。秩父演習林の代表としては、フェノロジー観察対象地から約2km離れているものの、1971年と最も古くから観測されている栃本（●）を選択した。栃本の気温以外は、気象庁HPで公開されている気象統計情報から引用している。大都市平均と栃本は1971年～2007年のデータを、秩父演習林周

辺平均では 1979 年～2007 年のデータを使用して、年平均気温の変動を示す（Y 軸は、6℃から 18℃で表示している）。それぞれの気温について回帰分析を行い、傾きが有意（有意水準 5%）なもののみ、そのトレンドを直線で示した。

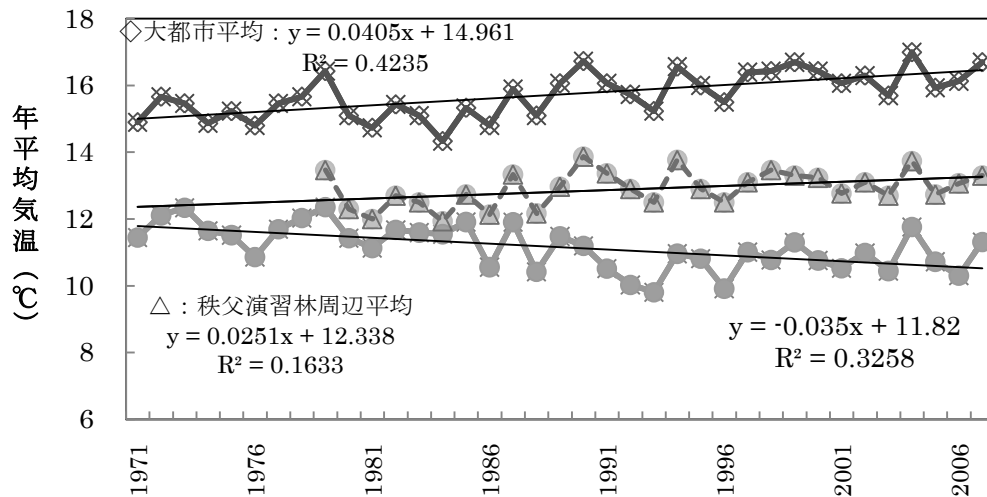


図 11 大都市と秩父演習林周辺、秩父演習林内・栃本の年平均気温の変動 1971～2007

図 11 より、36 年間の年平均気温の変動を見ると、大都市平均と秩父演習林周辺平均では上昇の傾向があり、栃本では減少の傾向にあることがわかった。IPCC (2001) によると、全球地上気温は過去 100 年あたり  $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ （陸上では  $0.7^{\circ}\text{C}$ ）上昇しており、温暖化が地球規模で起こっていること疑いようがないことから、栃本観測地点の周辺環境の変化や観測機器の不具合などの可能性が考えられたため、さらに詳しく、秩父演習林周辺 3 地点の気温変動を図 12 に示す。（秩父は 1971 年から、勝沼・神流は 1978 年からの値を示す。また、Y 軸は 6℃から 18℃で表示している）

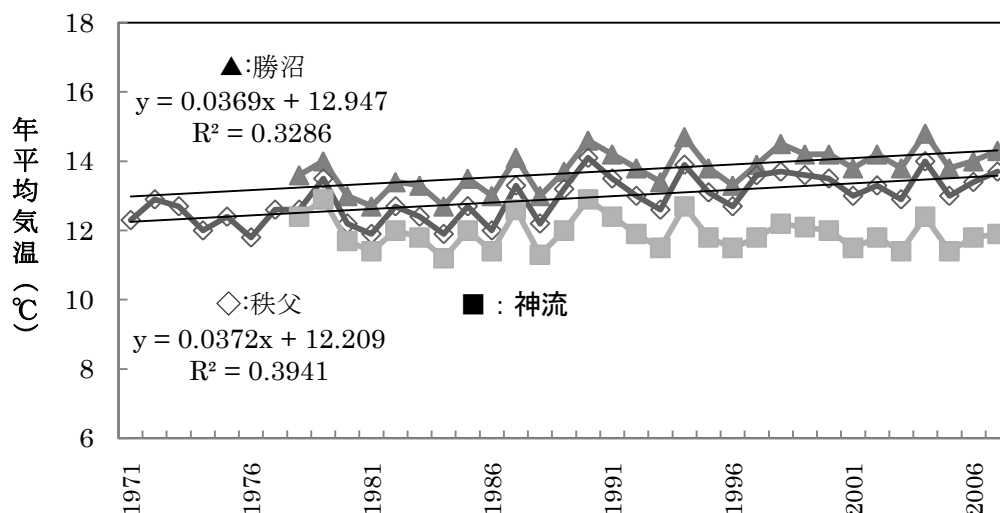


図 12 秩父演習林周辺（勝沼・秩父・神流）の年平均気温の変動 1971～2007 年



図 12 より、勝沼・秩父は年平均気温が上昇傾向であり、前述の秩父演習林周辺気温と同じであったが、神流は有意な傾向を示さなかった。しかしながら、勝沼・秩父の各地点におけるそれぞれ算出された回帰直線の傾きと、3地点の合計である秩父演習林周辺の傾きとを比較すると、前者の方がその傾きが大きく、神流の年平均気温の傾向は、勝沼・秩父ほどの気温上昇をしていないと推測される。

秩父演習林内・栃本は半径 20km に 1 万人を超える規模の市町村が存在せず（図 13）、都市化の影響が極めて低いことが考えられる。つまりは、栃本の気温は周囲の気象官署での観測値より、自然状態に近い気温変動を示していることが考えられる。秩父市（人口 6 万人弱）、勝沼（人口 1 万人弱）に対して、神流の人口は 2400 人と前者 2 地点に比べて人口が少なく＝都市化の影響が少なく、年平均気温の減少傾向を示している（図 12）秩父演習林に近いことから、神流の年気温の変動は横這い・やや減少傾向にあるものと予想される。

また、今回のフェノロジー発現日予測法のパラメーター検討に用いる秩父演習林内・小赤沢の、14 年間における月平均気温の年変動を表 2 に示す。この期間における年平均気温に、有意差（有意水準 5%）は得られなかった。

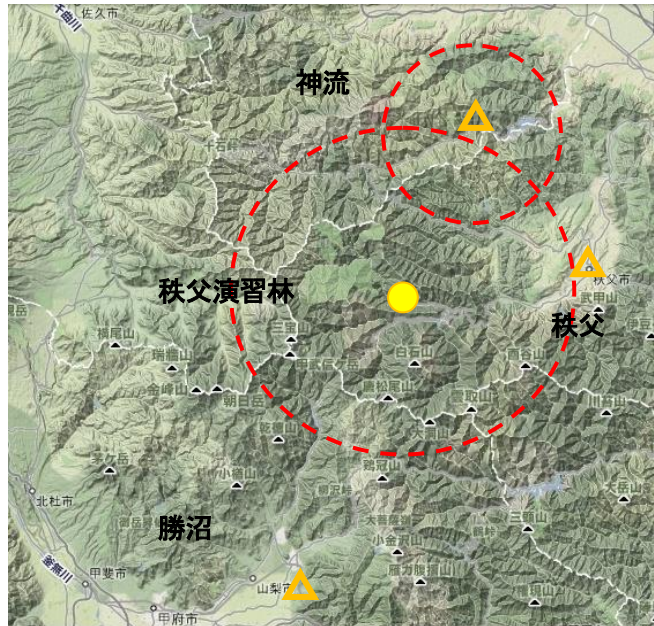


図 13 秩父演習林周辺の気象庁観測地点  
△：気象庁観測地点、◎：秩父演習林  
赤点線の円は半径 10km、20km を示す

表2 小赤沢の月平均気温 (°C)

年	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	平均
1月	-1.7	-2.6	-2.4	1.4	-2.5	-2.4	-1.7	-1.9	-3.9	-1.4	-3.7	-3.0	-2.9	-3.5	-1.6	-2.2
2月	-0.7	-2.4	-2.6	3.4	-1.9	-1.0	-1.8	-5.0	-2.2	-1.1	-2.3	-0.4	-2.9	-1.3	0.2	-1.5
3月	0.4	-0.5	0.3	2.0	2.8	2.3	2.9	1.4	1.2	4.2	-0.4	3.5	0.7	1.0	2.4	1.6
4月	5.9	8.7	7.3	4.5	8.2	10.3	7.5	7.8	7.9	8.4	8.0	10.9	8.4	6.0	5.4	7.7
5月	11.3	12.4	12.2	11.5	12.4	13.9	12.7	13.9	12.5	11.2	11.5	12.8	10.5	12.1	12.2	12.2
6月	14.5	15.2	13.3	16.2	15.7	15.1	15.9	16.7	15.6	14.5	15.5	16.7	16.2	15.5	15.1	15.4
7月	16.1	21.0	19.6	19.6	19.6	19.0	19.2	20.2	21.2	20.7	15.8	20.8	18.6	18.1	16.9	19.1
8月	17.9	21.1	21.8	18.9	19.9	20.0	20.7	20.2	18.5	19.9	18.8	18.9	19.8	19.9	20.8	19.8
9月	15.0	17.0	15.2	14.4	15.4	16.9	18.2	16.5	15.0	14.9	16.3	17.0	16.7	15.1	17.4	16.1
10月	9.2	11.6	11.2	9.7	10.2	12.5	11.4	10.4	10.2	10.4	8.9	9.9	11.0	11.0	10.0	10.5
11月	7.2	6.0	4.4	5.6	6.2	6.0	6.2	5.5	4.9	3.2	7.0	7.4	4.5	8.9	4.8	5.8
12月	0.7	1.6	-1.0	0.9	1.0	1.6	0.7	0.5	-0.5	-0.9	0.6	1.6	-3.2	0.7	0.8	0.3
年平均気温	8.0	9.1	8.3	9.0	8.9	9.5	9.3	8.8	8.4	8.7	8.0	9.7	8.1	8.6	8.7	8.7

