

温暖化影響のいま

——生態系と農林水産業への
インパクト



[第6回]

温暖化の 生物季節への影響

清水 庸 Yo Shimizu

東京大学 大学院農学生命科学研究科 助教

大政 謙次 Kenji Omasa

東京大学 大学院農学生命科学研究科 教授

はじめに

「生物季節 (phenology, フェノロジー)」とは、開花や落葉、鳥の渡りなど、植物や動物が周期的に示す現象のことである。対象となる生物により、「植物季節」と「動物季節」に分けられる。地球温暖化の進行など、生物が適さない生育環境下にある場合、生物は絶滅を避けるため、生物季節の変化、生息分布の変化、そして形態的变化や遺伝子の変化など、さまざまな手段で環境への適応を試みる。このなかで、生物季節の変化は初期に現れ、変化を捉えやすく、相対的に観測しやすい現象であるため、生態系の状態やその変化を知るための重要な指標である。たとえば、植物葉のフェノロジー（発芽や落葉、成長期間）の変化は、光合成を通して、炭素・水の循環に影響を与え、また植物の成長速度の変化や生物種間の相互関係の変化を介し、生物種の個体数や生息分布の変化とも関わる（図1）。温暖化が生態系に著しく影響を及ぼす場合は、生物種の絶滅リスクの増加から、最終的には生物多様性の減少や生態系サービスの低下を引き起こす可能性もある。生物季節に関する主な研究対象は、それらの時間的变化や地理的傾向、そして気象・気候との関連性である。生物季節への温暖化の影響を

考える場合、生物季節の短期間の変化のみならず、長期間における変化を対象として、系統的傾向を調べることが重要となる。本稿では、国内外において報告されている、生物季節への温暖化の影響についての概要を説明するとともに、生物季節の変化について注目する点などを紹介する。

広域で共通する生物季節の変化

一般に独立な個々の研究結果を、統計的に統合し、分析する方法を「メタ分析」と呼ぶ。この方法を使って、生物季節の時間的变化が、広域（北半球の大陸レベル）で共通して見られるかどうかを検証された (IPCC, 2007; Parmesan & Yohe, 2003 など)。1950年から2000年において、平均的に30年の観測期間を有する、草本・木本植物、鳥類、両生類、魚類など、数百を超える動植物のデータ・研究結果から、春に見られる開花や繁殖などの生物季節は10年単位で2.3日～5.1日早くなっていること、そして気温1°Cの上昇に対応して、春の植物季節は平均値で2.5日～6.0日早まることが報告されている。ヨーロッパでの542種類の植物を対象としたメタ分析では、春から夏の植物季節（開花・展

葉)が10年単位で2.5日早まるのに対して、秋の植物季節(黄葉・紅葉)は10年単位で0.2日遅くなるという結果であり、春の植物季節と比較して、その変化の数値は小さく、変化傾向は明瞭ではない。また植物の成長期間については、10年単位で最大3.5日の延伸が報告されている。2007年に公表されたIPCCの「第4次評価報告書」ではヨーロッパや北米での研究結果が多いが、次期の報告書ではアジアを含め、多くの地域での研究結果が加えられ、より広域における生物季節の変化に関する新たな数値が公表されるであろう。

日本での生物季節の変化

国内における植物季節の変化に関する報告は、気象協会・気象庁の生物季節観測指針(気象協会, 1953; 気象庁, 1985)に基づき、1950年代から気象官署にて観測されているデータを利用したものが多く、たとえば、過去50年間において、サクラの開花は10年単位で0.9日早まり、カエデの紅葉は3.2日遅くなっている(気象庁, 2013)。また、クワの葉の成長期間(開芽から落葉)は10年単位で3.6日延伸しており、開芽が早まることより、落葉の遅れが延伸に寄与している(Doi, 2012)。このように、春と秋の植物季節の比較では、春の植物季節の早まりよりも、秋の植物季節の遅れの傾向のほうが顕著である。なお、これらの観測データや変化傾向の解析結果には、地球温暖化に加えて、ヒートアイランド現象による地域的な温暖化の影響も含まれている。気象庁のデータ以外にも、アンケート調査により収集した植物季節のデータを解析した研究(樋口ら, 2009)もあり、たとえば、福島県三春町の三春滝桜(ベニシダレザクラ)の満開日が1980年代以後、10年単位で約2.3日早くなっている。植物季節の変化に影響を与えるものとして、気温、降水量、土壌水分、日長など、さまざまな要因が指摘されているが、特に気温変化と強い対応関係があることが知られている。冬から夏にかけての12種類の植物季節(開花・開芽)を対象とした解析では、最短でイチヨウの開芽の44日前の期間、最長でアジサイの開花の106日前の期間における気温変化と有意な対応関係を示し(Nasu *et al.*, 2005)、イチヨウの開芽と落葉は気温1°C上昇に対応して、それぞれ、2.9日早まり、4.4日遅くなることがわかっている(Matsumoto *et al.*, 2003)。また、京都におけるヤマザクラの満開日の古記録、

