

博士論文（要約）

日本と中国における気候温暖化に対する植物季節の
応答性とその変動要因の解明

申 銀月 (SHEN YINYUE)

博士論文（要約）

日本と中国における気候温暖化に対する植物季節の
応答性とその変動要因の解明

申 銀月 (SHEN YINYUE)

東京大学大学院 農学生命科学研究科

農学国際専攻 平成 25 年度博士課程進学

指導教員 東京大学教授

小林和彦

2016 年 7 月

目次

第1章 はじめに.....	1
1.1. 問題背景	1
1.2. 生物季節による気候変化の検出に関する先行研究.....	2
1.3. 本研究の概要	4
図	6
第2章. 中国東北部における気候変化へのナシ品種 Pingguoli (リンゴ 梨)の発育応答.....	7
第3章. 日本における気候変化へのナシ品種「幸水」の発育応答.....	8
第4章. 青森県における気候変化へのリンゴ8品種の発育応答.....	9
第5章 総合考察.....	10
摘要.....	14
謝辞.....	18
引用文献.....	19

第1章 はじめに

1.1. 問題背景

近年、地球温暖化問題など人間活動が地球環境に影響を与えていることが明らかになってきた。IPCC（気候変動に関する政府間パネル）第5次報告書（*IPCC, 2013*）は、人間活動が全球的な気候温暖化を既に生じており、今後それがさらに深刻化することを示した。IPCC第4次報告書（*IPCC, 2007*）によると、地球の平均気温は1906年から2005年までの100年で $0.56^{\circ}\text{C}\sim 0.92^{\circ}\text{C}$ 上昇しており、さらに最近50年の上昇率は、それ以前の50年の上昇率のおよそ2倍であるという。しかし、温暖化の程度やパターンは地域によって異なるため、地域スケールでの温暖化の実態解明が引き続き重要である。例えば、中国東北3省（黒竜江省、吉林省、遼寧省）の平均気温は、1961年から2007年までの47年間で $0.31^{\circ}\text{C}\sim 0.50^{\circ}\text{C}$ 上昇しているという（*Liu et al., 2009*）。これは、1961年から2007年までの中国東北3省72箇所の気象観測所における気象観測値を分析した結果であるが、世界全体の温暖化と比べると、やや小さめの上昇傾向を示している。日本においても、年平均気温は100年で 1.06°C の長期的上昇傾向がある（*気象庁, 2005*）。また気象庁の「地球温暖化予測情報」（*気象庁, 2005*）によると、日本周辺の気温の変動は、今後100年間に $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ 上昇すると予測されている。このように今後100年間の気温上昇は過去100年間の上昇とは比較にならないほど大規模なものになることが推測されている。

温暖化は気温の観測で測られるが、気候変化の検出に広く用いられている気象計測機器による観測には、いくつかの欠点が指摘されている。観測値が局地的な環境変化に左右されること、観測点が都市に偏りがちで都市化の影響を受けること、機器の更新や計測・集計方法の変化とともに経年的なドリフトが生じることなどである。例えば、気温は、測定機器などの観測条件によって大きく変化し、また、測定場所の周囲の環境変化によっても影響される（*近藤純正, 2010*）。多くの気象観測点は都市に近く、都市化の影響を拾っている可能性もある。*Sameshima et al. (2007)* が北海道で行った気温の長期傾向分析によると、

都市化の影響を受けにくい農業地帯に立地する北海道農業研究センターで観測した過去40年の気温上昇は、北海道内の気象官署3地点の気温上昇の39%に過ぎなかった。しかも、これら3地点の気象官署は日本国内でも都市化の影響が比較的少ないといわれ、日本の気温上昇の評価にも使用されているものである。

このことから、気温の傾向を見る際には、周囲の局地的な環境変化などが影響を与えている可能性を考慮し、その気温観測点が、果たしてその周辺地域を代表しているかどうかには注意する必要がある。そのため、都市化の影響が少ないと考えられる農村地帯での気温の傾向を分析することが有効であろう。

一方で、気象観測とは別に生物季節 (phenology) で温暖化を測る方法が試みられている。生物季節とは、動植物による季節ごとの活動のタイミング (それぞれ動物季節、植物季節という) を指すもので、気候変動に対する生態系への影響を捉えやすいといわれる (IPCC, 2007)。よく観測される生物季節としては、植物の発芽、開花、果実の成熟、紅葉、落葉等の生育期間、またチョウやカエルの出現、そして鳥の渡りなどがある (西垣・林, 2012; 増田, 2005; 松本・福岡, 2002)。このような動植物の状態が季節により変化する現象を生物季節といい、地上気象観測のひとつの項目として気象官署で長年観測が行われている。植物季節の変化によって気候変化の実態を捉える方法は、機器観測とは独立に気候の長期変化を一貫した方法で把握することができる (Fujisawa & Kobayashi et al., 2010)。特に、農村地帯で栽培される農作物の植物季節の観測は空間代表性の点でも優れており、機器観測の結果と照らし合わせることにより、気候変化の実態をより高い確度でとらえられる。

1.2. 生物季節による気候変化の検出に関する先行研究

生物季節の状態は気象や気候に密接に関係するので、気候変動の影響は動植物季節にも現れていることが多く報告されている。例えば、ドイツでは、リンゴの開花期が春の気温と高い相関関係を示し、春の気温が1°C上昇すると、開花が4.6日早まるといわれる (Chmielewski et al., 2004)、生物季節は気温などの環境変