\*赤字が矢竹沢のデータを使用した平均値。

### 3-1-2 樹木フェノロジーの経年変化

一般的にサクラは、開花前年の夏に花芽分化を始め、9～10月には自発休眠に入り、花芽発達がほとんど停止する（花岡ら；1980、五井；1982）。花芽はそのまま自然休眠の状態越冬し、ある一定の低温に遭遇することで休眠から覚め、開花の準備を始めるのだが、この休眠から成長を始めることを休眠打破と呼ぶ。休眠打破はサクラに限ったことではなく、ジャガイモやブドウなどにもみられる現象である。Felkerら（1985）はサクラの休眠打破に最適な低温の範囲は、種によって異なるが概ね5～10℃であることを報告している。また、青野（1993）では、十分な低温に遭遇することができなければ、花芽の休眠打破が遅れ、結果的に開花が遅れることを示唆しており、さらには、鈴木（2008）によって、温暖化による気温上昇傾向がこのまま続くと暖冬傾向が強まる事で、休眠打破に必要な低温まで気温が下がらない地域が出てきて、40年後には開花しない地域が出現する可能性があると言われている。

休眠打破を終えた後は、気温の上昇に伴っての花芽の発達が進み、花粉形成、開花へと続いていく。高砂（1957）は、千葉県柏市においてソメイヨシノの花芽の伸長や重量増加が2月10日前後に始まる事、五井は（1982）は、サクラの開花促進実験より、花芽の分化後の発達が温度に大きく左右されることを明らかにした。

青野（2003）によると、11月～1月の3ヶ月間の平均気温の平年値が7.5℃を上回ると、休眠解除の影響を考慮する必要があるとされている。秩父演習林内の標高約1220m地点にある小赤沢の11月～1月の平均気温の平均値（1992年～2007年）が1.3℃、同じく演習林内の標高約770m地点の栃本における11月～1月の平均気温の平均値（1971年～2008年）は3.5℃であり、どちらも7.5℃を下回っている。これより、小赤沢と栃本の間に位置する観察対象地の矢竹沢は、休眠打破に必要な低温を満たしていると考え、現段階の秩父演習林においては休眠打破の影響による開花の遅れを考慮する必要がないものとして考える。

#### 1) 生物季節観測におけるソメイヨシノ開花日の長期傾向

気象庁の実施する生物季節観測の種目の中で、最も欠測が少なく長期観測データが全国をほぼ網羅するように整理されているのが、ソメイヨシノの開花日である。ソメイヨシノは、接ぎ木によって個体数を増やしているため、同じ遺伝子を持ったクローンであり、同じ温度条件下であれば、同じ時期に開花するといった生理的特性から、遺伝子の差異による反応の違いなどの影響を考慮する必要がなく、全国での比較が容易にできるといった利点も持ち合わせているからである。上記に加えて、ソメイヨシノがいつ開花するのか、といった情報には、花見や各地のお祭りなどの行事や、季節感を表すものとして、社会的関心が高く、生活情報の一つとして求められており、予測式の開発など様々な研究がなされている。これらの研究から、ソメイヨシノの開花日の変動が、春先の気温の推移のみによってかなり正確に予測できることが報告されている（松本ら；2006、原沢ら；2003）。

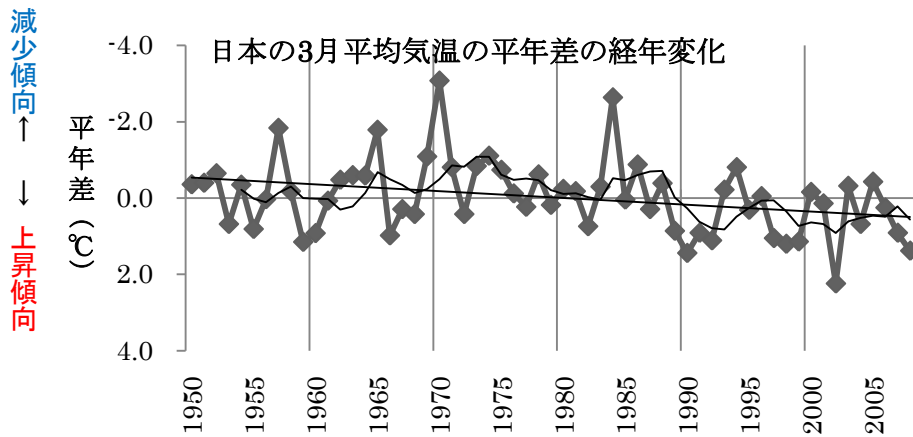


図 14 日本の3月平均気温の年平均差の経年変化（1950～2008年）  
 細線：年平均差の5年移動平均、◆：長期的な変化傾向。  
 平年値は1971～2000年の30年平均値。  
 気象庁HPより引用・筆者改編（期間縮小、Y軸の値を反転）

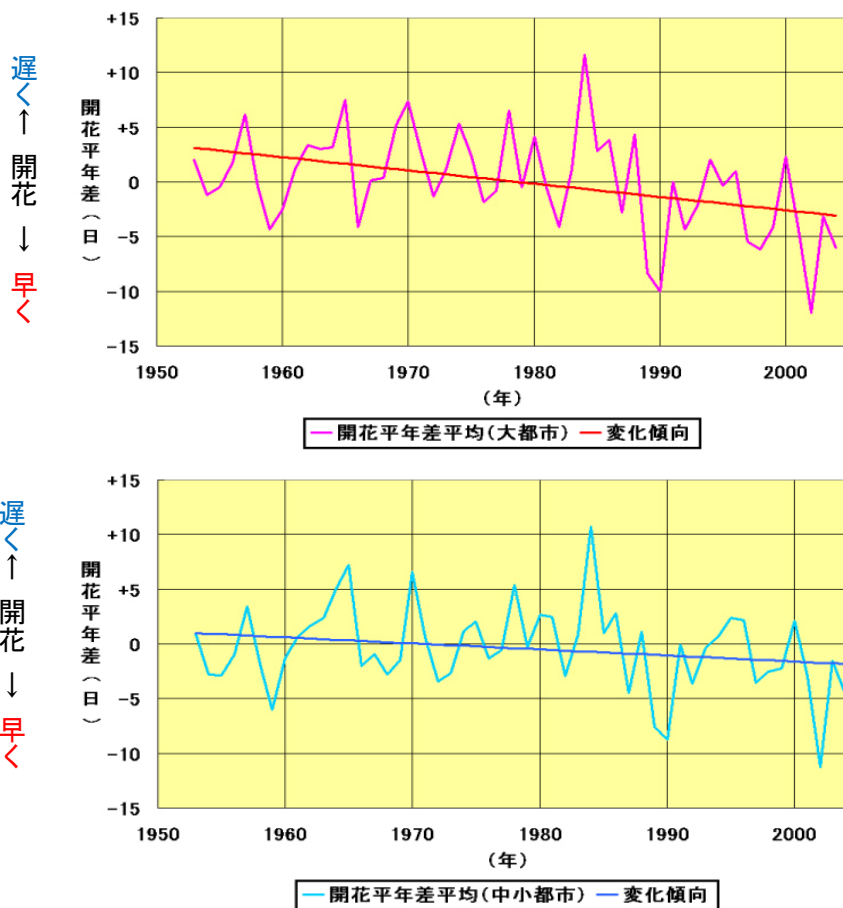


図 15 サクラ開花の変化傾向  
 (上) 大都市、(下) 中小規模の都市。直線は長期変化傾向。  
 気象庁HP（異常気象レポート2005）より引用

前述したとおり、半世紀における春先の上昇傾向が顕著（表 1）であることから、全国的な生物季節がどのように変化しているのかを把握するため、気象庁 HP より 1950 年から 2008 年まで 3 月平均気温の平年差の変動（1950 年～2008 年）を図 14 に、大都市・中小都市におけるソメイヨシノの開花日の平年差のグラフを図 15 に示した。なお、ここで示す大都市とは、札幌・仙台・東京・名古屋・京都・福岡の 6 地点、中小都市とは、日本の年平均地上気温の平年差を算出するために選定されている 17 地点（網走、根室、寿都、山形、石巻、伏木、長野、水戸、飯田、銚子、境、浜田、彦根、宮崎、多度津、名瀬、石垣島）の中から、サクラの開花を観測している 11 地点（下線を引いた地点）のことである。

日本の 3 月の月平均気温は一定周期で寒暖を繰り返し、それと連動するようにサクラの開花も早晚を繰り返している。また、ここ 50 年間で 3 月平均気温は上昇傾向をしていることが分かったが、特に 1990 年代以降の 2002 年 (+2.24℃)、1990 年 (+1.44℃)、2008 年 (+1.38℃) では、気温平年差が+（プラス）方向に観測される年が多く出現するようになり、サクラの開花も同様、1990 年代以降に平年値よりも開花の早まる年が多くなっている。

また、1998 年から 2008 年までの 10 年間ににおける全国各地のソメイヨシノの開花日と満開日を図 16 に示す。対象年が少ないこともあり、どの都市においても、樹木フェノロジー一年変動に有意な傾向（有意水準 5%）は得られなかった。東京・甲府・長野については、ほぼ同様の年変動を示しているが、札幌は異なる年変動を示している。札幌はフェノロジー発現日が他の都市と比べてフェノロジー発現日が遅いことから、地域によって影響する気温の期間が異なることが伺える。