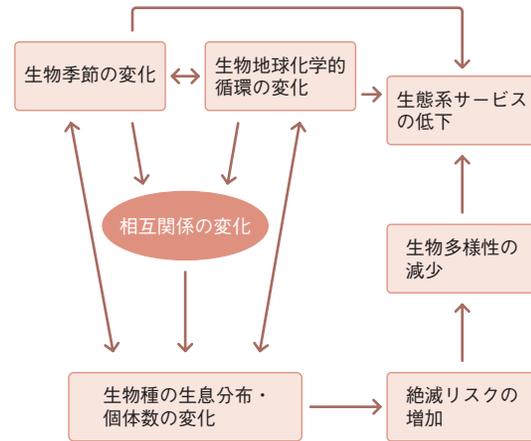


図1 自然生態系分野における温暖化影響のメカニズム

(環境省, 2008. を一部改変)

そして満開日の変化が3月の平均気温に対応していることを利用して、9世紀以後の春季の気温変化を再現する研究(Aono & Kazui, 2008)もあり、生物季節の特性を活かした研究である。動物季節については、本講座の前回「【第5回】温暖化に脅かされる生態系・生物多様性」(中静, 2013)にも紹介されているコムドリ(ツバメ)の産卵時期の早まりや、ウグイスの初囀の早まり〔10年単位で6.3日〕(樋口ら, 2009)など、動物季節の早まりに関する報告例も多くあるが、日本における生態系への影響をとりまとめた総説(Ogawa-Onishi & Berry, 2013)では、ウグイスの初鳴やモンシロチョウの初見など、過去50年間において遅れを示す現象も複数見られ、変化傾向としては一様ではない。

生物季節の変化には、① 長期にわたる気候の平均的な状態の変化(たとえば、年平均気温の変化)がもたらす影響と、② 気候の変化性・ばらつき、すなわち異常気象を含め、一時的かつ極端な気候の変化(たとえば、急な低温、霜など)が与える影響の双方が含まれる(Reyer *et al.*, 2013)。特に、気候の急な変化に対して、生物はそれぞれ異なる挙動を示すであろう。このような場合、本講座の前回において、「種間相互作用の変化」として触れられているとおり、開花や開芽の時期の変化は、花粉を媒介する動物、そして植物葉・蜜を餌とする動物の行動の時期と適合しない可能性も考えられる。今後、温暖化が進む場合、気温や降水量のばらつき具合はさらに大きくなると考えられるため、生物季節間での相互の関心に注目する必要がある。