化に敏感に反応することが知られている。しかし近年では、その生物季節が変化してきており、目に見える温暖化の影響であるとして注目されている。

Tao et al. (2006) によると、1980 年以降、中国南部（湖南省）では稲作の播種期が 5.7 日早まり、開花期が 6.2 日早くなった。また、中国西北部（甘粛省）では小麦の播種期及び開花期が 3 日早まっている。同様に、1990 年以降、中国東北 3 省では $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 初日が 2 日～5 日早まり (*Li et al., 2012*)、トウモロコシの発芽期が 2.1 日早くなった (*Tao et al., 2006*)。

Fujisawa & Kobayashi (2010) によると、日本の北部（青森県、秋田県、岩手県、山形県、福島県、長野県などの 6 県）では 1977 年から 2004 年までの 28 年間でリンゴ（ふじ）の発芽期が約 4.2 日早まり、開花期が約 3.8 日早くなった。他にも、サクラ（ソメイヨシノ）の開花期が過去 100 年で 5 日早まっており (*増田, 2003*)、一方イチョウでは 1953 年から 2000 年の間に発芽期が 4 日早まり、落葉期が 8 日遅くなった (*Matsumoto et al., 2003*) ことが報告されている。同様に、*小池・樋口 (2006)* によると、新潟では 1980 年代以降、東南アジアで越冬し春に日本に渡来するコムクドリの産卵開始日が約 2 週間早まり、また一腹卵数が 1.2 個増加した。

世界でも同様の変化が観測されており、例えば、ヨーロッパでは、1960 年代以降、樹木の展葉期が 6.3 日早まり、紅葉期が 4.5 日遅くなり (*Menzel, 2000*)、一方北米では樹木の展葉期が 5.4 日早まったという (*Schwartz et al., 2006*)。このような、ヨーロッパの多数地点での植物季節の観測記録は、春の植物発育が早まっていることを示しており、気候温暖化を裏付けている (*Menzel et al., 2006*)。

これらの報告で、生物季節が気象観測とは独立に気候変動の指標となり得るのは、その生物の生息する地域や行動範囲など、周辺地域を代表する指標であること、そして、同一種が広域的かつ長期間にわたって生育しているため、気候変動の影響を広範に計測できることの 2 点があげられる (*藤沢・小林, 2007*)。

以上のように、生物季節を用いた気候変化の検出と解析について、多数の先行研究がおこなわれてきたが、その中で次のような課題が生じてきた。

30年以上といった長期間には、農作物の品種や栽培方法など気温以外の要因も変化するので、それが植物季節に影響している可能性がある。そのため、長期間の植物季節の変化が気温のみの影響であるか否かを検討する必要がある。例えば *Estrella et al. (2007)* は、ドイツにおける農作物や園芸作物の生物季節観測記録を解析した際に、他の変化の影響を除くために、長期トレンドを除去した場合としない場合で、気温と生物季節の関係を比較した。その結果、トレンドを除去したほうが、生物季節の温度応答性が低いことから、対象とした生物季節の長期変化には、気温変化以外の要因も影響していると結論付けた(*Estrella et al., 2007*)。

また、気候変化への植物季節の応答が他の要因に影響されることが報告されている。たとえば、*西垣・林 (2012)* は、春を代表する17種目（植物種目11、動物種目6）について解析したが、春の生物季節変化は地域間の差があるとした。またサクラやウメは、種間、品種間の差、観測年代の違いによって異なる可能性があるため、各要素を考慮し、植物季節の変化から気候変化の検出を試みる。

1.3. 本研究の概要

以上のような現状を踏まえて、本研究では永年性農作物であるナシ（中国東北部吉林省の延辺自治州の名産である“苹果梨”と日本の「幸水」梨）、およびリンゴ（青森県のリンゴ8品種）の発育観測結果を用いて、農村地帯における気候変化に伴う果樹の生物季節変化を検出しようとする。

気候変化への植物季節の応答に関して、まず、地域間によって異なる可能性があることを考慮し、中国東北部6ヵ所（第2章）と日本7ヵ所（第3章）の各地域で生じている気候変化に、植物季節が応答しているかどうか、その応答程度が地域間で同程度であるかどうかを明らかにする。次いで、その気候変化への植物季節の応答性が、観測期間や品種によって異なるかという疑問を解明するため、中国東北部のリンゴ梨（第2章）・日本の幸水梨（第3章）を用いて、その気温の変動への植物季節応答性が品種ごと・観測期間ごとによって異なる

のかについて解析を行う。また、日本の青森県（第4章）で栽培されてきたリンゴ品種のうちの8品種（昔の有力品種：国光、紅玉などと、現在の有力品種：ふじ、つがるなど）を例に取り、リンゴの発育開始期が長期的にどのように変化しているのか、その気温の変動への植物季節応答性が品種ごと・観測期間ごとに異なるのかについて解析を行う。第4章では同じ地域（青森県）で、リンゴの8品種について同様に植物季節の記録を解析することで、気候変動への植物季節の応答性が品種間で異なるのかという疑問を解こうとする。最後に、その気候変化への植物季節の応答性は、種によって異なるかという疑問を解明するため、ナシ（第2章・第3章）とリンゴ（第4章）を用いて、その気温の変動への植物季節応答性を比較する。このように、本研究では、果樹の生物季節が気候変動から受ける影響について、ナシとリンゴの植物季節を用いて、地域間、品種間、観測期間、種間で比較検討しようとする。