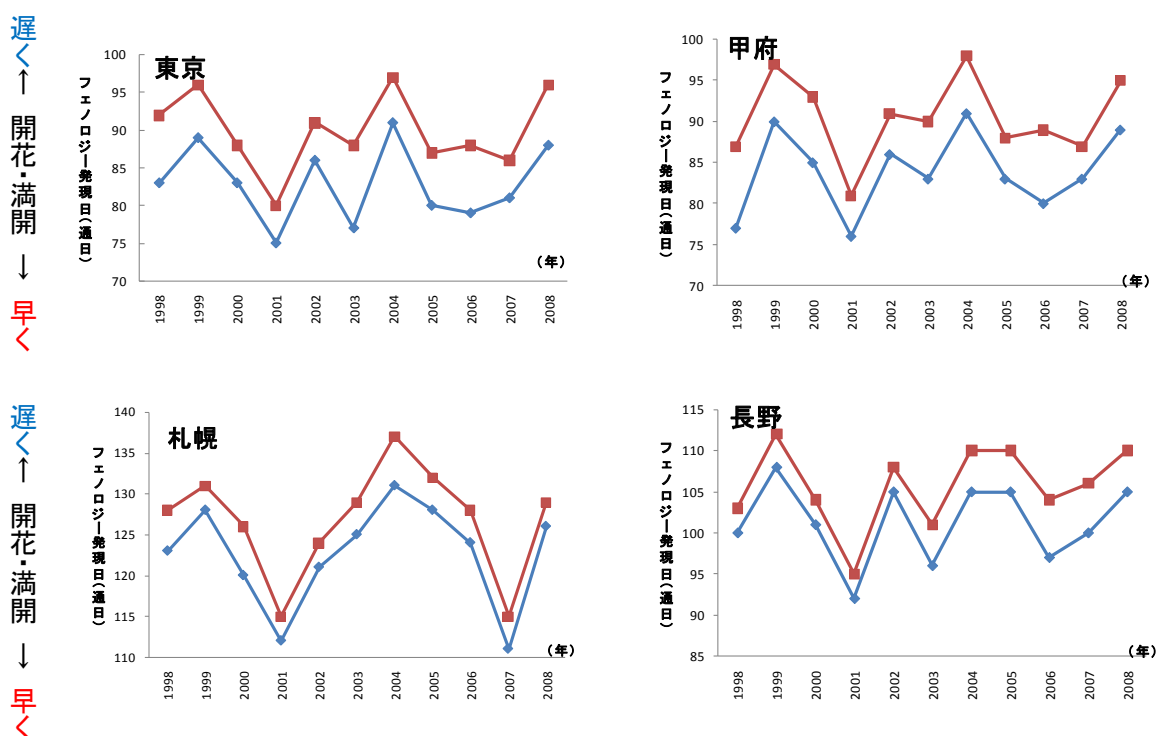


図 16 ソメイヨシノの開花日・満開日の経年変化（1998 年～2008 年）  
（青）開花日、（赤）満開日、Y 軸は 30 日間隔で固定している

## 2) 秩父演習林内のヤマザクラ満開日の経年変化

ロボットカメラ映像 Shot-09 より観察できた、ヤマザクラの満開日の経年変化（1996年～2008年）を図17に示す。11月～1月の3ヶ月間の平均気温の平年値が、栃本（標高770m）：3.5℃、小赤沢（標高1220m）：1.5℃と、どちらも7.5℃以下であるため、秩父演習林では休眠打破の影響による花芽成長の遅れは考慮の必要がないと考える。

この13年間において、顕著に満開日が早まる、遅くなるといった傾向は見られなかった。13年間における、Shot-09 ヤマザクラの平均満開日は5月1日であった。

従来の研究の中で、ソメイヨシノの開花日と相関関係が強いとされてきたのは、青野(1993)の2月平均気温；全国、3月平均気温：長野県、東京都区内など多数の地点（長野県環境保全研究所、2008；松本ら、2006など）、木村ら(1995)の4月平均気温：北海道、気象庁(2005)の2～3月平均気温：全国であった。一方、サクラの満開日については、気象庁(2005)の3～4月平均気温：全国と相関が高いという報告があった。

これら既往研究の結果を踏まえて、秩父演習林内、つまりは森林域で生育するヤマザクラが、都市部で生育するソメイヨシノと同様に、気温との相関があるのかを調べるため、1～5月における1か月毎の月平均気温と、2か月毎の平均気温を用いて検討した。

結果の中から、ばらつきの少なかった2～3月、3～4月、4～5月の平均気温と満開日の関係を図18に示す。Shot09 ヤマザクラの満開日は3～4月平均気温と有意な相関があり、直線回帰の寄与率  $R^2$  が 0.7248 と比較的高く、推定誤差 RMSE は 3.566（日）であった。

また、3～4月平均気温の中で、2000年の気温が、一次回帰線上から最も離れており、ばらつきの大きなデータであるため2000年が外れ値（解析結果に強く影響する値）である可能性が考えられる。

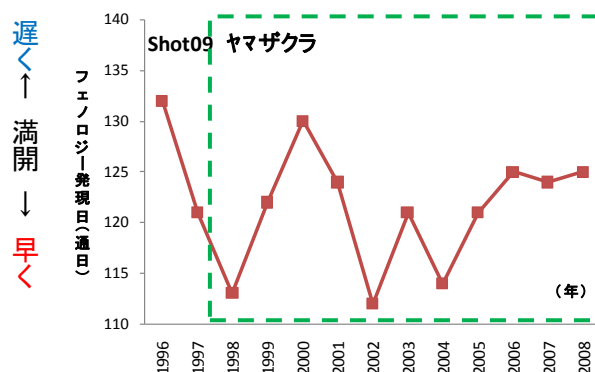


図17 Shot09 ヤマザクラの満開日の経年変化（1996年～2008年）  
\* Y軸は30日間で固定、  
緑点線枠は図14の期間（1998～2008年）と対応

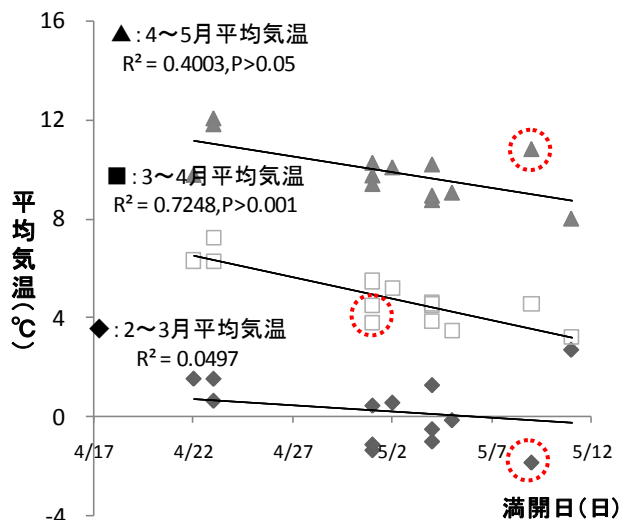


図18 Shot09 ヤマザクラ満開日と気温の関係（1996年～2008年）  
\* 赤点線：2000年の値

## 3-2 ヤマザクラ満開日と気温との関係の検討

### 3-2-1 ヤマザクラ満開日と月平均気温との関係—予備解析—

樹木には気温との相関が高い樹種、低い樹種がある事が分かっており（木村ら、1995）、気温を使ったフェノロジー発現日の予測や、気象などの影響評価の指標として樹木フェノロジーを使用する場合、事前に気温との相関性や因果関係があることを確認しておく必要がある。もしも因果関係が不明であれば、たとえ予測が可能であっても、信憑性に欠け、予測ミスを招く可能性がある。藤本（2007）は常緑広葉樹、落葉広葉樹の開芽について、平均開芽日までの積算温量や温度変換日数と、実際の開芽日に高い相関が認められれば、気温の変動によらず、ほぼ一定の積算温量（もしくは、積算温度変換日数）に到達する事が、開芽を引き起こす原因となっている可能性が高い事を示唆している。

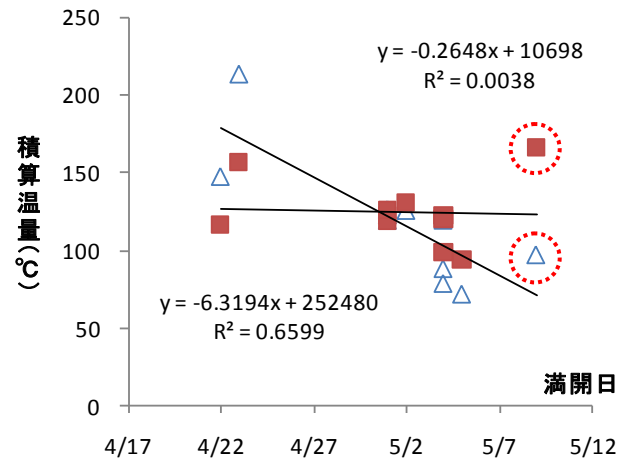
そこで、本研究においても、事前に樹木フェノロジーと気温との関係を調査することとした。本研究における対象フェノロジーは【満開日】であるものの、開芽期を対象としていた藤本（2007）の予備的解析を参考に、検討を行った。

年ごとの実際の満開日と、平均満開日までの積算温量と、積算温度変換日数の関係を図 17、に示す。ここでは、起算日を2月1日、限界温度を標準的な5°C（木村ら、1995；澤田ら、1999）、温度特性値  $E_a=17.5$ （青野、1993 でソメイヨシノの開花予測に用いた値）を使用した場合の結果である。なお、平均満開日には、Shot09 ヤマザクラの満開日の13年間の平均値=5月1日を使用した。

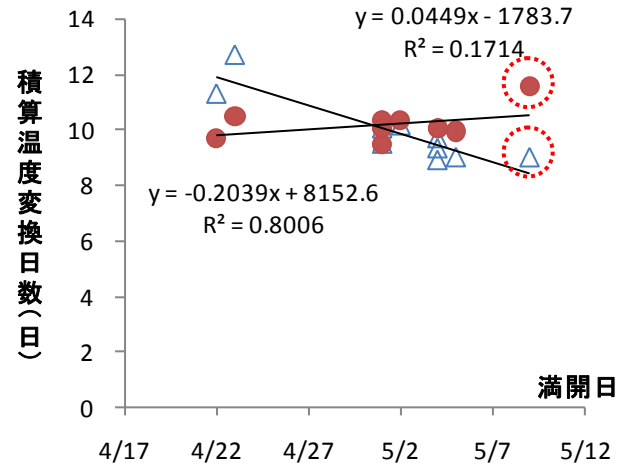
実際の満開日と平均満開日（5/1）までの有効積算温量、並びに積算温度変換日数との間に、相関がみられた（図 18、図 19）。また、満開日が早い年ほど、積算温量と積算温度変換日数が大きい傾向がみられた。

実際の満開日と実際の満開日までの積算温量、並びに積算温度変換日数との関係を見ると、ばらつきが非常に大きくなっている（ $R^2$ が0.038、0.174）。特に、実際の満開日と実際の満開日までの有効積算温量については、一次回帰直線の傾きがプラス、すなわち、満開日が早い年ほど、積算温量と積算温度変換日数が小さくなるといった傾向が見られている。しかし、既往の研究から、前述の傾向を示している結果はなく、11年間のうちに外れ値があるために、一次回帰直線が強く影響を受けてしまった可能性が考えられた。