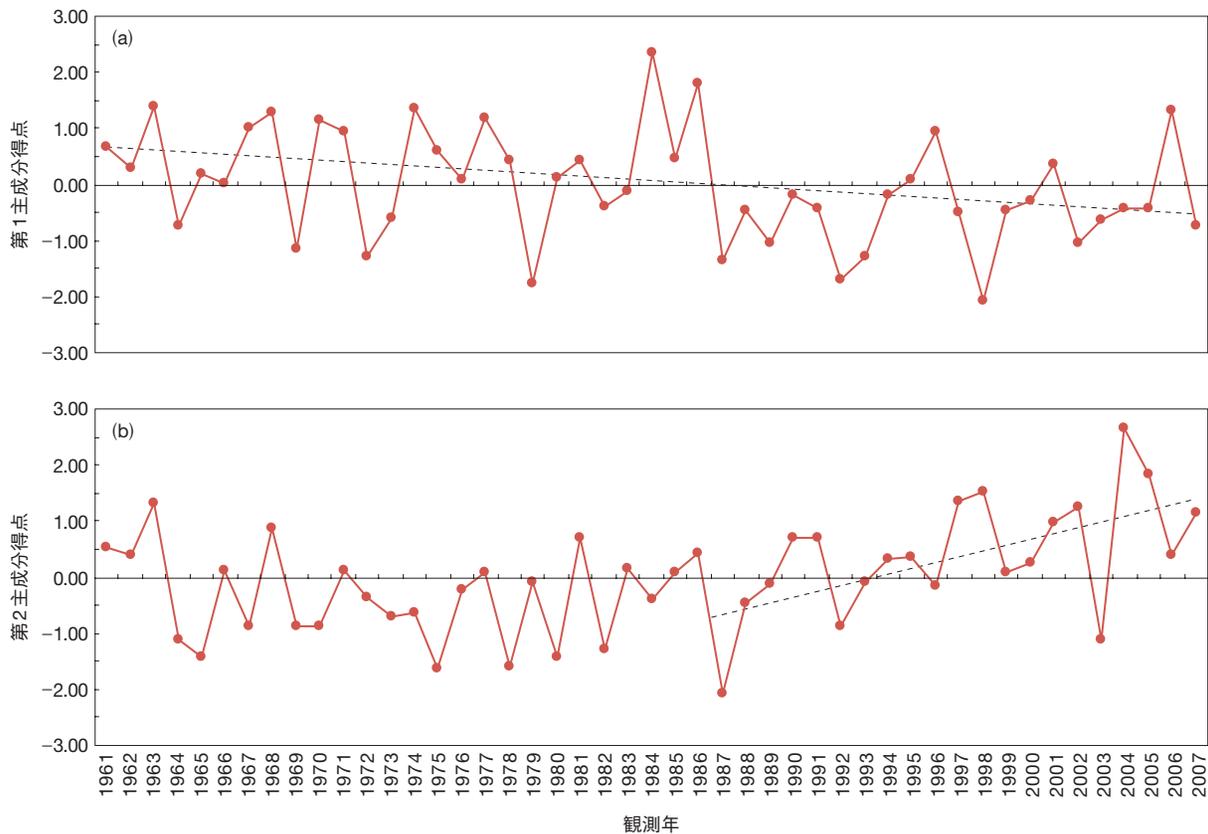


図2 ウメの開花日の変化に関する第1・第2主成分得点の時系列変化

図中の点線は、年次を説明変数とした回帰直線（第1主成分得点については1961年～2007年、第2主成分得点については1987年～2007年）を示す

（清水・大政，2010. から一部抜粋および加筆）

植物季節の変化における地域的傾向

メタ分析を使用し、広域において共通的な生物季節の変化傾向を明らかにする研究のほかにも、緯度、気温変化の程度などに対応した生物季節の変化の地理的な違いに着目した研究も進められている。たとえば、ウメの開花日の場合、気象庁は40年以上の観測データをもとに、全国で50年当たり5.4日、九州地方において0.3日の変化を報告しており、地域によってその傾向は異なる。そこで、ウメの開花日の変化における地域的傾向を調べてみた（清水・大政，2010）。

多変量解析の一つである主成分分析を利用しており、34地点における約50年間（1961年～2007年）の開花日のデータから、共通性の高い、複数の変化傾向が主成分として導出される。そして導出された主成分と各観測点の開

花日データの相関係数の数値（因子負荷量）によって、変化傾向の地域的な違いがわかる。導出した主成分のうち、第1主成分と第2主成分の主成分得点を図2に示す。第1主成分は34地点における最も共通的な開花日の変化傾向を示す。右下がりの回帰直線（点線）に示すとおり、開花日は早くなっている。なお、1984年と1986年の2年分は開花日が全国的に遅れたことを表し、春の気温（1月～4月）が特に低かったことに起因する。一方、第2主成分の変化（図2b）では1980年代後半から上昇傾向が見られる。この傾向は、図3に示す、第2主成分の因子負荷量のうち、正の値を示す観測点（鹿児島など）において開花日が遅れていることを表し、また負の値を示す観測点（札幌など）において開花日の早まりが顕著であることを表す。観測点の緯度と因子負荷量の対応関係からわかることは、北に向かうにつれて因子負荷量の値が小さくなる、ということだ

あり、これは国内における気温の高低の影響を受け、開花日の変化傾向が異なることを示す。温暖な地域での開花日の遅れは、花芽の休眠解除の遅れに関わると考えられ、たとえば、1987年～2007年に開花日の遅れが確認されている鹿児島において、開花日と花芽の低温感応期間（11月下旬～12月中旬）の平均気温との間には、統計的に有意な対応関係があり、温暖な冬が開花日を早めるのではなく、反対に開花日を遅らせる可能性を示している。前述のとおり、日本では、春の植物季節の早まり以上に、秋の植物季節の遅れのほうが変化の程度が大きく、ヨーロッパにおける傾向とは異なる。湿潤な日本と比較して、ヨーロッパでの分析結果には乾燥地域のデータが含まれており、降水量の影響が大きいことが、傾向が異なることの一つとして挙げられている (Ogawa-Onishi & Berry, 2013)。併せて、ヒートアイランド現象による冬季の温暖な条件が、植物の休眠解除の遅れに関わる春の植物季節の遅れ、そして植物の成長期間の延伸による秋の植物季節の遅れを引き起こし、植物季節の変化傾向の解析結果に部分的な影響を与えている可能性もある。