研究の枠組みは図のように、第2章で中国東北部における気候変化へのナシ品種 *Pingguoli*（リンゴナシ）の発育応答、第3章では、日本における気候変化へのナシ品種「幸水」の発育応答について解析を行い、中国と日本の広範囲な観測地点による気候温暖化への植物季節の応答性を求める。第4章では、青森県における気候変化へのリンゴ8品種の発育応答の解析によって、植物の種類による気候温暖化への植物季節の応答性を求める。第5章では、以上の3章での解析結果から、中国と日本の各地域で生じている気候変化への植物季節の応答性が、地点や植物種、あるいは品種によって異なるかを考察する。

図

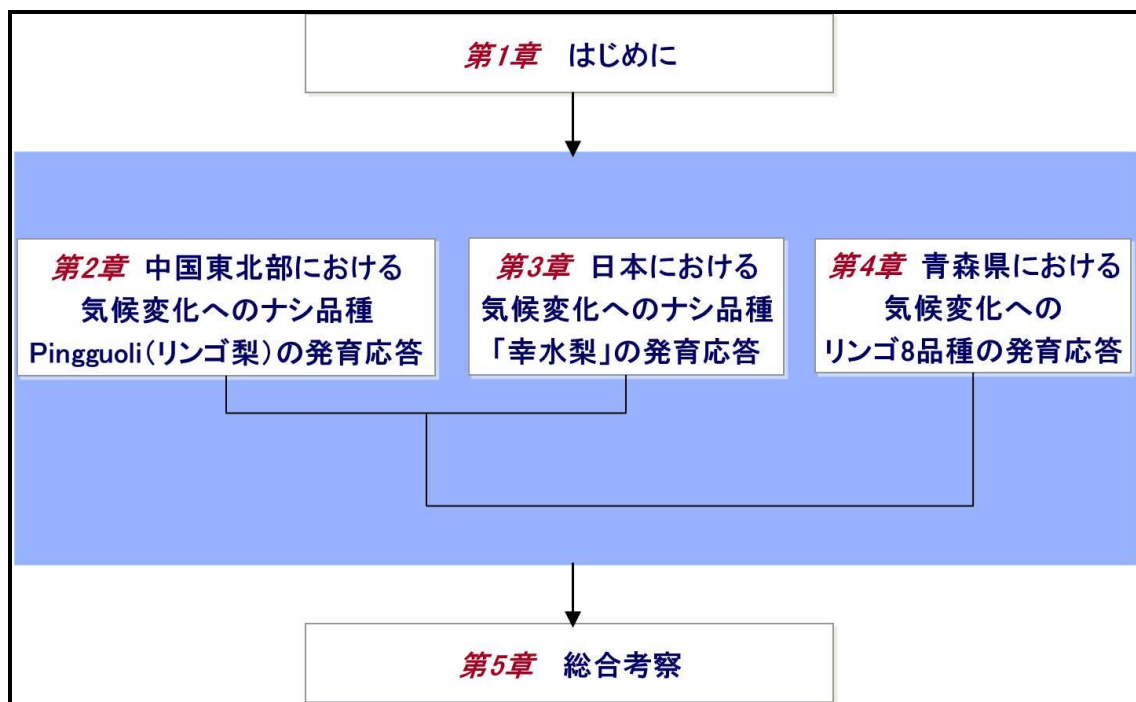


Figure 1. The analytical framework of this research.

第2章. 中国東北部における気候変化へのナシ品種 Pingguoli（リンゴ梨）の発育応答

本章の内容は、学術雑誌論文として出版する計画があるため公表できない。
5年以内に出版予定。

（以下削除）

第3章. 日本における気候変化へのナシ品種「幸水」の発育応答

本章の内容は、学術雑誌論文として出版する計画があるため公表できない。
5年以内に出版予定。

(以下削除)

第4章. 青森県における気候変化へのリンゴ8品種の発育応答

本章の内容は、学術雑誌論文として出版する計画があるため公表できない。
5年以内に出版予定。

(以下削除)

第5章 総合考察

本研究では、中国（第2章）と日本（第3章、第4章）の永年生作物であるナシ（リンゴ梨と幸水梨）とリンゴ（青森のリンゴ8品種）の長期間の発育観測記録の解析から、リンゴ梨は1953年以来2000年まで、幸水梨は1960年代以来2000年まで、リンゴは1930年代以来2000年までの期間に発育が早まってきたことが明らかになった。また、ナシとリンゴの発育は2-4月の気温と極めて密接に関連しており、春先の気温が上昇してきたことが、生物季節により確かめられた。本研究で見出された春先の植物発育の早期化と気候温暖化は、広く中国北部から日本、そしてヨーロッパ、北米でも報告されており、全球規模の気候温暖化・生物季節の早期化の一部であると考えられた。ただし、2000年以降は気温上昇・発育早期化ともに停滞ないし逆行しているようにみられ、気候温暖化・発育早期化がさらに進むかどうかは、今後の観測継続を必要とする。

気候変化への植物季節の応答に関して、まず、地点によって異なる可能性があることを考慮して、中国東北部のリンゴ梨について6カ所（第2章）、日本の幸水梨について7カ所（第3章）の各地域で生じている気候変化に対するナシの植物季節の応答を比べた。中国東北部6カ所での気温と植物季節の関係は、発芽は3・4月の平均気温と極めて高い相関を示し、 -4.3 日/ $^{\circ}\text{C}$ から -4.8 日/ $^{\circ}\text{C}$ の温度応答を示した。開花は4月の平均気温と高い相関を示し、 -4.0 日/ $^{\circ}\text{C}$ から -5.0 日/ $^{\circ}\text{C}$ の温度応答を示した。日本の7カ所では、開花と2-4月平均気温が高い相関を示し、 -3.8 日/ $^{\circ}\text{C}$ から -5.8 日/ $^{\circ}\text{C}$ の温度応答を示した。このように、中国東北部と日本の各地域内の地点間および地域間のナシの植物季節の温度応答は、ほぼ同程度であることが明らかになった。