そこで、図 18 における検討より、2000年が外れ値である可能性が考えられていたため、その値を除いて、再度、実際の満開日と実際の満開日までの有効積算温量の検討を行った。すると、実際の満開日と実際の満開日までの積算温量の一次回帰直線の傾きはマイナスに傾き、従来の研究における結果と、ほぼ同等の寄与率  $R^2$ 、傾きを示している。

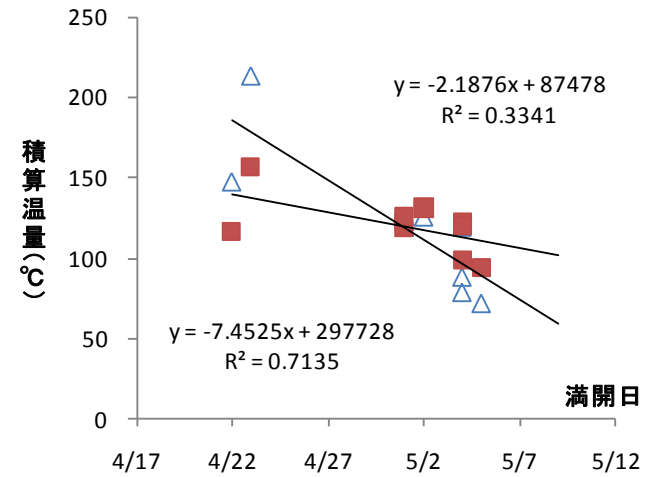
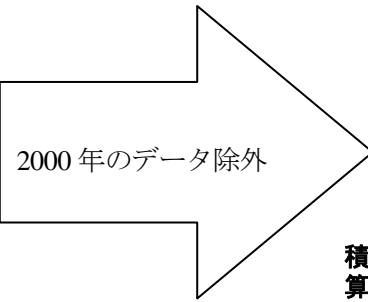


△ 平均満開日 (5/1) までの有効積算温度  
 ■ 実際の満開日までの有効積算温度

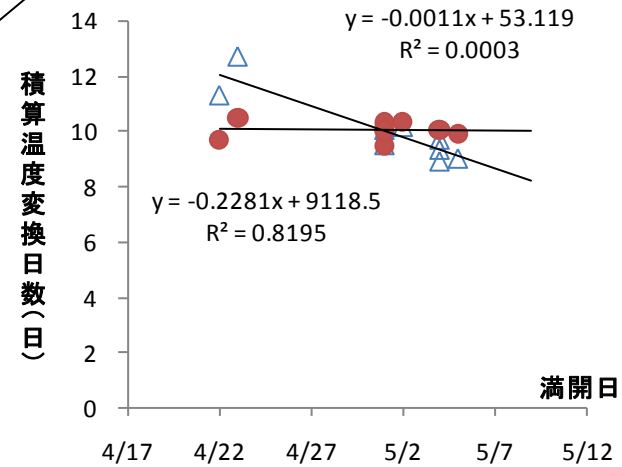


△ 平均満開日 (5/1) までの積算温度変換日数  
 ● 実際の満開日までの積算温度変換日数

図 19 Shot09 ヤマザクラの平均満開日と実際の満開日までの有効積算温度 (上)・積算温度変換日数法 (下) の関係



△ 平均満開日 (5/1) までの有効積算温度  
 ■ 実際の満開日までの有効積算温度



△ 平均満開日 (5/1) までの積算温度変換日数  
 ● 実際の満開日までの積算温度変換日数

図 20 2000年データを除いた Shot09 ヤマザクラの平均満開日と実際の満開日までの有効積算温度 (上)・積算温度変換日数法 (下) の関係



### 3-2-2 ヤマザクラ満開日への樹木フェノロジー発現日予測法の適用—本解析—

有効積算温量法における最適な限界温度、起算日を定めるために、限界温度を $-10^{\circ}\text{C}$ ～ $5^{\circ}\text{C}$ までの $1^{\circ}\text{C}$ 間隔の16通り、起算日を1/1から4/1までのほぼ5日間隔の19通り、合計304通りの組み合わせについて、それぞれの予測フェノロジー発現日と実際のフェノロジー発現日との平均二乗誤差の平方根 RMSE を算出した。

その結果、有効積算温量法における最小 RMSE (Shot-09 : ヤマザクラ) =2.153 となるパラメーターの組み合わせは、起算日  $t_0=1$  月 15 日、限界温度  $s=1^{\circ}\text{C}$ 、平均積算温度は  $296.3^{\circ}\text{C}$  の時であった。つまり、1 月 15 日からの  $1^{\circ}\text{C}$  以上の温度の積算値 (有効積算温量) が、 $296.3^{\circ}\text{C}$  を上回る日が予測される満開日であり、このパラメーターを使って 11 年間  $n$  実際の満開日と予測された満開日の誤差=RMSE が 2.153 日になるということを示している。

温度変換日数法では、温度特性値  $E_a$  を  $5\sim 30\text{ kcal mol}^{-1}$  までの  $2.5\text{ kcal mol}^{-1}$  間隔の 11 通り、1/1 から 4/1 までのほぼ 5 日間隔の 19 通り、合計 209 通りの組み合わせについて、それぞれの予測フェノロジー発現日と実際のフェノロジー発現日との推定誤差などを算出した。その結果、最小 RMSE となる組み合わせは、起算日  $t_0=2$  月 1 日、温度特性値  $E_a=22.5\text{ kcal mol}^{-1}$  であった。外れ値の検出では、起算日・温度特性値は変わらないまま、有効積算温量法と同じく 2000 年を除いた時に RMSE が最小となった。

2つの予測法における、最小 RMSE 値とその時のパラメーターの組み合わせをまとめたものを表 3、パラメーターの組み合わせによって算出したすべての RMSE 値を、表 4、表 5 に示す。

今回の解析より算定された、有効積算温量法における限界温度  $1^{\circ}\text{C}$  は、藤本 (2007) が落葉広葉樹・常緑樹に対しては限界温度  $-2^{\circ}\text{C}$  と  $-5^{\circ}\text{C}$  と決定する時に、最小 RMSE を示す樹種が多いという結果や、吉良 (1949)、植物が生育時に要求する温度の臨界点が  $5^{\circ}\text{C}$  付近であるという、理論的根拠に従い、限界温度  $5^{\circ}\text{C}$  を使用しているという結果の、2つの間の値を取っていた。

また、RMSE を最小とする温度特性値  $E_a$  は  $22.5\text{ kcal mol}^{-1}$  であり、既存研究の藤本 (2007) の広葉樹・常緑樹平均  $10\sim 15\text{ kcal mol}^{-1}$  や、青野 (1993) のソメイヨシノの開花  $17\text{ kcal mol}^{-1}$  に比べると、“Shot-09 ヤマザクラ” の  $E_a$  は大きな値となっている。ただし、温度特性値  $E_a$  は、フェノロジー種類や樹種によって変化パラメーターなので、その最適値がずれていても、なんら支障ないと藤本 (2007) は述べている。

表 3 Shot-09 ヤマザクラ満開日予測の最小 RMSE 値とパラメーターの組み合わせ

	有効積算温量法	温度変換日数法
11年間	2.15	1.51
10年間(2000年抜)	1.82	1.26
組み合わせ	$t_0=1/15, s=1^{\circ}\text{C}$	$t_0=2/1, E_a=22.5\text{ kcal mol}^{-1}$
	$296.3(^{\circ}\text{C})$	5.9(日)

表4 有効積算温量法におけるパラメータ組み合わせによる RMSE 値

	縦:起算日 $t_0$ (日)												横:限界温度 $S(^{\circ}C)$			
	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1/1	3.317	3.344	3.330	3.371	3.680	3.790	3.680	3.233	3.162	2.844	2.714	2.412	2.449	2.355	2.335	2.296
1/5	3.148	3.233	3.344	3.425	3.425	3.555	3.371	3.233	3.205	2.892	2.763	2.449	2.449	2.355	2.276	2.296
1/10	2.908	3.060	3.060	3.177	3.177	3.344	3.261	3.000	2.908	2.697	2.431	2.449	2.316	2.174	2.276	2.296
1/15	2.780	2.970	2.923	2.876	3.148	3.133	3.075	2.923	2.611	2.431	2.296	2.153	2.296	2.316	2.276	2.296
1/20	2.812	2.812	2.844	2.796	2.860	3.162	2.970	2.812	2.523	2.486	2.296	2.236	2.316	2.335	2.393	2.355
1/25	2.629	2.714	2.730	2.697	2.558	2.558	2.541	2.486	2.412	2.256	2.256	2.174	2.256	2.335	2.393	2.355
2/1	2.449	2.355	2.355	2.505	2.505	2.449	2.412	2.296	2.316	2.316	2.256	2.216	2.256	2.335	2.393	2.355
2/5	2.576	2.449	2.355	2.374	2.276	2.449	2.335	2.316	2.316	2.316	2.256	2.216	2.256	2.335	2.393	2.355
2/10	2.680	2.505	2.412	2.316	2.486	2.393	2.393	2.355	2.355	2.355	2.355	2.374	2.256	2.505	2.393	2.355
2/15	2.594	2.468	2.431	2.486	2.558	2.468	2.449	2.505	2.629	2.844	2.646	2.646	2.505	2.629	2.505	2.355
2/20	2.796	2.697	2.714	2.714	2.714	2.663	2.576	2.663	2.611	2.780	2.663	2.576	2.576	2.629	2.697	2.523
2/25	3.247	3.205	3.205	2.970	2.970	2.892	3.015	2.892	2.970	2.908	2.594	2.412	2.611	2.523	2.541	2.523
3/1	3.398	3.398	3.275	3.275	3.045	3.045	3.015	2.697	2.730	2.697	2.680	2.296	2.541	2.449	2.541	2.523
3/5	3.477	3.371	3.371	3.261	3.133	3.119	3.104	2.876	3.045	2.763	2.844	2.747	2.646	2.576	2.663	2.680
3/10	3.503	3.503	3.357	3.233	3.177	3.177	3.015	3.162	2.939	2.812	2.747	2.747	2.812	2.629	2.780	2.646
3/15	3.606	3.656	3.656	3.656	3.542	3.371	3.438	3.303	3.303	3.261	3.119	2.923	3.000	3.015	2.876	2.730
3/20	3.838	3.742	3.742	3.778	3.754	3.754	3.790	3.802	3.618	3.529	3.398	3.542	3.656	3.643	3.631	3.451
3/25	4.000	3.896	3.896	3.896	3.814	3.814	3.754	3.568	3.606	3.568	3.568	3.503	3.503	3.729	3.680	3.802
4/1	4.178	4.145	4.178	4.056	4.056	4.056	4.112	4.011	4.023	3.826	3.754	3.618	3.580	3.606	3.451	3.490

