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

藤沢茉莉子・小林和彦
(東京大学大学院農学生命科学研究科)

Accelerating Phenology of Apple Trees in Japan as Influenced by Rising Air Temperature

Mariko FUJISAWA, and Kazuhiko KOBAYASHI

(Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo)
1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan

Abstract

Recent studies show hastening of the onset of the plant growing season and delay in the end of the growing season for the last several decades. With the well-established dependence of plant phenology on temperature, the phenological trends are interpreted as an indication of global warming. However, for several decades, other changes, e.g., those in varieties and agronomic practices, may also have contributed to the phenological trends. In this study, we analyzed the records of temperature and phenological events (budding, flowering and harvest) in the apple (*Malus pumila* var. *domestica*) from 1977 to 2004 at two locations (Kuroishi and Fukushima) in northern Japan. To each time series, we fitted a smoothing spline to obtain the long-term trend, and calculated the anomaly of deviations in yearly observations from the long-term trend. We found acceleration of budding by 0.23 d/y (Kuroishi and Fukushima), and that of flowering by 0.24 d/y (Kuroishi) and 0.27 d/y (Fukushima). The timing of budding was closely correlated with mean air temperature in March at a sensitivity of -3.9 d/°C (Kuroishi) and -4.3 d/°C (Fukushima). The temperature sensitivity showed no significant difference between the long-term trends and the anomalies. Flowering results were very close with one exception in Kuroishi: the temperature sensitivity in the long-term trend (-3.4 d/°C) was significantly less than that for the anomaly (-5.2 d/°C). The date of harvest showed no significant temporal trends or correlation with air temperature. These results indicate that the acceleration of budding in the apple can be regarded as a signal of a temperature increase, and that the acceleration of flowering may be a result of the temperature increase despite in an exceptional case.

Key words: apple, growing season, plant phenology, warming

キーワード: 温暖化, 植物季節, 生育期間, リンゴ

1. はじめに

近年, 世界各地で植物の発育開始が早まっており, 一方で発育終了は遅くなっていることが指摘されている。例えば Menzel (2000) によると, ヨーロッパでは 1960 年代以降, 樹木の展葉期が 6.3 日 (0.21 日/年) 早まり, 紅葉期が 4.5 日 (0.15 日/年) 遅くなった。また, Schwartz and Reiter (2000) によると, 北米では 1960

年代以降, 展葉期が 5.4 日 (0.18 日/年) 早まっている。日本では, イチョウに関する同様の研究があり, 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)。さらに, 青森県のリンゴに関して, 発芽期, 展葉期, 開花期が 1967 年以降有意に早まっていることが報告されている (Imamura, 2006)。

植物季節が気温と密接な関係を示すことは, 以前から良く知られている。日本では, 例えば Aono and Omoto

2007 年 2 月 26 日 受付, 2007 年 5 月 28 日 受理

(1994) が、気温と植物季節の密接な相関を利用して、サクラの開花の観測記録から過去の気温を推定しようとした。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℃ 上昇すると、開花が 4.6 日早まるという (Chmielewski *et al.*, 2004)。前記の植物の発育開始早期化も、春季の気温上昇と正の相関関係があり、それが広範囲に見られることから、地球温暖化の現れであるとされる (例えば Menzel *et al.*, 2006)。

しかし、年々の植物季節の変動と長期間の植物季節の変化を、無条件に同一視することには問題がある。数十年といった長い期間では、気温以外に多くの要因が変化する。例えば農作物では品種や栽培方法が変わり、気温以外の気候や土壌、大気組成も変化する。従って、長期間の観測で見出された発育の早期化には、気温以外の要因の効果が含まれている可能性がある。

この問題は、大気 CO₂ 濃度と農作物収量の関係を考えれば、分かりやすい。農作物生産統計から、過去数十年間にわたるアジアのコメ収量を入手して、同期間のハワイマウナロア山上の CO₂ 濃度に対してプロットすると、両者は密接な右肩上がりの関係を示す (Kobayashi and Salam, 1998)。しかも、CO₂ 濃度を高めれば農作物収量が増えることは、実験でも確かめられている。にも関わらず、過去の収量増加が CO₂ 濃度上昇によるとは言えない。増収のほとんどは、品種改良や栽培法改善の結果であり、CO₂ 濃度の効果は小さいと考えられる。この場合、長期間の CO₂ 増加による見かけの農作物増収効果は、実験で見出される効果よりもはるかに大きい (Kobayashi and Salam, 1998)。すなわち、長期間で見られる効果と短期間のそれとを区別して考え、効果の方向だけでなく、長期間と短期間で見られる効果の大きさを比べる必要がある。