おわりに

ここ数十年において、地球温暖化やヒートアイランド現象による地域的な温暖化に必ずや生物季節には系統的な変化が見られる。短い観測期間におけるデータでは、生物季節の変化に気づきにくい。私達がそれらの変化に気づくためには、継続的な観測データをもとに、過去の状況と比較することが必要である。気象官署のうち、^{そっこうじょ}測候所においては1996年以後の自動観測システムの計画的整備とともに、無人化が進められており、目視による観測と判断が必要となる生物季節の観測は廃止されつつある。一方で、環境省は「いきものみつけ」と題して、WEBを利用し、生物季節の情報も含め、広く、生物の情報を収集し公表している。観測方法など、過去に観測されたデータとの整合性を確保しながら、さまざまな生物季節や気象データを統合し利用することで、今後も生物季節の変化に注視するとともに、私達は生物季節の変化から、気象や気候の変化を再認識する必要がある。

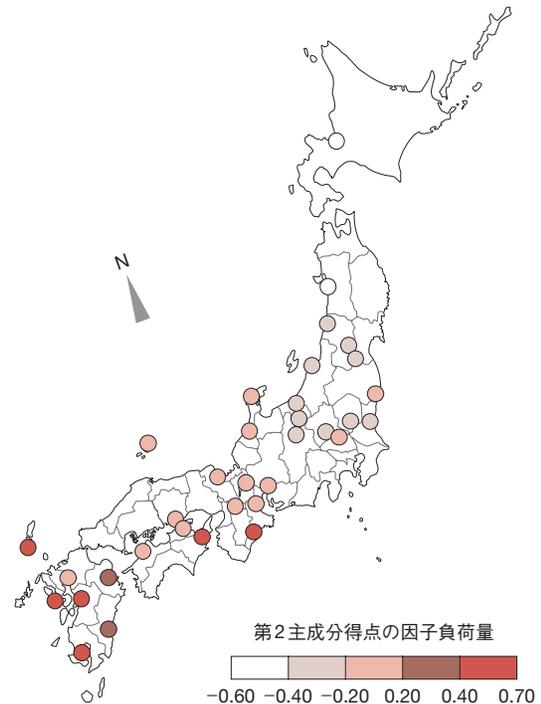


図3 ウメの開花日の変化に関する第2主成分得点の因子負荷量

因子負荷量が+1.0に近い場合、その観測点での変化傾向が第2主成分得点の変化傾向（図2b）と似ていることを示し、反対に-1.0に近い場合は逆の変化傾向に似ていることを表す。因子負荷量の値は、九州地方や尾鷲など、温暖な地域において大きく、寒冷な地域では小さい

（清水・大政，2010. の図から一部抜粋・改変）

[文 献]

- Aono, Y. & Kazui, K. (2008) *Int. J. Climatol.*, **28**, 905–914.
- Doi, H. (2012) *Int. J. Biometeorol.*, **56**, 895–902.
- IPCC. (2007) *Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Matsumoto, K., Ohta, T., Irasawa, M. & Nakamura, T. (2003) *Glob. Change Biol.*, **9**, 1634–1642.
- Nasu, A., Shimizu, Y. & Omasa, K. (2005) *J. Agric. Meteorol.*, **60**, 1227–1229.
- Ogawa-Onishi, Y. & Berry, P. M. (2013) *Biol. Conserv.*, **157**, 361–371.
- Parmesan, C. & Yohe, G. A. (2003) *Nature*, **421**, 37–42.
- Reyer, C. P. O., Leuzinger, S., Rammig, A., Wolf, A., Bartholomeus, R. P. et al. (2013) *Glob. Change Biol.*, **19**, 75–89.
- 環境省. (2008) 気候変動への賢い適応：地球温暖化影響・適応研究委員会報告書。
- 気象庁. (1985) 生物季節観測指針 第3版。
- 気象庁. (2013) 気候変動監視レポート 2012。
- 気象協会. (1953) 生物季節観測指針。
- 清水庸／大政謙次. (2010) 農業気象, **66**, 279–288.
- 中静透. (2013) 生物の科学 遺伝, **67**, 606–609.
- 樋口広芳／小池重人／繁田真由美. (2009) 地球環境, **14**, 189–198.