次いで、その気候変化への植物季節の応答性が、品種や観測期間によって異なるかという疑問を解明するため、中国東北部のリンゴ梨（第2章）・日本の幸水梨（第3章）を用いて、その気温の変動への植物季節応答性を品種間と観測

期間の間で比較した。その結果、リンゴ梨の開花期の温度応答は $4.0 - 5.0 \text{ d } ^\circ\text{C}^{-1}$ の範囲で、幸水梨の温度応答は $3.8 - 5.8 \text{ d } ^\circ\text{C}^{-1}$ の範囲内となった。このように、リンゴ梨と幸水梨で、品種・観測期間による気候温暖化への植物季節の応答が同程度であることが分かった。

さらに、日本の青森県（第4章）で栽培されてきたリンゴ品種のうちの8品種（昔の有力品種：国光、紅玉など、現在の有力品種：ふじ、つがるなど）について、リンゴの発育開始期が長期的にどのように変化しているのか、その気温の変動への植物季節応答性は品種や観測期間によって異なるのかについても解析を行った。その結果、品種別発芽期の温度応答は $3.7 - 5.0 \text{ d } ^\circ\text{C}^{-1}$ の範囲で、開花期の温度応答は $3.4 - 5.1 \text{ d } ^\circ\text{C}^{-1}$ の範囲内となった。また、全期間を通して栽培されてきた **Crispin/Mutsu** についてみると、観測期間別の温度応答は $3.9 - 4.6 \text{ d } ^\circ\text{C}^{-1}$ の範囲であった。このように、リンゴでも品種・観測期間による気候温暖化への植物季節の応答は同程度であることが明らかになった。

続いて、その気候変化への植物季節の応答性を、種間で比較した。ナシ（第2章・第3章）とリンゴ（第4章）の開花期温度応答は、ナシが $3.8 - 5.8 \text{ d } ^\circ\text{C}^{-1}$ の範囲であるのに対して、リンゴは $3.4 - 5.1 \text{ d } ^\circ\text{C}^{-1}$ で、ほぼ同程度の気温応答性を示した。このように、ナシとリンゴの間でも、気温の変動への植物季節応答性には違いが見られなかった。

本研究が対象としたのは、限られた地域や品種についてではあるが、中国と日本のナシの生物季節について、観測地域の範囲全体にわたって、温度応答性に場所や品種による違いは無かった。日本のナシ栽培地域の一部では、植物季節の経年変化傾向が有意でなかったが、それは気温上昇傾向が弱い地域であり、気温変動への植物季節の応答性は他地域と違わなかった。青森のリンゴ8品種についての生物季節の気温応答性も、中国と日本のナシの気温応答性と同程度

であり、種間でも気候温暖化への植物季節の応答に異なるところはなく、同一と見なせることを示した。

以上のとおり、果樹園における生物季節の長期観測記録を用いて、気候温暖化への植物季節の応答を解析することにより、種や品種、地点、観測期間の違いを超えて、広い範囲にわたる気候温暖化への生物季節の応答を解明できることを、本研究は示した。同様の方法により、朝鮮半島など他の地域でも植物季節の長期観測記録を解析することで、東アジア全体にわたる生物季節変化の傾向もつかめるであろう。多くの先行研究が、街路樹や都市の植栽を対象としたため、植物季節が都市化の影響を受けているとされるのに対して (*Rötzer et al., 2000*; 松本, 2012)、果樹はその生育場所が農村部に多いことから、都市化の影響を受けにくく、気候変動の影響をより正確に測るのに適している。

前記のとおり、生物季節を用いて気候変化を検出することの意義は、気温の機器観測とは独立に、しかも低コストで観測を行える点にある。本研究では、果樹の発育観測記録を用いたが、それらは気候変化の検出を目的としたものでなく、年々の栽培管理や農家への指導のためにとられたものであった。そうした観測記録が得られる場合には、言わば追加コストゼロで、過去の気候変化の情報を得られることになる。

特に、ナシとリンゴは果樹として中国や日本列島、朝鮮半島などを含め、アジアだけではなく、世界中の農村地帯に広く分布するという特長がある。第2章では中国東北部で、第3章および第4章では日本で温暖化が進み、かつその進み方が世界全体と極めて似ていることを示したが、このようにして機器観測とは独立に気候変化傾向を検出できることは大きな意味がある。また、本研究で求めた植物温度応答性が日本や欧州のリンゴのそれと極めて近いことは、重要である。生物季節の観測において、他のバラ科果樹も合わせて利用できれば、

観測可能地域の範囲が大きく広がるからである。

本研究では、対象地域の各地で蓄積されてきた植物季節の長期観測記録を発掘・収集した。そうした記録は、中国東北部のリンゴ梨のように、デジタル化すらされていないことも多く、時間の経過や観測担当者の交代とともに、急速に失われつつあり、収集を急がなくてはならない。植物季節観測は、身近な地域の環境を安価でわかりやすく理解できる指標で、広く一般に応用でき、環境モニタリングや環境教育の教材としても有効となりうる。果樹を始めとした農作物の発育観測結果は、まさに「田舎の観測データ」(近藤純正, 2010)として極めて貴重であり、温度応答性を変化させる要因を解明することにより、気候温暖化の検出に重要な役割を果たすと期待される。