本研究は、日本でも植物の発育が早まっているか、早まっているならば、それが気温上昇の結果と言えるかを明らかにするために行った。その際、長期間の観測に含まれる上記の問題点を、次の方法で解決した。

1. 遺伝的に同一の個体群であるリンゴを継続的に観測した結果を用いることにより、観測期間内の遺伝的变化を無くす。リンゴは永年生作物であるため品種の変化が比較的少なく、同一個体群での長期の経年観測が可能である。
2. 気温と発育の観測データを、長期間の変化と年々の変動に分けて、それぞれについて気温と発育の関係を調べるとともに、その関係が長期間変化と年々変動とで同じかどうか調べる。

なお、リンゴは温暖化によって栽培適地が高緯度側に大きく移動すると予測されており (Sugiura and

Yokozawa, 2004)、その発育に及ぼす気候変化の影響は、植物季節の変化としてだけでなく、農業生産への影響を予測する上でも重要である。

2. 材料および方法

2.1 リンゴの観測場所

日本最大のリンゴ栽培地域である青森県と、主要な栽培地域では南限に近い福島県を分析対象地とした。青森県は、農林総合研究センターりんご試験場 (東経 140 度 37 分、北緯 40 度 38 分、標高 70 m、青森県黒石市大字牡丹平字福民 24) の観測結果を用い、福島県は、農業総合センター果樹研究所 (東経 140 度 28 分、北緯 37 度 45 分、標高 102 m、福島県福島市飯坂町平野字檀の東 1) の観測結果を用いた。以下、簡単のために、前者の観測地点を黒石、後者を福島と呼ぶ。

2.2 リンゴの発育観測

黒石の発育観測値は、樹齢 12 年生以上で、最低 3 本の樹 (1977–83 で同一樹、1984–2000 で同一樹、2001–2004 で同一樹) で観測を行っている品種“ふじ”に関して、1977 年から 2004 年まで 28 年間の発芽日、開花日、収穫日のデータを用いた。同様に、福島のリンゴ発育観測値は、1976 年以降継続して同じ 2 樹 (1977 年当時 12 年生であった樹) で観測を行っている品種“ふじ”に関して、同期間の発芽日、開花日、収穫日のデータを用いた。ここでいう発芽日とは頂芽の頂部が破れ、青みの現れたものが 3 個以上認められたときを指し、開花日とは 1～2 花が開いたとき (黒石)、あるいは連続して開花し始める最初の日 (福島) とそれぞれ定義する。また収穫日は、両試験場が行っている果実の熟度調査の最終日と定義する。

2.3 気温観測値

気温の観測地点は、リンゴの発育観測地点に近いことを基準とし、福島では同じ果樹試験場内の気象観測値を用いた。両観測点は直線距離でおよそ 120 m 離れている。福島での観測方法は、1981 年までは百葉箱内の最高・最低温度計による目視観測であるが、1982 年以降は自動観測であり、日平均気温は毎 24 正時観測値の平均を取ったものである。またこのデータ解析期間では、気象・果樹とも観測場所の変更はない。一方黒石では、りんご試験場の気象観測値はあるものの、1995 年から 1996 年にかけて観測機器の変更があり、同時に観測方法も変更されていた。このため、りんご試験場から直線距離で約 3 km の青森県農林総合研究センター農業試験場 (青森県黒石市境松 1-1-1) で、継続して自動観測を行っている黒石アメダス観測点 (東経 140 度 34.9 分、北緯 40 度 38.8 分、標高 40 m) の気温観測値を用いた。ここで日

平均気温とは、毎正時観測値の平均をいう。

2.4 統計解析

統計解析ソフト JMP (SAS Institute Inc.) を用いて、観測された平均気温と果樹の発育 (発芽日, 開花日) の毎年のデータに、平滑化スプライン曲線 (平滑化係数 $\gamma = 1000$) をあてはめ、それを長期的な傾向とした。年々の変動の値は、観測値から長期的な傾向を差し引いて求めた。そして平均気温と果樹の発育の観測値を、長期的な変化と年々の変動とに分けて、発育を平均気温で回帰分析を行い、得られる回帰係数を長期的変化と短期的変動とで比較した。また、リンゴの発育の気温に対する応答性に、場所によって違いがあるかどうかを、場所と気温の交互作用で判定した。