最小 RMSE の組み合わせは、起算日  $t_0=1/15$ 、限界温度  $s=1^{\circ}C$  であり、これより有効積算温量=296.3 $^{\circ}C$ であった。

表 5 温度変換法におけるパラメータ組み合わせによる RMSE 値

	縦:起算日 $t_0$						横:温度特性値 $E_a$				
	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25	27.5	30
1/1	3.411	3.148	2.714	2.576	2.256	2.153	2.316	2.067	2.111	2.089	2.111
1/5	3.438	2.954	2.629	2.541	2.111	2.067	2.023	2.067	2.067	1.931	2.216
1/10	3.247	2.970	2.236	2.132	2.174	1.931	1.907	2.000	1.758	1.931	1.834
1/15	3.425	2.714	2.431	2.067	1.977	1.907	1.784	1.883	1.907	1.883	1.907
1/20	3.438	2.985	2.576	2.216	1.883	1.954	1.907	1.859	1.907	1.883	1.907
1/25	3.451	2.954	2.523	2.276	2.045	1.907	1.809	1.758	1.954	1.907	1.907
2/1	3.451	2.892	2.505	2.111	1.859	1.883	1.977	1.508	1.809	2.023	2.089
2/5	3.555	2.892	2.576	2.216	2.067	1.883	1.859	1.651	1.732	2.023	2.089
2/10	3.778	3.119	2.680	2.216	2.045	2.045	1.954	1.732	1.784	2.174	2.195
2/15	3.542	3.045	2.558	2.111	2.045	1.954	1.907	1.679	1.834	2.067	1.954
2/20	3.606	3.205	2.646	2.296	2.067	1.977	1.977	1.883	1.859	2.000	2.236
2/25	3.920	3.398	3.060	2.697	2.335	2.355	1.931	2.067	2.216	2.195	2.276
3/1	3.873	3.555	3.045	2.923	2.730	2.236	2.276	2.089	2.236	2.335	2.276
3/5	3.814	3.555	3.247	2.954	2.697	2.558	2.335	2.316	2.276	2.431	2.374
3/10	3.920	3.503	3.438	2.892	2.860	2.714	2.393	2.523	2.412	2.374	2.541
3/15	4.056	3.729	3.631	3.261	3.000	3.075	3.030	2.908	3.104	3.090	3.233
3/20	4.200	4.068	3.693	3.438	3.344	3.219	3.303	3.317	3.233	3.438	3.425
3/25	4.167	3.989	3.618	3.555	3.516	3.580	3.516	3.593	3.593	3.631	3.643
4/1	4.523	4.200	3.826	3.668	3.606	3.656	3.503	3.568	3.606	3.606	3.656

最小 RMSE の組み合わせは、起算日  $t_0=2/1$ 、温度特性値  $E_a=22.5$  であり、これより積算温度変換日数=5.9（日）であった。

## 4 結論

森林モニタリング映像を用いることで、これまで情報の少なかった森林域の樹木フェノロジーの把握を行うことができた。映像モニタリングを行うことによって、ヤマザクラの花が映像より確認されてから、満開日に至るまで急激に変化していることが分かり、毎日の観察が可能である、映像モニタリングの有効性を示唆できたのではないかと考える。

また、映像により得られた樹木フェノロジー情報と気温データを組合せることで、秩父演習林における“満開日”－気温との関係を示すモデルを提案でき、ヤマザクラ“満開日”が気温の指標としての有効であることが示唆できた。また、“Shot-09 ヤマザクラ”満開日と3～4月平均気温には比較的高い相関が認められ、推定誤差が最小となる積算温量（または温度変換日数）と起算日の組み合わせを用いる事で、どちらの予測方法においても精度の高い予測が可能であることが分かった。有効積算温量法では推定誤差2.15日での予測が可能であり（起算日  $t_0=1$ 月15日、限界温度  $s=1^\circ\text{C}$ 、有効積算温度  $=296.3^\circ\text{C}$ ）、温度変換日数法では推定誤差1.15日と非常に高い精度の予測ができ（起算日  $t_0=2$ 月1日、温度特性値  $E_a=22.5$  kcal mol<sup>-1</sup>、積算温度変換日数  $=5.9$ 日と設定）、温度変換日数法を用いる方が、より精度の高い予測が可能である事が分かった。また、その予測精度は従来の予測法と同程度か、それ以上であった。

森林モニタリング映像にはヤマザクラの他にも、1年を通じて多種多様なフェノロジーが記録されており、解析が進むことで、様々な事象が明らかになると考える。また、映像が公開されていることから、様々な利用が望まれる。

近年、日本の都市での気温上昇が顕著であると報告されているが、秩父演習林内の38年間の気温データや13年間の“ヤマザクラ満開日”からは、秩父演習林内での地球温暖化の影響は読み取れなかった。しかし、本研究のデータが、今後、地球温暖化が進行した場合と比較・評価するために必要な基礎的データとなることが予想され、さらなる知見の収集のためにも、モニタリング映像の長期継続が望まれる。

## 謝辞

本論文を執筆するにあたり、多くの方にご協力をいただきました。ここにおいて、心より感謝いたします。

東京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齋藤馨准教授には、終始に渡り、懇切丁寧なご指導をうけ賜るとともに、秩父演習林内での実習や、サイバーフォレスト研究会など、面白くもあり、また興味深くもあるような体験をさせていただき、修士課程を楽しく過ごすことができました。誠にありがとうございました。

東京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おきましては、ゼミでの的確な質問・コメントなどにハッとさせられ、自分の中での考えの整理の発端となるような言葉を、いくつも頂きました。本当にありがとうございました。

森林モニタリング映像を利用するにあたり、ロボットカメラの定期的メンテナンスなどでご尽力して頂いている、東京大学大学院農学生命科学研究科附属秩父演習林の藤原章雄助手には、厚く御礼いたします。

本研究においてロボットカメラと同様に重要であった、秩父演習林内の気象データの観測・提供にあたり、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々様、特に、必要なデータを収集をしてくださった齋藤俊浩氏には、深く感謝いたします。

本稿の執筆、並びに研究方針の相談など、生物圏情報学分野の石井秀樹氏、藤稿綾子氏、浜泰一氏からは多大な助言・サポートをしていただき、ありがとうございました。

生物圏情報学分野の同期である中村和彦氏には、色々な場面で本研究のサポートをしていただき、筆舌に尽くしがたいほど感謝しております。迷惑もかけっぱなしでしたが、同期で良かったと思っております。これからのサイバーフォレスト、期待しております。

生物圏情報学分野の皆様方とは、楽しい時間を共に過ごすことができ、本当に感謝しております。BISの一員で良かったと、心から思えました。ありがとうございました。

修士課程において色々とお世話になりました、東京大学新領域創成科学研究科自然環境学専攻事務員の市川俊美氏、丸小野啓子氏に感謝申し上げます。

本論文を執筆するにあたり、同期の坂田益郎氏、松田正氏とは、いつも一緒に遅くまで同じ部屋にいて励まし合ったりすることで、最後まで頑張ることができました。本当にありがとうございました。楽しかったです。

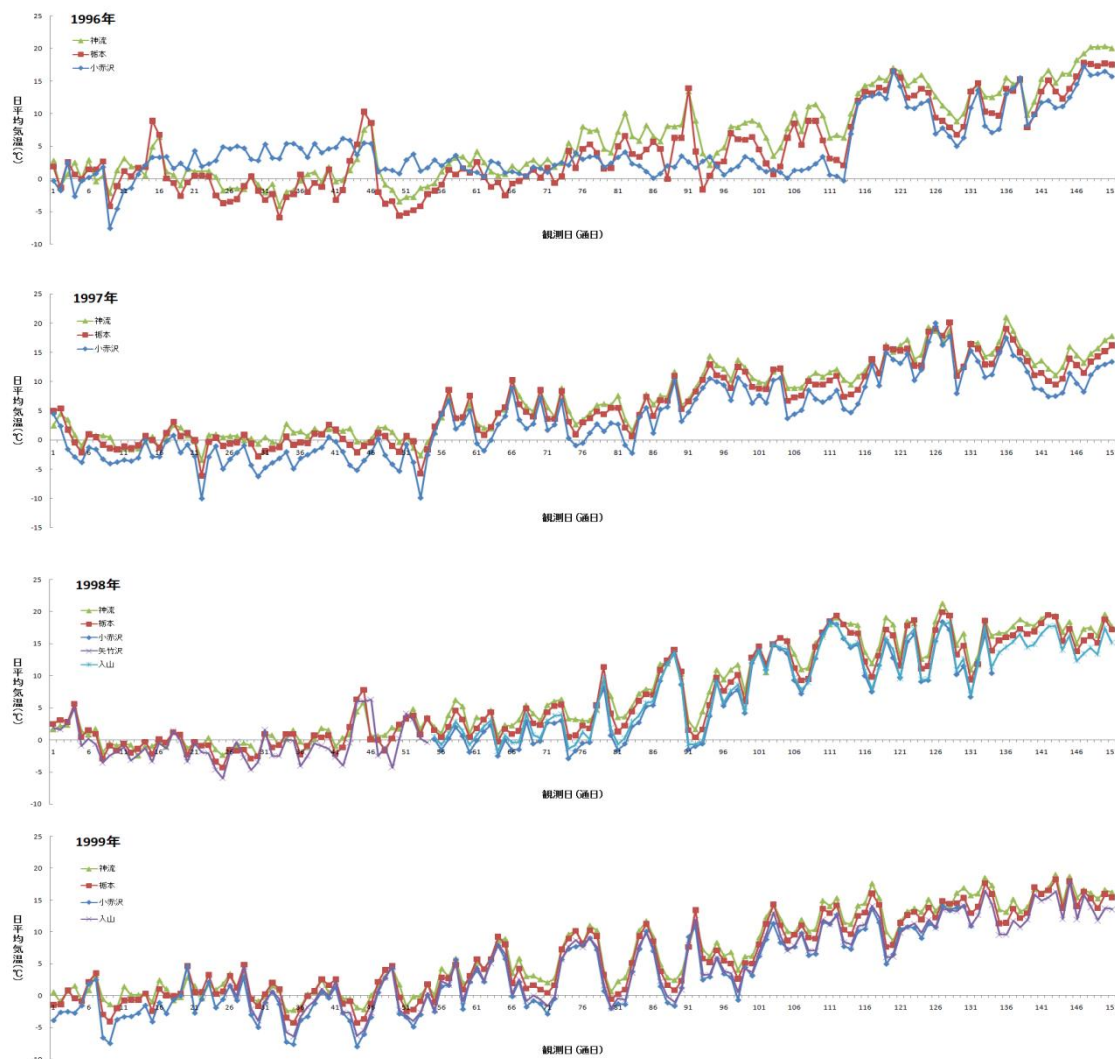
修士課程において2回も入院するなど、色々迷惑をかけながらも、最後までサポートしてくれた両親・祖父に感謝いたします。叱咤激励してくれたおかげと思っております。