なお、生物季節の変化は、気候変化の指標としてそれ自体が重要であるほか、生態系の変化や農作物収量や品質の変化を引き起こす原因としても重要な意味がある。例えば、*Sugiura et al. (2013)*は、地球温暖化に伴ってリンゴの品質にも長期的な変化が生じており、糖度は高くなるが、酸度が低くなり、それに伴って硬度が低くなって、リンゴの食感が悪くなることを明らかにした。また、*Yun et al. (2012)*は、桃の開花期が早まって不時低温に遭遇すると、低温障害が生じて、桃の生長や収量に影響を与えることを示した。いっぽう、*Wang et al. (2012)*は、桃の果実生育初期の気温が高いと果実の成熟日数が短くなり、果皮の着色に影響を与える場合もあると報告した。さらに、*Lu et al. (2006)*は生物季節の変化について、生態系の変化の指標であるばかりか、生物種の多様性や生態系の構造にも影響を与えるとした。

本研究をはじめとする研究により、生物季節の気候変化応答が明らかになってきており、そうした変化が原因となって生じる生態系や農業への気候変化の影響も今後重要な研究テーマとなる。

摘要

第1章 はじめに

近年、地球温暖化問題など人間活動が地球環境に影響を与えていることが明らかになってきた。IPCC（気候変動に関する政府間パネル）第5次報告書（*IPCC, 2013*）によると、人間活動が全球的な気候温暖化を既に生じており、今後それがさらに深刻になるとみられる。気候変化の検出には、気象計測機器による観測が用いられているが、それにはいくつかの欠点がある。観測値が機器設置場所の環境変化に影響されること、観測点が都市に偏りがちで、都市化の影響を受けること、機器の更新や計測・集計方法の変化により経年的ドリフトが生じうることなどである。

これに対して、植物季節の変化によって気候変化の実態を捉える方法は、機器観測とは独立に気候の長期変化を一貫した方法で把握することができる。特に、農村地帯で栽培される農作物の植物季節の観測は、都市化の影響を受けにくく、空間代表性の点でも優れており、機器観測の結果と合わせれば、気候変化の実態をより高い確度で捉えられる。

また、気候温暖化による植物季節の変化は、それ自体重要である。農作物では、発芽・開花時期の変化は生産性の変化に直結し、遅霜や冷害の発生にも影響する。自然植生であれば、植物季節の変化は種の地理的分布を変化させる可能性もある。

30年以上といった長期間には、農作物の品種や栽培方法など気温以外の要因の変化が植物季節に影響している可能性があるため、本研究は、長期間の植物季節の変化が短期間の変動（気温のみの影響）の影響であるかを検討する必要がある。また、気候変化への植物季節の応答に関しては地域間の差、種間、品種間の差、観測年代の違いによって異なる可能性があるため、各要素を考慮し、植物季節の変化から気候変化の検出を試みる。

第2章 中国東北部における気候変化へのナシ品種 Pingguoli (リンゴ梨) の発育応答

この章では、リンゴ梨の主産地である中国吉林省延辺朝鮮族自治州内の6地点において、気温とリンゴ梨の過去58年間にわたる発育観測記録を解析した。対象地域では、2000年頃まで3-4月平均気温が上昇しリンゴ梨の発芽と開花が促進されてきたが、2000年以降は気温がやや低下し、それに伴って発育も遅くなっていた。気温と植物季節の関係では、発芽は3・4月の平均気温と極めて高い相関を示し、 -4.3 日/ $^{\circ}\text{C}$ から -4.8 日/ $^{\circ}\text{C}$ の温度応答を示した。この温度応答に場所の違いによる差は無かった。一方、開花は4月の平均気温と高い相関を示し、 -4.0 日/ $^{\circ}\text{C}$ から -5.0 日/ $^{\circ}\text{C}$ の温度応答を示し、この温度応答は場所によって異なり、その原因は、温度応答の非線形性、すなわち温度が高くなると開花時期の応答性が低くなるためであることが分かった。気温の長期傾向と年変動への温度応答を比較すると、発芽・開花とも気温の長期傾向と年変動に対して、温度応答に有意差がなかったことから、温暖化によって植物季節が早まっていると言えた。

第3章 日本における気候変化へのナシ品種「幸水」の発育応答

この章では、日本の主要な幸水梨産地のうちの7地点を解析対象地とし、1960年代から現在までの気温と植物季節のデータを用いて解析を行った。研究対象地域中3地点では、1960年代から現在までに2-4月平均気温が有意に上昇し、幸水の開花は有意に促進が早まったが、他の4地点では、気温上昇傾向も植物季節の経年変化傾向も有意でなかった。有意な気温上昇傾向がある3地点では、開花日と2-4月平均気温が高い相関を示した ($r = -0.79 \sim -0.88$ 、全て $P < 0.0001$)。開花の温度応答性は、栃木の -4.0 d/ $^{\circ}\text{C}$ から千葉の -4.8 d/ $^{\circ}\text{C}$ であり、また気温の長期的変化への応答性と年変動に対する応答性には差が無かった。従って、幸水梨の開花促進は、2-4月平均気温の上昇によるものと考えられた。一方、気温の長期変化傾向が明確でない4地点については、気温変動への植物

季節の応答性を、長期温度上昇のある他の地点の長期変動応答性と比較した。前者の地点の気温変動への植物季節の応答性は、後者の地点の長期変動応答性と大差無く、それら地点で植物季節の長期変化傾向がみられないのは、気温の長期変化傾向が無いためと考えられた。このように、日本の地域間の植物季節の応答が同程度であることが明確になった。