3. 結果

3.1 リンゴの発芽日, 開花日, 収穫日

福島でのリンゴの発芽日は、解析に用いた期間内で最も早い年が3月18日、最も遅い年は4月13日で、平均は3月29日であった。一方、黒石の発芽日は、3月27日から4月23日の範囲にあり、平均は4月9日であった。発芽日の長期的な変化をみるために、観測値に平滑化スプライン曲線をあてはめた結果、黒石では1990年代から、福島では1980年代の半ばから、いずれも発芽時期が早まっているとみられた (Fig. 1a)。1977年以降の観測結果に直線を当てはめると、黒石では0.23日/年 ($P = 0.07$)、福島でも0.23日/年 ($P = 0.09$) の速度で、発芽が早まっていた。

一方開花日は、福島では最も早い年が4月15日、最も遅い年は5月9日で、平均4月27日であった。黒石の開花日は、4月24日が最も早く、5月21日が最も遅く、平均は5月8日であった。開花日の観測値に平滑化スプライン曲線をあてはめて、長期的な変化をみた結果、発芽期と同様に開花期も、黒石、福島ともに早まっているとみられた (Fig. 1b)。1977年以降の観測結果に直線を当てはめて開花期の変化速度を求めると、黒石は0.24日/年 ($P = 0.1$)、福島では0.27日/年 ($P = 0.02$) となった。

発芽日、開花日の観測値から上記の長期変化傾向を差し引いた発育の年々変動は、福島と黒石でよく似たパターンを示した (発芽日について Fig. 2)。

収穫日は、黒石では人為的要因によって毎年11月6日前後と決まっているため年々の変化がなく、福島では0.20日/年で遅くなっているが、人為的要因によるものが大きく、統計的に有意な傾向では無い ($P = 0.16$)。

3.2 気温の長期的な傾向

リンゴの発芽期を決めるのは、冬季の休眠から覚醒以降の積算温度であるといわれているが (Tamata and

Fig. 1. Temporal changes in budding date: D_b (a) and flowering date: D_f (b), in Fukushima and Kuroishi. DOY: day of the year. Filled circles are observations in Kuroishi, unfilled circles are observations in Fukushima, and the curves are long-term trends estimated with the smoothing splines.

Fig. 2. Anomalies in budding date (D_b) in Fukushima (unfilled circles) and Kuroishi (filled circles).

Noro, 2000), 本研究では単純に3月の平均気温を用いた。予備的な解析により、3月の平均気温が他の月の平均気温よりも発芽日との相関が高く、しかも相関が充分高いことが分かったためである。一方開花日は、発芽日と、発芽してから積算温度で決まるといわれているが (Tamata and Noro, 2000), ここでは簡単のために3・4月の平均気温 (3月の平均気温と4月の平均気温を平均

したもの)に着目した。

年平均気温, 3月の平均気温, 3・4月平均気温の長期的な変化をみるために, 平滑化スプライン曲線をあてはめた結果, 1980年代半ば頃から, いずれも上昇傾向にあることが分かった (Fig. 3a, b, c)。1977年以降の気温に直線を当てはめて, 気温の上昇速度を求めたところ, 年平均気温は, 黒石が $0.045^{\circ}\text{C}/\text{年}$, 福島では $0.056^{\circ}\text{C}/\text{年}$ となり ($P < 0.01$), 3月の平均気温は, 黒石で $0.061^{\circ}\text{C}/\text{年}$ ($P = 0.03$), 福島は $0.068^{\circ}\text{C}/\text{年}$ ($P = 0.02$), 3・4月の平均気温は, 黒石で $0.071^{\circ}\text{C}/\text{年}$, 福島で $0.077^{\circ}\text{C}/\text{年}$ となった ($P < 0.01$)。これらは, いずれも統計的に有意に0と異なるので, 黒石でも福島でも気温は上昇しつ

Fig. 3. Temporal changes in annual mean air temperature: T_{annual} (a), mean air temperature for March: T_{Mar} (b), and mean air temperature for March-April: $T_{\text{Mar-Apr}}$ (c) in Fukushima and Kuroishi. Symbols are the same as for Fig. 1.

Fig. 4. Anomalies in mean air temperature for March in Fukushima and Kuroishi.

つあると言える。

気温の観測値から長期傾向を差し引いて得られる年々変動成分を, 3月の平均気温に関して Fig. 4 に示したが, 黒石と福島とで, 極めてよく似た経年変化パターンがみられた。

