

長期気候変動指標としての生物季節データの解析 ～セイヨウトチノキの開葉日記録を用いて～

ANALYSIS OF THE PHENOLOGICAL DATA AS AN INDEX OF LONG-TERM CLIMATIC CHANGES, USING THE HISTORICAL RECORDS OF THE GERMINATION DATE OF HORSE CHESTNUT.

福地隆史* ・ 市川新*
Takashi FUKUCHI, Arata ICHIKAWA

ABSTRACT; Many people have warned the global warming and proposed several countermeasures to solve this problem. However, we don't have strict determination of this climatic changes. In this research, the authors analyzed the germination data of horse chestnut which had been recorded in Geneva from 1808 up to the present. The germination in recent years set in always earlier than before. Phenological data was expected to show distinct changes of the climate. Firstly they made the phenological mechanism clear by using the temperature data. And secondly they specified the factors in this mechanism which had changed during this recording period, and investigated the usefulness of phenological data as an index of long-term climatic changes.

Usually, germination was supposed to occur when the accumulated value of daily temperatures reached a constant value. In this analysis, on the law of Arrhenius they transformed the daily temperature into the number of days, and used it for estimating of germination date. But the precision was not so good. Because it was difficult to apply this technique to the long-term data. And then they analyzed the temperature within the fixed period before germination, and found that about 30 days before the germination influenced it greatly.

KEYWORDS; Global Warming, Phenology, Long-term Climate, Horse chestnut.

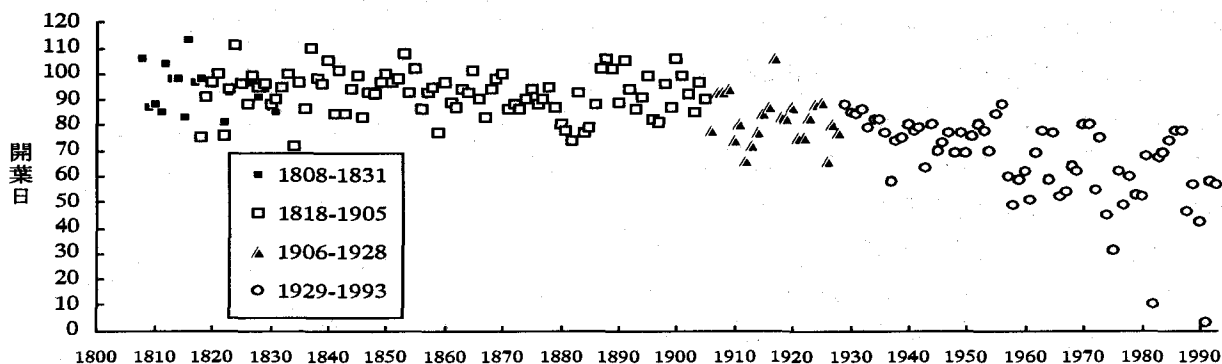
1. はじめに

地球温暖化の警鐘が鳴らされてその予測、及び対応策が検討されている。しかし、過去の観測値の何をもって温暖化と判定するか、あるいは温暖化した環境に生物がどう反応するかなど、実際多くの論点が明確にされていない状態である。そこで本研究では、気候変動の影響を受けている生物季節データを分析し、それが地球温暖化などの長期気候変動の指標となりうるかを探ることにした。植物の開葉という一年の特定時期に着目することで、温暖化などの微妙な気候変動が抽出できるのではないかと考えている。

生物季節の決定に係わるものは一時点の気象データだけではない。春が近づくと葉芽の生長が始まるが、休眠中の芽が再活動するには春化の時期が必要である。春化とは頂芽が冬の低温1～10℃の環境を経験することであり、これが不十分だと春になっても休眠が覚めずなかなか葉が成長してこない。この様に開葉という生物季節には比較的長期に渡る気象要素が効いており、その分析は多次元の気象要素を対象にしていることに他ならない。この種の生物季節データは数多く存在し、気象観測よりも長期に渡り連続観測されていることがある。また観測指針の変更にあわせたデータの補正を行う必要も少ない。そして何よりも、気候変動に基づく生物の生態変化そのものを示している点で、地球環境の将来像の把握に役立つと思われる。今回はまず、ジュネーブにあるセイヨウトチノキ開葉日データと、日気温及びそれを変換した指数との対比を行った。

* 東京大学工学部都市工学科 Department of Urban Engineering, The University of Tokyo

図1 セイヨウトチノキの開葉日の経年変化(1808-1993)(開葉日は元日から計算)