第4章 青森県における気候変化へのリンゴ8品種の発育応答

この章では、日本のリンゴ主産地である青森県で、日本の主要リンゴ品種8品種（昔の有力品種：国光、紅玉など、現在の有力品種：ふじ、つがるなど）を解析対象とし、1930年代から現在までの気温とリンゴの発育のデータを用いて解析を行った。リンゴの発育開始期が長期的にどのように変化しているのか、その気温の変動への植物季節応答性は品種ごと・観測期間ごとによって違いがあるのか、の問題点について解析を行い、その結果、リンゴ8品種（30年以上のデータ）の発育（発芽・開花）温度応答性は、3.7～5.0 日/°Cの範囲内であり、品種ごとの違いによる発育（発芽・開花）の温度応答性に有意差がなかったことから、気温に対する果樹の発育（発芽・開花）応答は、8品種でほぼ同じであり、例えば、今後のふじ品種（他の品種も適応）の発育を予測する際に、陸奥品種（他の品種も適応）の観測結果を用いることができると考えられる。また、観測期間ごとの結果から見ると、観測期間の違いによる発育（発芽・開花）の温度応答性に有意差が無かったことから、観測期間に関わらず、リンゴの発育（発芽・開花）の温度応答性は同程度であり、植物季節は気温と密接な関係があることが明らかになった。第4章では同じ地域（青森県）でリンゴの多様な品種（8品種）において同様に植物季節の記録を解析することで、気候変動への植物季節の応答性がその種類によって異なるのかという疑問の解明が分かりやすくなった。

第5章 総合考察

本研究は限られた地域や品種についてはあるが、本研究の対象地域ではヨーロッパや日本などと同じように、温暖化によって植物季節が早まっていることを示した。日本のナシ栽培地域の一部では、気温上昇傾向が有意でなかったが、それは植物季節の経年変化傾向に対応しており、気温変動への植物季節の応答性は他地域と違わなかった。中国と日本のナシを解析した結果は、観測地域の範囲が広く、気温や発育の長期変化傾向も異なっていたにも関わらず、温度応答性に場所や品種の違いによる差が無かった。青森のリンゴ8品種に対する解析結果も中国と日本のナシを用いた解析結果と同程度であり、品種による気候温暖化への植物季節の応答は異なるところはなく、同一と見なせることを示した。それは、この気候温暖化への植物季節の応答を解析する方法が、他の観測地域や多様な植物種類の生物季節にも解析されるという意味である。本研究同様にその植物季節の記録を解析することで、より広範な気温の傾向をつかめるであろう。街路樹や都市の植栽を対象とした既存研究では、植物季節が都市化の影響を受けているとされるが (Rötzer *et al.*, 2000; 松本, 2012)、果樹 (ナシやリンゴ) はその生育場所が田舎部に多いことから、都市化の影響を受けにくく、気候変動の影響をより正確に測るのに適しているといえる。

本研究では、対象地域の各地で蓄積されてきた植物季節の長期観測記録を発掘・収集した。そうした記録は、デジタル化すらされていないことが多く、時間の経過と観測担当者の交代とともに、急速に失われつつあり、収集を急がなくてはならない。植物季節観測は、身近な地域の環境を安価でわかりやすく理解できる指標で、広く一般に応用でき、環境モニタリングや環境教育の教材としても有効となりうる。果樹を始めとした農作物の発育観測結果は、まさに「田舎の観測データ」として極めて貴重であり、温度応答性を変化させる要因を解明することにより、気候温暖化の検出に重要な役割を果たすと期待される。

謝辞

本研究の遂行及び本論文の作成に当たり、全面的に多大な尽力と適切なお指導・ご鞭撻を賜りました東京大学大学院農学生命科学研究科の小林和彦教授に心より感謝申し上げます。また、同研究科の二宮正士教授、溝口勝教授、露木聡准教授、宮沢佳恵准教授からは貴重なご意見をいただきました。

中国東北部の調査を行う際には、延吉市果樹農場の楊云臣場長、龍井市華龍集団果樹場の李正洙副場長、和龍市西城鎮果樹園の金太旭園長、図們市龍城村果樹園の崔賢村長、琿春市双新万亩果樹場の崔德坤場長、汪清県大坎村果樹園の王云龙園長には、直接にアドバイスをいただくと同時に、本研究で用いたデータを提供していただきました。また、各地方気象局の行政係員の方から、地方気象局観測の気象データを提供していただきました。全ての協力者にここに心より感謝申し上げます。

日本のリンゴと幸水梨の研究を行う際には、地方独立行政法人青森県産業技術センターのリンゴ研究所栽培部小林達氏、千葉県農林総合研究センター果樹研究室戸谷智明氏、福岡県農林業総合試験場果樹部果樹栽培チーム渡邊辰彦氏、福島県農業総合センター果樹研究所栽培科額田光彦氏、茨城県農業総合センター園芸研究所果樹研究室清水明氏、熊本県農業研究センター果樹研究所落葉果樹研究室藤丸治氏、栃木県農業試験場研究開発部果樹研究室大谷義夫氏、鳥取県園芸試験場果樹研究室杉嶋至氏から、貴重な生物季節観測記録をご提供頂くとともに、アドバイスをいただきました。全ての協力者にここに心より感謝申し上げます。