3.3 発育時期と気温の関係

3.3.1 発芽日と3月の平均気温

3月の平均気温と発芽日の間には, 密接な直線関係が認められ (Fig. 5a), 発芽日を平均気温で回帰した際の直線の傾き, すなわち発芽の温度応答性は, 黒石で -3.9 日/ $^{\circ}\text{C}$ ($r = -0.85$), 福島では -4.3 日/ $^{\circ}\text{C}$ ($r = -0.92$) と, いずれも統計的に有意であった ($P < 0.001$)。観測値の長期的な変化について, 同様に発芽の温度応答性をみると (Fig. 5b), 黒石で -3.8 日/ $^{\circ}\text{C}$ ($r = -0.97$), 福島では -3.7 日/ $^{\circ}\text{C}$ ($r = -0.99$) となった (いずれも $P < 0.001$)。一方, 同じく年々変動では (Fig. 5c), 黒石で -3.9 日/ $^{\circ}\text{C}$ ($r = -0.84$), 福島で -4.6 日/ $^{\circ}\text{C}$ ($r = -0.91$) となり (いずれも $P < 0.001$), 長期的変化と年々変動とで, 温度応答性には差が無かった。言い換えれば, リンゴの発芽は3月の気温の上昇とともに早まっており, しかも発芽の温度応答は, 年々の変動でみられるものと同程度である。

なお, 発芽日と3月の平均気温の関係を, 黒石と福島とで比べると, 長期変化傾向どうしの関係では, 回帰直線の切片は異なるが, 傾きすなわち温度応答性には差が無かった (Fig. 5b)。一方, 同じく年々の変動に関して黒石と福島を比べると, 切片・傾きともに有意差が無かった (Fig. 5c)。黒石と福島で, 発芽の温度応答性には, 差が無いと言える。

3.3.2 開花日と3・4月の平均気温

3・4月の平均気温と開花日の間には密接な関係が認められ (Fig. 6a), 開花日を平均気温で回帰した際の直線の傾きは, 黒石で -4.7 日/ $^{\circ}\text{C}$ ($r = -0.87$), 福島で -3.8

Fig. 5. Relationships between budding date and mean air temperature for March in observations (a), long term trends (b), and anomalies (c).

日/℃ ($r = -0.85$)と、いずれも統計的に有意であった ($P < 0.001$)。観測値の長期的な変化について、同様の回帰分析を行うと (Fig. 6b), 黒石で -3.4 日/℃ ($r = -0.91$), 福島では -3.6 日/℃ ($r = -0.99$)となった (いずれも $P < 0.001$)。一方、年々の変動性についての回帰分析では (Fig. 6c), 黒石で -5.2 日/℃ ($r = -0.89$), 福島では -4.0 日/℃ ($r = -0.83$)となり (いずれも $P < 0.001$), 黒石で長期的な傾向よりもやや大きな温度応答性がみられた。

なお、開花日と3・4月平均気温の関係について、長期的変化、年々の変動のいずれも、黒石と福島の間では、回帰直線は同一とみなすことができた。

Fig. 6. Relationships between flowering date and mean air temperature for March-April in observations (a), long term trends (b), and anomalies (c).

3.3.3 収穫日と気温の関係

収穫日については、どの月の平均気温とも、有意な相関関係を見出せなかった ($P > 0.1$)。

4. 考 察

発芽の温度応答性は、黒石、福島の2地点とも、年々の変動と長期的な傾向とで差が無かったことから、発芽は春の気温上昇によって早まっていると言える。Menzel *et al.* (2006) は、125,000件を超えるヨーロッパでの観察結果から、植物季節の始まりが 0.25 日/年の速度で早まっていることを報告しているが、本研究の結果 (0.23 日

/年)はそれとほぼ一致する。また開花に関しては、観測された開花の温度応答 (-4.7 日/°Cないし -3.8 日/°C) は, Chmielewski *et al.* (2004) の -4.6 日/°Cとほぼ一致する。しかし、黒石では年々の変動 (-5.2 日/°C) の方が、長期的な傾向 (-3.4 日/°C) よりも有意に大きかった。発芽ではみられず、黒石の開花にみられるこの傾向が何に起因するのかは不明であるが、開花の温度応答には発芽時期に及ぼす気温の影響と、発芽以降の気温の影響が含まれており、例えば Imamura (2006) は、発芽は3月の最低気温に最も影響されることを明らかにしており、単純に3・4月の平均気温をとるだけでは、適切に評価できないものと考えられる。さらに、収穫時期は、果実の熟度よりは、作業日程上の都合など人為的要因により決定されているため、現在までに早期化傾向がみられず、また気温との相関関係も弱い。果実の熟度を反映した収穫時期を指標化していくことが望まれる。