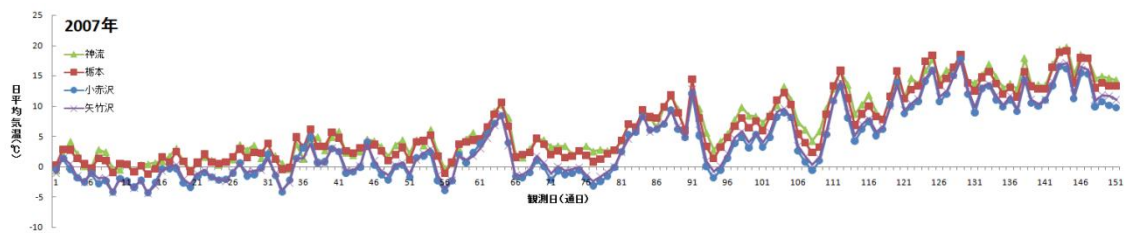
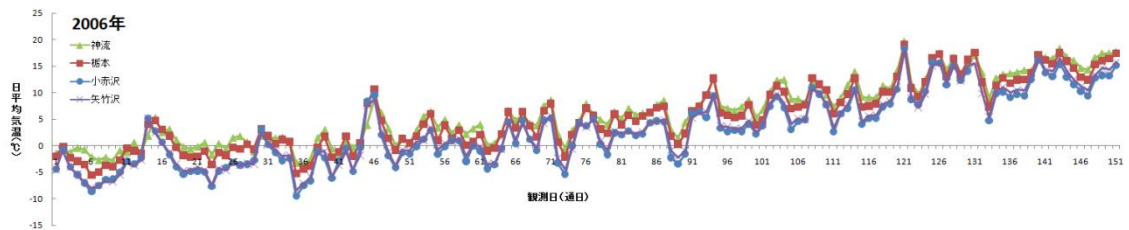
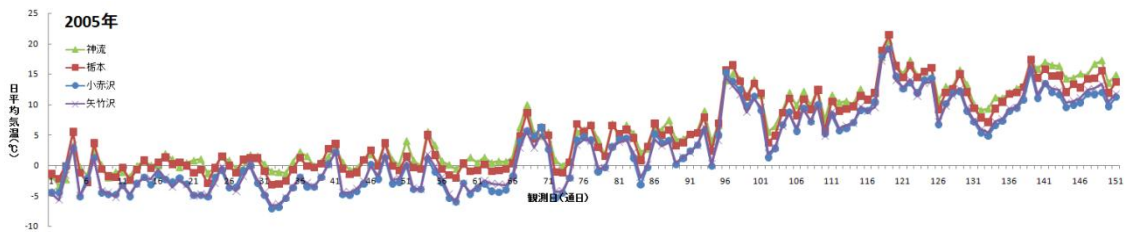
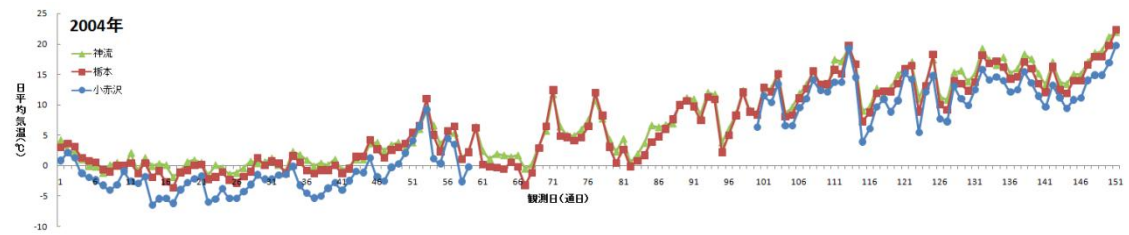
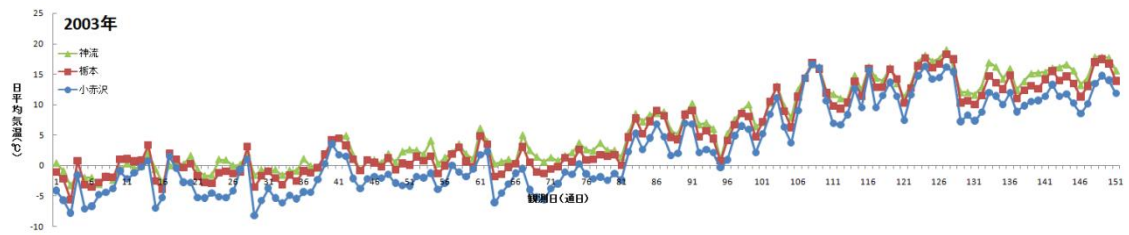
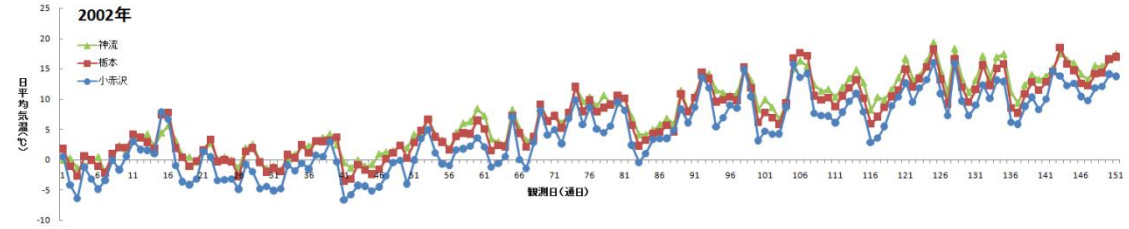
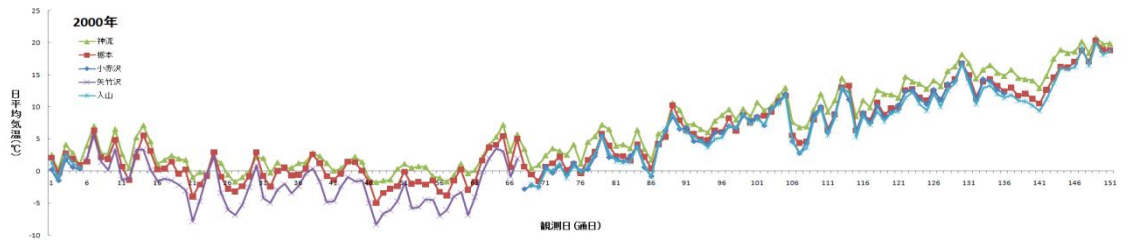
最後になりますが、この論文を読んでもくれた読者の方、どうもありがとうございました。

## 付録：解析用気温データセットの準備

従来の研究では、フェノロジー観察対象地と気象観測地が隣接していることが多い。(離れていても 50m 程度)。本研究においても、フェノロジー観察対象地と同じ場所にある入山の気象データを使用したかったのだが、入山では観測期間が短く、欠測も多いため、解析のためには入山の気温変動との差が少なく、長期間・連続して観測されている気象データを使う必要性があった。以下に、秩父演習林内で気象観測されている地点のうち、入山の代わりとなるデータとして、2 地点 (栃本・小赤沢) のどちらがより入山の気温データに近い値であるのかを検討した。

まず始めに、秩父演習林内で観測された気温データの値が妥当であるかどうか、気象庁の気象観測地点である神流 (秩父演習林の北東約 20km 地点) の日平均気温のデータをベースに、事前検討を行った。群馬県南部に位置する神流は、気象庁の観測地点の中でも秩父演習林に近く、人口が少ないため都市化の影響が少ないと考えられる (秩父演習林内の気温も、都市化の影響が非常に少ないと推測される)。以下に、神流と秩父演習林 4 地点 (小赤沢・栃本・矢竹沢・入山) の 1~5 月における 1996 年から 2008 年までの日平均気温の変動を示す。





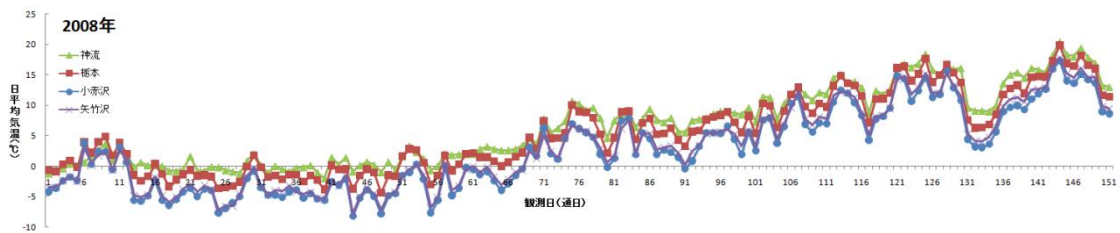


図 21 神流と秩父演習林気象観測 4 地点の 1~5 月における日平均気温の変動  
(1996 年~2008 年)