2. 使用データ

2. 1 セイヨウトチノキの開葉日データ

この観測データは、スイス、ジュネーブのTreille 通りのセイヨウトチノキ並木を対象に約180年間観測された開葉日である。州のSAUTIERという職についた人が歴代その観測を行っており、1818年から現在まで特定個体の開葉日記録が続けられている。しかしその間二度(1905年、1928年)枯死したために観察個体の変更が行われた。またこれとは別に、同じ並木の個体を対象にした記録も1808年から1831年まで存在する。

セイヨウトチノキ *Aesculus hippocastanum* L.はトチノキ科の植物で、日本ではマロニエ、ウマグリとも呼ばれている。地中海沿岸地方を原産地とし、丈夫で樹齢が長いという性質を持ち長期観測に向いている。また耐暑性、耐寒性があるため、乾燥や凍結による生理的ストレスは小さいと思われる。

図1はこの期間の開葉日を示すもので、縦軸は元日から開葉日までの日数を表している。1818年から1831年までのデータが重複しているが、1818年の23日違いのデータを除いてはほぼ近い値を示している。これにより開葉日の個体差は無視し、枯死による観測個体の変更に係わらずに1808年から今日までの開葉日データを連続したものとして扱うことができる。図2は開葉日の5年、11年の移動平均を示したものである。1900年辺りから開葉日が早まる傾向を見せている。

2. 2 ジュネーブの気象官署データ

気象庁図書館において、ジュネーブの1885年から1978年までの気温、降水量、気圧などの主要観測項目の日平均データと、1768年から1980年までの同様の月平均データを入手した。ただ観測所が1962年に郊外のジュネーブ空港内(Geneva-Cointrin)に移転しているため、本研究においては1961年までのデータを用いる。

図2 開葉日移動平均の経年変化

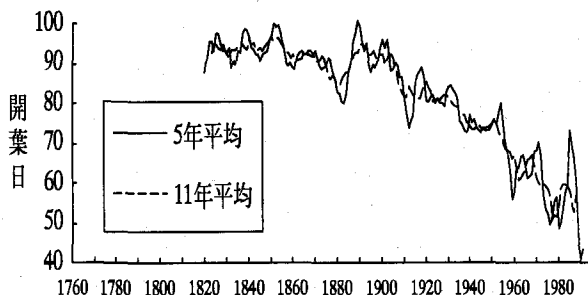
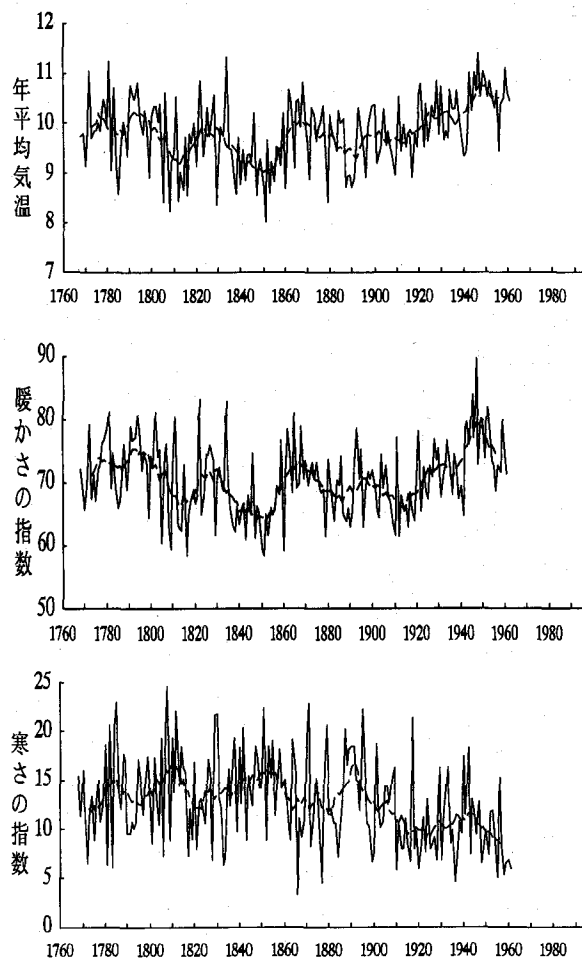


図3 年平均気温(℃), 暖かさの指数, 寒さの指数の経年変化(1768-1961)(点線は11年移動平均)