本研究で調べた2地点間で、発育の温度応答性に有意差が無かったことから、気温に対する果樹の発育応答は、両地点で同じで、黒石における今後のリンゴ“ふじ”の発育を予測する際に、福島を観察結果を用いることができると考えられる。なお、発芽日と3月の平均気温の長期傾向どうしの関係で、2地点間で切片が異なっており (Fig. 5b)、黒石のほうが福島よりも、温度のわりに発芽が早かった。福島では発芽日が3月中であるため、3月の平均気温は実際に発芽に影響する気温よりも高く、逆に黒石では発芽日が4月中なので、3月の平均気温は発芽に実際に影響する気温よりも低いとめと考えられる。つまり、より正確に発芽に影響する期間の気温を用いることで福島の応答直線は図中で左に、黒石のそれは右にシフトし、場所による温度応答直線の違いは小さくなると考えられる。ただし、黒石ではリンゴの発育の観測地点 (青森県りんご試験場) のほうが、気温観測地点 (黒石アメダス観測点) よりも標高が約 30 m 高い。2地点における最近 (機器を変えた 1997 年以降) の3月平均気温を比べると、りんご試験場のほうが平均して 0.13°C 低い。従って、観測地点の違いを考慮すれば、黒石の温度応答直線はむしろ左に移動するであろう。

以上のとおり、本研究は限られた地点についてではあるが、ヨーロッパなどと同じように日本でも、温暖化によって植物季節が早まっていることを示した。しかも、研究対象としたリンゴの観測地点は、福島は福島市中心部から直線距離にして約 7 km、黒石は弘前市中心部から約 10 km と、いずれも大都市から離れた農村地帯にあり、その周辺には現在でも耕地が広がっていることから、都市化の影響を比較的受けていない地点で気温が高まっていることが分かった。いわゆる「地球温暖化」を示す気温観測

結果には、都市化や周囲環境変化の影響が含まれており、都市化の影響の少ない「田舎の観測点」が重要であると指摘されている (Kondo, URL)。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、今後解析を進めることにより、「地球温暖化」の検出に重要な役割を果たすと期待される。その際、本研究で行ったように、長期間の変化と短期間の変動に分けて温度応答性を比べることにより、「みかけ」の影響と真の影響を区別する必要がある。

謝 辞

本研究を行うにあたり、青森県農林総合研究センターりんご試験場の山谷秀明前栽培部長、福島県果樹試験場の永山宏一栽培部主任研究員にはデータを提供していただき、また多くの助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

References

- Aono, Y., and Omoto Y., 1994: Estimation of temperature at Kyoto since the 11th Century using flowering data of cherry trees in old documents. *J. Agric. Meteorol.*, **49**(4), 263–272.
- 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. *Agric. For. Meteorol.*, **121**, 69–78.
- Imamura, T., 2006: Long-term trends in temperature and phenology of apple tree in spring in central Aomori. *J. Agric. Meteorol. Tohoku.*, **50**, 10–16 (今村友彦, 2006: 春季の気温とリンゴの植物季節現象の長期的動向. 東北の農業気象, **50**, 10–16)
- Kobayashi, K., and Salam, M. U., 1998: Increasing atmospheric CO₂ and Asian rice production. *Agric. Hortic.*, **73**, 857–863. (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**, 857–863.)
- Kondo, J., URL <http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kisho/kisho07.html>
- Matsumoto, K., Ohta, T., Irasawa, M., and Nakamura, T., 2003: Climate change and extension of the *Ginkgo biloba* L. growing season in Japan. *Global Change Biol.*, **9**, 1634–1642.
- Menzel, A., 2000: Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *Int. J. Biometeorol.*, **44**, 76–81.
- Menzel, A., Sparks, T. H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-kubler, K., Bissolli, P.,

- Braslavská, O., Briede, A., Chmielewski, F. M., Crepinsek Z., Curnel, Y., Dahl, Å., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatzcak, K., Måge, F., Mestre, A., Nordli, Ø., Peñuelas, J., Pirinen, P., Remišová, V., Scheifinger, H., Striz, M., Susnik, A., Van Vliet, A. J. H., Wielgolaski, F. E., Zach, S., and Zust, A., 2006: European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biol.*, **12**, 1969–1976.
- Schwartz, M. D., and Reiter, B. E., 2000: Changes in North American spring. *Int. J. Climatol.*, **20**, 929–932.
- Sugiura, T., and Yokozawa, M., 2004: Impact of global warming on environments for apple and Satsuma mandarin production estimated from changes of the annual mean temperature. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.*, **73**(1), 72–78.
- Tamata, T., and Noro, S., 2000: Growing processes and technology. In *An Encyclopedia of Fruit trees and Horticulture 2, Apple*. Nosangyosonbunkakyokai, Tokyo, pp. 145–152. (玉田 隆・野呂昭司, 2000: 生育過程と技術. 果樹園芸大百科 2 リンゴ, 農山漁村文化協会, pp. 145–152.)