この検討から、矢竹沢と入山のデータにおいて、欠測の前後で日にちのズレや、同じ観測値が間違って記録されていることが分かった (図 21 では、すでに修正済みである)。1997 年~2008 年においては、神流・栃本・小赤沢はほぼ同じ波形を示しているようであり、神流 (標高約 400m) > 栃本 (標高約 770m) > 小赤沢 (標高約 1220m) の順に、日平均気温が高くなっている。ただし、通日 1 日~74 日目と 75 日目以降の小赤沢の日平均気温ではその挙動には違いがみられ、前者において、低い気温から高い気温への移行については神流・栃本と同じ波形で移行しているものの、高い気温から低い気温への移行、特に 0℃以下の気温の下がり幅が大きく、その差 (小赤沢-神流、小赤沢-栃本の差) が一定でなく、後者においては、神流・栃本の日平均気温とほぼ重なるような波形で、日平均気温が変動している。

次に、栃本・小赤沢のどちらがより、入山の気温を推定するのに適しているか、散布図と回帰分析での検討を行い、回帰の F 値が 0.01 以下、すなわち有意水準 1%のもののみ、そのトレンドを直線で示した。栃本・小赤沢と入山の 3 地点の日平均気温の変動を検討できる年は、1999 年と 2001 年だけであり、比較サンプル数が少ないものの、独立変数を入山、従属変数を栃本・小赤沢として回帰分析を行った。

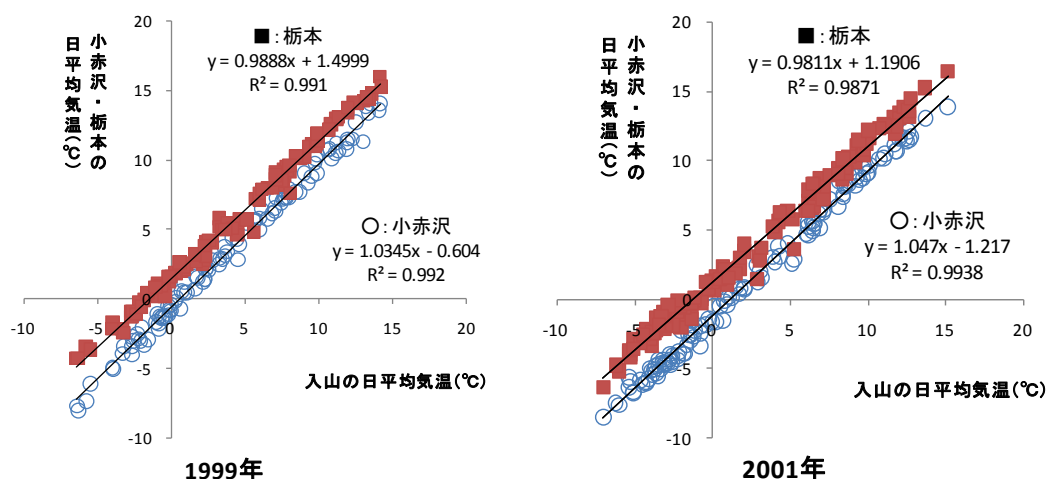


図 22 入山と小赤沢・栃本の各年における 1~5 月の日平均気温の関係



表 6 入山に対する栃本・小赤沢の各年：1~5 月の日平均気温の回帰分析

	1999年			2001年		
	相関係数	標準誤差	データ数	相関係数	標準誤差	データ数
栃本	0.996	0.51	105	0.995	0.65	130
小赤沢	0.996	0.51	105	0.997	0.48	130

どちらの地点においても、相関係数が大きく、相関係数の2乗値であり回帰直線によって説明できる割合を示す寄与率 ( $R^2$ ) が0.98以上であり、入山の気温と非常に強い相関関係をもつ傾向にある事が分かった (図 22)。また、算出されたどの回帰直線の傾きも1に近く、切片の値によって、栃本・小赤沢の気温から入山の気温を簡単に予測が出来る事が分かった。ただし、ここで求めた回帰式を用いて気温を算出する場合は、入山の気温に対する寄与率である  $R^2$  値が大きく、標準誤差も小さかったことから、小赤沢の方がより入山の気温に近い値を推定するには適していると考えた。

入山と小赤沢と1~5月の日平均気温では、非常に強い相関関係がある事が分かったが、毎月において実際にはどれほどの違いがあるのかを、1997年~2001年までの値を用いて検討した。ここでは、入山を独立変数、小赤沢を従属変数として回帰分析を行った。

表 7 入山と小赤沢の各月における日平均気温の関係 (1997年~2001年の値を使用)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均
相関係数	0.979	0.986	0.988	0.990	0.976	0.976	0.989	0.960	0.988	0.983	0.983	0.984	0.982
R <sup>2</sup> 値	0.959	0.972	0.976	0.980	0.953	0.952	0.977	0.922	0.977	0.967	0.966	0.969	0.964
(入山-小赤沢)の平均値:°C	1.16	0.98	0.64	0.27	0.17	0.36	0.59	0.54	0.62	0.47	0.56	1.02	0.62
標準誤差	0.57	0.55	0.63	0.57	0.64	0.63	0.37	0.33	0.31	0.59	0.53	0.51	0.52
回帰式の切片	0.987	-0.923	-0.722	-0.309	0.223	0.033	0.972	2.107	0.251	-0.348	-0.652	-1.037	0.05
回帰式のX値	0.942	1.065	1.029	1.005	0.971	0.976	0.925	0.872	0.951	0.989	1.013	1.012	0.98
データ数	42	60	111	120	124	113	85	62	32	68	51	59	

表 7 と図 23 より、入山と小赤沢の日平均気温の相関係数は夏ごろに、5月~8月において若干低いものの年平均0.982と非常に高く、その  $R^2$  も高い値であり、強い相関関係にあることが分かる。入山から小赤沢の日平均気温を引いた値は、冬から春にかけて大きくなり、5月で差の月平均値が最小になるのだが、5月は標準誤差が大きく、ばらつきが大きいと考える。また、2地点間の日平均気温の差の年平均が0.62°Cであり、それは、入山と小赤

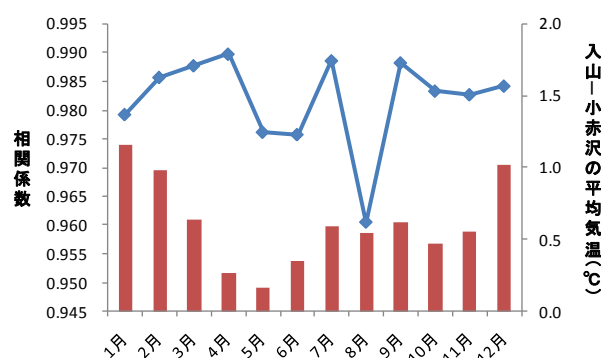


図 23 入山と小赤沢における相関係数と日平均気温の差の月別変動

沢の標高差が約 100m であることから、吉野（1987）の定義する気温の遞減率  $0.55^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  により算定される気温の変化量と同程度であることが分かった。

小赤沢のデータについて、1996 年の通日 14 日目から 110 日目では、神流・栃本との気温変動と異なる動きを見せている。他の年においては、神流・栃本と同調性を持って気温が変動し、表 6 と図 22 からも 1～5 月における栃本との気温には比較的相関関係があるように見えることから、小赤沢の元データを参照した。そうしたところ、14 日目～46 日目までの 17 時から翌日 6 時において毎時平均気温が特定値を繰り返して記録されており、観測機器・ロガーの故障が考えられ、小赤沢の 1996 年 1 月～4 月の気温データは、解析には用いないこととした。

また、小赤沢の気温データの一部に欠測期間：1998 年 1 月 1 日～2 月 23 日、2000 年 1 月 6 日～3 月 8 日、2004 年 3 月 1 日～4 月 9 日があり、小赤沢に近い観測地点である栃本・矢竹沢からの気温データの引用を検討した。ここでは、小赤沢の日平均気温を独立変数、栃本・矢竹沢を従属変数として回帰分析を行った。本来であれば、観察対象地に近い入山の気温との違いを見るために、入山を用いた分析を行いたいが、入山と矢竹沢の気温が同時に観測されている期間がないために、入山との相関が強い小赤沢を独立変数として化分析を行っている。また、欠測期間のある年を除いて、パラメーター設定の解析を行うことも考えたが、解析の精度を求めるために出来る限り多くの年数を用いて解析を行いたかったため、他の観測地点のデータの引用を試みた。

その結果（図 24、表 8）、小赤沢の欠測期間である 1 月 1 日～2 月 23 日、3 月 1 日～4 月 9 日における、2005 年から 2008 年についての日平均気温は、小赤沢－矢竹沢の 2 地点間の相関係数・ $R^2$  値がともに 0.97 以上と高く、その回帰直線の傾き・切片ともに 1 に近いことから、矢竹沢の気温データを小赤沢の欠測期間へそのまま引用しても問題ないと判断した。