3. ジュネーブの気温の解析

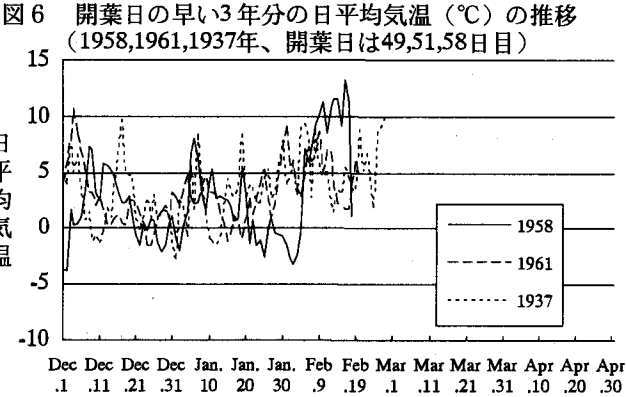
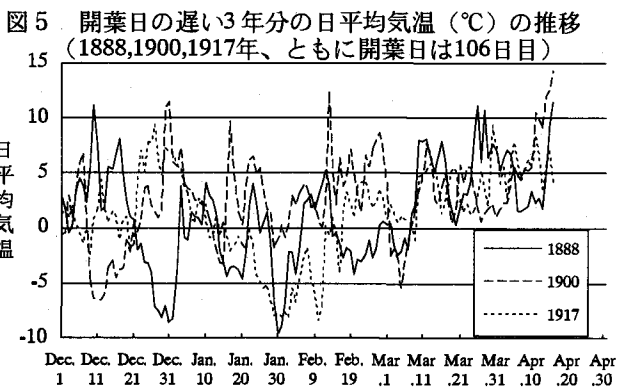
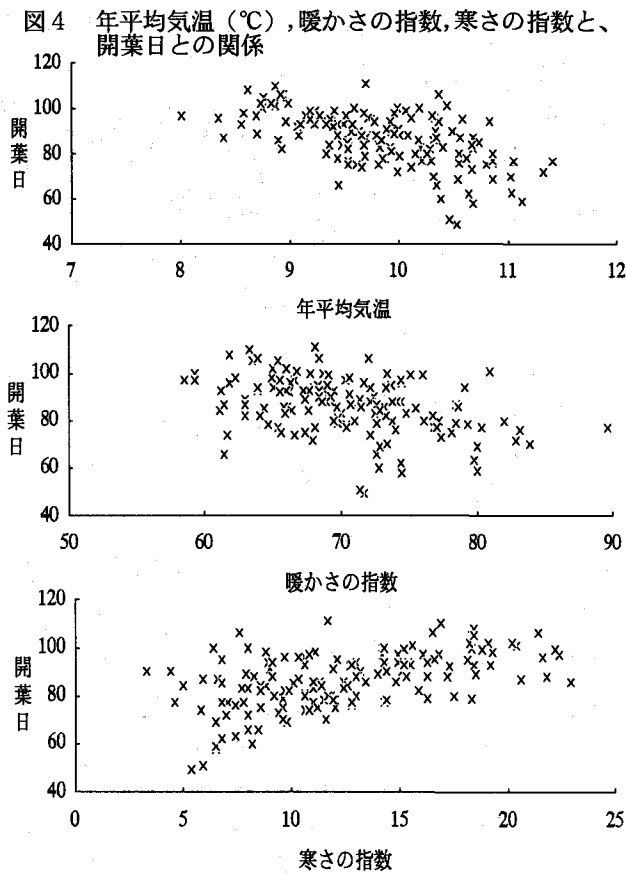
まず初めに、月平均気温データを用いて1768年から1961年までの気候変動を調べた。長期気候変動を調べる際には年平均気温が一般に多く用いられる。しかし温暖化による変化が一年を通して均等に生じるとは考えられず、むしろ部分的な期間を対象にする方がその傾向を明らかにできる可能性が高い。そこで図3に年平均気温と併せて、暖かさ、寒さの指数の経年変化を示した。暖かさの指数とは、月平均気温が5℃以上の月に対してその値から5を引いた値の年積算値で、寒さの指数とは逆に、月平均気温が5℃以下の月に対して5からその値を引いた値の年積算値である。また年変動を排除するために、11年の移動平均を併記した。