また本研究室の上井はるみ秘書、同期のメンバー、先輩・後輩にはお世話になりました。ここに心より感謝します。

最後に、常に惜しみない支援をしてくれ、長い学生期間を見守ってくれた家族には感謝してやみません。

引用文献

英語文献

- Badeck FW, Bondeau A, Böttcher K (2004) Responses of spring phenology to climate change. *New Phytologist*, 162, 2, 295-309.
- Chmielewski F. M, Müller A, and Bruns E (2004) Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121, 69-78.
- Chmielewski F. M, Rötzer T (2001) Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108, 101-112.
- Chuine I, Yiou P, Viovy N (2004) Grape ripening as a past climate indicator. *Nature*, 432, 289-290.
- Doi H (2012) Response of the *Morus bombycis* growing season to temperature and its latitudinal pattern in Japan. *International Journal of Biometeorology*, 56, 895-902.
- Doi H, Katano I (2008) Phenological timings of leaf budburst with climate change in Japan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 512-516.
- Doi H, Takahashi M, Katano I (2010) Genetic diversity increases regional variation in phenological dates in response to climate change. *Global Change Biology*, 16, 373-379.
- Easterling DR, Wehner MF (2009) Is the climate warming or cooling? *Geophysical Research Letters*, 36, L08706.
- Estrella N, Sparks TH, Menzel A (2007) Trends and temperature response in the phenology of crops in Germany. *Global Change Biology*, 13, 1737-1747.
- Fan XC, Wang WT, Yang XH, Wu YJ (2010) Responses of apple tree's phenology in east and west sides of Liupanshan Mountain to climate change. *Chinese Journal of Ecology*, 29, 1, 50-54.
- Fitter AH, Fitter RSR (2002) Rapid changes in flowering time in British plants. *Science*, 296, 1689-1691.

- Foster G, Rahmstorf S (2011) Global temperature evolution 1979–2010. *Environmental Research Letters*, 6, 044022.
- Fujisawa M, Kobayashi K (2010) Apple (*Malus pumila* var. domestica) phenology is advancing due to rising air temperature in northern Japan. *Global Change Biology*, 16, 2651-2660.
- Gao Q, Chen J, Yan F, Zhao WL (2012) Phenological characteristics of herbaceous plants in Hebei Province and their responses to climate warming. *Chinese Journal of Ecology*, 31, 3, 600-605.
- Gao Q, Miao QL, Yue YX (2011) Phenology change for woody plants and its responses to climate warming in Hebei Province. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 32, 1, 17-22.
- Gao Q, Miao QL, Zhao SL (2010) Effects of climate warming on spring phenophase in Shijiazhuang Hebei province. *Chinese Journal of meteorology and environment*, 26, 1, 21-26.
- Ge QS, Wang HJ, Rutishauser T, Dai JH (2015) Phenological response to climate change in China: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 21, 265-274.
- Grab S, Craparo A (2011) Advance of apple and pear tree full bloom dates in response to climate change in the southwestern Cape, South Africa: 1973–2009. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 406-413.
- Honjo H, Fukui R, Sugiura T, Aono Y (2006) The DTS accumulation model for predicting the flowering date of Japanese pear tree in Japan. *Acta Horticulturae*, 707, 151-158.
- Horie T, Baker JT, Nakagawa H (2000) *Crop Ecosystem Responses to Climatic Change: Rice*. Wallingford: United Kingdom, CAB International Press.
- IPCC (2007) *Climate change 2007: the physical science basis*. In: Solomon, S. Qin, D. Manning, M. Chen, Z. Marquis, M. Averyt, K. B. Tignor, M. Miller, H. L. (Eds.), *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment*. Report of the

- Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom/New York, NY, USA, 996 pp.
- IPCC (2013) Summary for policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM), pp. 3–29. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC: Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP (2007) Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. pp 85-111. Cambridge University Press.
- Kosaka Y, Xie SP (2013) Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, 501, 403-407.
- Legave JM, Clauzel G (2006) Long-term evolution of flowering time in apricot cultivars grown in southern France: which future impacts of global warming? *Acta Horticulturae*, 717, 47-50.
- Li RP, Zhou GS, Guo CM, Sun SJ (2008) Phenology characteristics of *Ulmus pumila* and its simulation from 1981 to 2005 in Northeast China. *Chinese Journal of meteorology and environment*, 24, 5, 20-24.
- Li Z, Tang H, Yang P, Wu W, Chen Z, Zhou Q, Zhang L, Zou J (2012) Spatio-temporal responses of cropland phenophases to climate change in Northeast China. *Journal of Geographical Sciences*, 22, 29-45.
- Liu Z, Yang X, Wang W (2009) Characteristics of agricultural climate resources in three provinces of Northeast China under global climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 20, 9, 2199-2206.
- Lu PL, Yu Q, He QT (2006) Responses of plant phenology to climatic change. *Chinese Journal of Acta Ecologica Sinica*, 26, 3, 923-929.

- Ma T, Zhou C (2012) Climate-associated changes in spring plant phenology in China. *International Journal of Biometeorology*, 56, 269-275.
- Matsumoto K, Ohta T, Irasawa M, Nakamura T (2003) Climate change and extension of the *Ginkgo biloba* L. growing season in Japan. *Global Change Biology*, 9, 1634-1642.
- Menzel A, Sparks TH, Estrella N, Koch E, Aasa A, Ahas R, Alm-kübler K, Bissolli P, Braslavská O, Briede A, Chmielewski FM, Crepinsek Z, Curnel Y, Dahl Å, Defila C, Donnelly A, Filella Y, Jatzak K, Måge F, Mestre A, Nordli Ø, Penuales J, Pirinen P, Remišová V, Scheifinger H, Striz M, Susnik A, Van Vliet AJH, Wielgolaski FE, Zach S, Züst A (2006) European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, 12, 1969-1976.
- Menzel A (2000) Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *International Journal of Biometeorology*, 44, 76-81.
- Nyéki J, Soltész M (1996) Factors influencing the beginning and the course of bloom. In: *Floral Biology of Temperate Zone Fruit Trees and Small Fruits*. pp. 104-131. Akadémiai Kiadó, Budapest, Hungary.
- Parmesan C (2007) Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. *Global Change Biology*, 13, 1860-1872.
- Parmesan C, Yohe G (2003) A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421, 37-42.
- Pu JY, Yao XY, Yao XH, Xu YP, Wang WT (2008) Impacts of climate warming on phenological period and growth of apple tree in Loess Plateau of Gansu Province. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 29, 2, 181-183.
- Rötzer T, Wittenzeller M, Haeckel H, Nekovar J (2000) Phenology in central Europe-differences and trends of spring phenophases in urban and rural areas. *International Journal of Biometeorology*, 44, 60-66.
- Sameshima R, Hirota T, Hamasaki T, Suzuki S (2007) Temperature trends at the