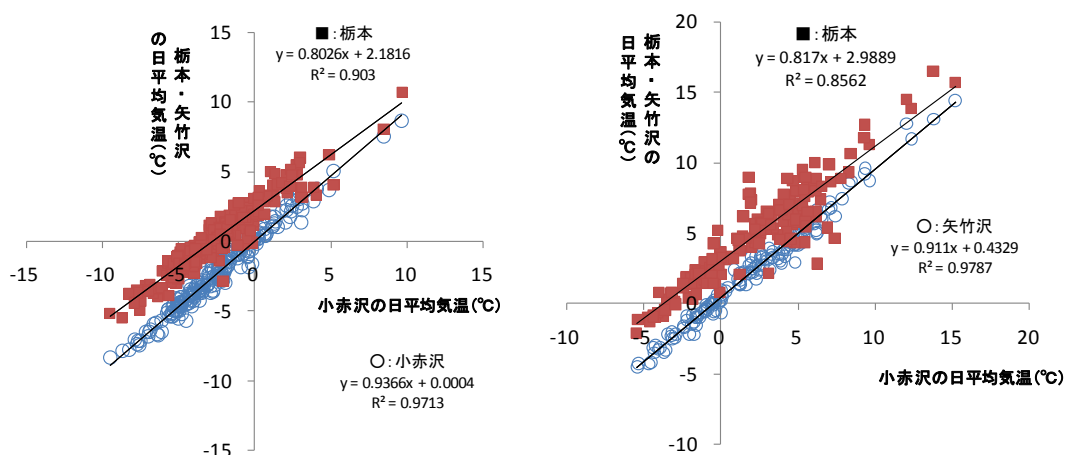


図 24 小赤沢と栃本・矢竹沢の日平均気温の関係

左が 1 月 1 日～2 月 23 日（2005 年から 2008 年データ）の日平均気温の比較

右が 3 月 1 日～4 月 9 日（2005 年から 2008 年データ）を用いた日平均気温の比較

表 8 小赤沢に対する栃本・矢竹沢の日平均気温の回帰分析（2005 年～2008 年データ）

	1月1日～2月23日			3月1日～4月9日		
	相関係数	標準誤差	データ数	相関係数	標準誤差	データ数
栃本	0.950	0.79	216	0.925	1.31	160
矢竹沢	0.986	0.48	216	0.989	0.53	160

2004 年については、矢竹沢の気温が観測されておらず、小赤沢－栃本のみの気温の関係を検討したが、該当期間：3 月 1 日～4 月 9 日における 2 点間での気温のばらつきが大きく、引用する事は不可能と判断した。よって、2004 年は小赤沢の日平均気温の連続データがないことになり、パラメーター設定の解析対象の年から除外することとした。

以上をまとめると、パラメーター設定の解析を行うのは、小赤沢の気温が揃っている 1997 年～2003 年、2005 年～2008 年の合計 11 年間とした。

## 参考文献（アルファベット順）

- 青野靖之、小元敬男（1990）；チルユニットを用いた温度変換日数によるソメイヨシノの開花日の推定、農業気象（4）、p25-31
- 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、p155-192
- 青野靖之、守屋千晶（2003）；休眠控除を考慮したソメイヨシノの開花日推定モデルの一般化、農業気象、59（2）、p165-177
- 綾美幸、山本勝博（2005）；紅葉のメカニズムにせまる-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、p7-10
- 安藤健、井上良平、前藤薫、藤條純夫（2006）；ハスモンヨトウ(チョウ目:ヤガ科)幼虫の内部寄生蜂であるハスモンサムライコマユバチ *Microplitis manilae* Ashmead(ハチ目:コマユバチ科)の生活史特性に及ぼす温度の影響、日本応用動物昆虫学会誌、50(3)、201-210
- 長期定点森林映像アーカイブ【robotcamera movie】  
<http://bis01.nenv.k.u-tokyo.ac.jp/~akio/playmp4smil.php>、2009/01/26 閲覧
- 第三次生物多様性国家戦略（2007）、環境省、pp274
- FELKER、F.C. and ROBITAILLE、H. A.（1985）；Chilling accumulation and rest of sour cherry flower buds、J. Amer. Soc. Hort. Sci.、110、p227-232
- 五井正憲（1982）；温帯花木の花芽形成ならびに開花調整に関する研究、香川大農紀要、38、p1-120
- 長谷川耕二郎、尾形凡生（2007）；高知における最近20年のカキの萌芽、開花および満開期の気温との関係、植物環境工学、19（4）、175-181
- 花岡喜重、茂木孝夫、森昭（1980）；標高差による花木の生態学的研究Ⅱ ヒガンザクラ、モモ、ウメについて、群馬県園芸試験報告、8、p1-18
- 浜田崇（2004）；ライブカメラ映像を利用した山岳地の積雪モニタリング手法の検討、環境情報科学論文集 18、p237-240
- 原沢英夫・西丘秀三編（2003）；地球温暖化と日本 第3次報告-自然・人への影響予測-、古今書院、411pp
- 本間航介（2001）；ネットワーク研究を軸に日本の LTER の方向性を考える、日本生態学会誌、51、p277-282
- 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、日本森林学会誌、89（4）、p253-261
- 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）、p75-87
- 藤原章雄、斎藤馨（1998）；映像情報のデジタル化によるランドスケープ情報の共有に関する研究、ランドスケープ研究（造園学会誌）、61(5)、p601-604
- 藤原章雄、斎藤馨（2005）；ロボットカメラによる定点長期連日ビデオ記録の樹木フェノロジー情報についての分析、日本造園学会誌ランドスケープ研究、68(5)、p927-930
- 藤原章雄、斎藤馨、岩岡正博、中村和彦（2008）；長期定点森林映像アーカイブの公開、日本森林学会大会発表データベース、Vol. 119、p426

IPCC (2001) ; Third Assessment Report: Climate Change 2001、The Scientific Basis、Houghton et al.(eds.)、Cambridge University Press、Cambridge、UK、811pp

IPCC (2002) : IPCC 第三次評価報告書～第一次作業部会報告書 気候変化 2001 科学的根拠政策決定者向けの要約 (気象庁訳)

甲斐啓子 (200) : B-12 地球の温暖化が植物に及ぼす影響の解明に関する研究、環境省、<http://www.airies.or.jp/wise/j/J95B1200.htm>、2009/01/26 閲覧

金野隆光、杉原進(1989) ; 土壌生物活性への温度影響の指標化と土壌有機物分解への応用、農業研報、1、p51-68

環境省インターネット自然研究所 国立公園・野生生物ライブカメラ映像、<http://www.sizenken.biodic.go.jp/pc/live/html/index.html>、2009/01/26 閲覧

菊澤喜八郎 (1999) : 地球変化と樹木フェノロジー (環境変動と生物集団)、河野昭一、井村治編、海遊舎、東京)、p36-52

気象庁 (2002) ; 20 世紀の日本の気候、財務省印刷局、p116

気象庁 (2005) ; 異常気象レポート 2005 第 2 章 地球温暖化、[http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/climate\\_change/2005/index2.html](http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/climate_change/2005/index2.html)、2009/01/25 閲覧

気象庁 (2007) : 関東地方の紅葉の見ごろ予測式、<http://www.jma.go.jp/jma/press/0709/27a/koyo2007.pdf>、2007/0927 作成、2009/01/26 閲覧

気象庁 ; IPCC 第三次評価報告書～第一次作業部会報告書 気候変化 2001 科学的根拠政策決定者向けの要約 (気象庁訳) 、[http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc\\_tar/spm/spm.htm](http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc_tar/spm/spm.htm)、2009/01/17 日閲覧

鬼頭昭雄 (2004) ; 日本気象学会 2003 年度春季大会シンポジウム「ヒートアイランドー熱帯夜の熱収支」の報告 「1-2 地球温暖化と都市化による気温変化について」、日本気象学会、p93-95

木村徳志、木佐貫博光、倉橋昭雄 (1995) : 北海道に自生する落葉広葉樹 25 種のフェノロジーー年変動ならびに気温との関係ー、日林論、106、p367-370

松本太、三上岳彦、福岡義隆 (2006) ; ソメイヨシノの開花に及ぼすヒートアイランドの影響ー東京都区部を例としてー、地理学評論、79-6、p322-344

中原孫吉(1969) : 日本の生物季節現象に関する気候学的研究、千葉大園芸学部学術報告書、117、p89-113

長野県環境保全研究所 (2008) ; 長野県における地球温暖化現象の実態に関する調査報告書 「気候・気候調査編」、長野県環境保全研究所、51pp

小野祐幸、金野隆光、奥野隆、浅野聖子 (1988) ; 日本梨の催芽・開花までの日数への温度の影響、農業気象、44、p203-208

小元敬男、青野靖之 (1990) ; 都市昇温のサクラの開花に及ぼす影響について、農業気象、46 (3)、p123-129

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、ランドスケープ研究 (造園学会誌)、61(5)、p 597-600

斎藤馨、藤原章雄、熊谷洋一、塚口馨介(2002) ; 森林景観ロボットカメラの新機能開発と環境音記録に関する研究、ランドスケープ研究、65、p689-692

斎藤馨、藤原章雄、石井秀樹、志村正太郎、矢野安樹子、熊谷洋一(2005) ; 森林映像

モニタリングデータによるマルチメディアコンテンツ製作、日本造園学会誌ランドスケープ研究、68(5)、p 923-926

斎藤馨、岩岡正博、藤原章雄、中村和彦、米谷法子 (2008) : 環境学習のための森林映像記録データ定期配信システムの開発、日本森林学会大会発表データベース、Vol. 119、p264

澤田晴雄、蒲谷肇、大村和也、千嶋武 (1999) : 東京大学秩父演習林内ミズナラ 6 個体のフェノロジー、日本関東支論、50、139-140

清水廉 (2006) : 温暖化ウォッチ (8) 異常気温が現れたときの植物季節の変化、地球環境研究センター、Vol16 No.12、p14-15

鈴木彩子、asahi.com、満開ソメイヨシノ、幻になる？温暖化進行の40年後予測、<http://www.asahi.com/eco/TKY200811140190.html>、2008/11/14 作成、2009/01/18 閲覧

高木佐和、森征洋 (2006) : 香川における生物季節の経年変化、香川大学教育学部研究報告第II部、56 (1)、p27-40

高木正博、森山聡之 (2007) : 全国の大学演習林をむすぶ気象観測・公開システムの開発、日本森林学会論文誌、89 (5)、p336-339

高砂学 (1957) ; ソメイヨシノザクラの開花木と落花期に関する小観測 (続報)、産気調報、20 (3)、p7-12

地球温暖化観測推進ワーキンググループ (2008) ; 地球温暖化観測における連携の促進を目指して～温室効果ガス・炭素循環および影響評価にかかわる観測～ (地球温暖化観測推進ワーキンググループ報告書 第一号)、地球温暖化観測推進事務局／環境省・気象庁、180pp

吉野正敏 (1978) ; 小気候新版、地人書館

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年-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自然教育研究施設研究業績、43、p13-16

Weather News 、 プ レ ス ・ リ リ ー ス 2007.2.21 桜 開 花 予 報 、  
[http://weathernews.com/jp/c/press/2007/070221\\_1.html](http://weathernews.com/jp/c/press/2007/070221_1.html)、2009/01/26 閲覧