- National Agricultural Research Center for Hokkaido Region in the 40 years from 1966 to 2005. *Journal of Agricultural Meteorology*, 63, 2, 95-102.
- Schwartz M, Ahas R, Aasa A (2006) Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Global Change Biology*, 12, 343-351.
- Schwartz MD, Reiter BE (2000) Changes in north American spring. *International Journal of Climatology*, 20, 929-932.
- Sugiura T, Ogawa H, Fukuda N, Moriguchi T (2013) Changes in the taste and textural attributes of apples in response to climate change. *Scientific Reports*, 3, 2418.
- Tao F, Yokozawa M, Xu Y, Hayashi Y, Zhang Z (2006) Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981-2000. *Agricultural and Forest Meteorology*, 138, 82-92.
- Urabe Y, Maeda S (2014) The relationship between Japan's recent temperature and decadal variability. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 10, 176-179.
- Walther GR, Post E, Convey P et al (2002) Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416, 389-395.
- Wang DC, Piao SJ, Zhang Y, Yun WL, Wang ZJ, Geng Z, Chen J (2012) Impact of climate change on leaf and flower dates of *Prunus persica* and *Syringa oblata* in recent 30 years in Hohhot. *Chinese Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition)*, 43, 4, 414-422.
- Yang L-X, Li S-F, Wang Y-L (2007) Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on yield formation of wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1, 1, 77-82.
- Yun SK, Chung KH, Yoon IK, Nam EY, Han JH, Yu DJ, Lee HJ (2012) Developmental rate equations for predicting blooming date of 'Yumyeong' (*Prunus persica*) peach trees. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 14, 4, 189-195.
- Zang HJ, Li XY, Li J, Cai J (2011) Responses of woody plants' spring phenology to climate changes in Shandong. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 32, 2, 167-173.

日本語・中国語引用文献

青森県ホームページ <http://www.pref.aomori.lg.jp/sangyo/faq/contents5-3-37.html>

伊藤寿、市ノ木山浩道 (2005) ニホンナシ ‘幸水’ の生育相および果実品質の年次変動と気象要因との関係. 園学研, 4, 3, 329-333.

『果樹園芸大百科 4 ナシ』編・出版：農山漁村文化協会、2000年

気象庁 (2002) 20世紀の日本の気候. 財務省印刷局

気象庁 (2005) 異常気象レポート. 気象庁

小池重人、繁田真由美、樋口広芳 (2012) 日本各地のサクラの開花時期. 地球環境, 17, 1, 15-20.

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, 27-36.

小林和彦、モイン・ウス・サラム (1998) 増えゆく大気CO₂とアジアのコメ. 農業および園芸, 73, 8, 857-863.

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

杉浦俊彦、小野祐幸、鴨田福也、朝倉利員、奥野隆、浅野聖子 (1991) ニホンナシの自発休眠覚醒期から開花期までの発育速度モデルについて. 農業気象, 46, 4, 197-203.

杉浦俊彦、黒田治之、杉浦裕義 (2007) 温暖化がわが国の果樹生産に及ぼしている影響の現状. 園芸学研究, 6, 257-263.

塚原あずみ、林陽生 (2012) 温暖化がサクラの開花期間に及ぼす影響. 地球環境, 17, 1, 31-36.

西垣知恵、林陽生 (2012) 近年における春の生物季節の変化. 地球環境, 17, 1, 91-98.

農林水産統計、2014

http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_kazyu/pdf/syukaku_ninasi_14.pdf

農林水産統計、2015

http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_kazyu/pdf/syukaku_nina_si_15.pdf

農林水産統計、2015

http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_kazyu/pdf/syukaku_ringo_15.pdf

藤沢茉莉子、小林和彦（2007）日本におけるリンゴの発育早期化にみられる温暖化の影響．農業気象，63，4，185-191.

本條均、島田裕一、金原啓一、鈴木信男、福井糧、杉浦俊彦（2002）冬季の温暖化が落葉果樹栽培に及ぼす影響．(2) ニホンナシ ‘幸水’ 開花日の年次変動．園芸学会雑誌，71，別2，288.

増田啓子（2003）生物季節への影響．生物の科学 遺伝，別冊 17，101-108.

増田啓子（2005）九州地方における温暖化によるサクラの開花とカエデの紅葉への影響．龍谷大学紀要，26，2，65-76.

松本太（2012）都市の高温化が植物季節に及ぼす影響の評価：埼玉県熊谷市を事例として．地球環境，17，1，51-58.

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）—イチョウ、イロハカエデの紅（黄）葉日を例として．日本生態学会誌，39，3-16.

荆子然，金东权（1989）苹果梨．苹果梨，延边人民出版社.