これによると、年平均気温は19世紀後半から高まる傾向が見られる。これは開葉日が早まる傾向と一致する。暖かさの指数もやはり1900年辺りから上昇傾向を示している。また寒さの指数も同様に1900年辺りからやや下降しており、冬期の温暖化を意味している。図4は縦軸に開葉日を、横軸に年平均気温、暖かさの指数、寒さの指数をとったものである。年平均気温、暖かさの指数が低いと開葉は遅れ、逆に高いと開葉は早まるという傾向が、一方寒さの指数ではその逆の傾向が示されている。開葉日とこれらの指数との対応の傾向はこの様に示されたが、明瞭な相関関係は見られなかった。これらの指数は長期的な経年分析ではある傾向を示しうが、開葉日など特定年の数値と直接に結びつけることには適していない様である。

次に開葉日が早まる直接的な原因を探るために、開葉日が特異な値を示す年の日平均気温を調べた。図5、6はそれぞれ1885年から1961年の間で開葉日の遅い3年分、早い3年分の日気温の推移を示したものである。同じ月日の気温は両者全く異なっており、開葉の遅い図5の方が冬の気温は低い。しかし見方を変えて開葉日付近だけに注目すると、それ程違いは見られない。このことから、開葉日付近の温度によって開葉が進められると推定される。つまり、ある適当な気温が続くと開葉することを示していると思われる。

4. 温度変換日数の計算法

開葉までのプロセスには温度条件が効いている。それと開葉日とを対応させる方法として、開葉に影響する期間の温度を積算することが考えられる。ただ温度条件に対し植物活性が線形的に反応することはないので、積算の際には植物活性の限界温度を基点にするなどの工夫がなされる。ここでは日平均気温を指数関数的に変



換した温度変換日数を用いることにした。温度変換日数とは、金野・杉原（1986）が生物活性からみた温度の指標として考案したもので、Arrheniusの法則から計算される。

Arrheniusの法則とは、生物活性の変化を反応速度論的に捉えたものである。化学反応や酵素反応を扱う分野ではよく用いるが、高等生物を扱う分野での適用は少なかった。ある*i*日における温度条件*T_i*と生物反応速度*k_i*との関係は(1)式で表現される。

温度変換日数とは、ある*i*日での温度条件(*T_i*)で一日分の反応量が、特定の標準温度(*T_s*)の条件で何日分(*t_s*)に相当するかを(2)式の様に表したもので、(1),(2)式から*t_s*は(3)式の様に表現される。

特定の温度に対する温度変換日数は温度特性値*E_a*と標準温度*T_s*によって変化する。図7は、*T_s*を15℃にして*E_a*を80から200KJ mol⁻¹まで変化させた時の温度変換日数の変化を示したもののだが、標準温度*T_s*で1となり、低温になると指数関数的に値は低下して0に収束する。

5. 温度変換日数法による開業日の推定

5. 1 理論とその適用法

温度変換日数法は、小元・青野（1989）がソメイヨシノの開花日推定を目的に考案したものである。気象庁産業気象課も1991年から、この手法によるサクラの開花予想を参考資料として各管区気象台に送付している。この方法は、温度変換日数を積算して一定の積算値に達した日を開花日と推定するものである。本研究の対象は開業だがこの手法を適用する。ここで用いられる以下の変数の値や、開業に必要となる積算値は、過去の日平均気温データと植物季節データから決定される。

標準温度*T_s*：植物の開業時期の気温とほぼ同じか、やや高めに設定する。今回は288.2K（15℃）に固定した。

温度特性値*E_a*：試行錯誤的に値を与える。

起算日*D_s*：温度変換日数の積算を開始する日で、気温が植物の開業に影響し始める時期に相当する。ここではすべての年に対して同一の日を想定する。

仮定した*E_a*を使って以上の定義により日平均気温から温度変換日数を求め、仮定した起算日*D_s*から開業日まで積算する。そして*j*年の積算日数（*DTS_j*）の平均値を積算温度変換日数（*DTS*）とする。次に温度変換日数を起算日*D_s*から積算していき、*DTS*に達した日をその年の推定開業日とする。この推定開業日と実測の開業日の差が誤差になるが、誤差の指標として推定開業日と実測開業日との平均二乗誤差の平方根を用いた。この推定誤差の最も小さい*E_a*と*D_s*の組み合わせを求める。

本データには温度特性値*E_a*を70～200KJ mol⁻¹の範囲で10KJ mol⁻¹間隔に設定し、起算日*D_s*も12月1日から80日間、1日おきに設定した。それぞれの*E_a*、*D_s*の組み合わせにおける推定誤差を示したのが図8である。

$$k_i = A \exp(-E_a / RT_i) \quad (1)$$

k_i ; *i*日の反応速度 (day⁻¹)

A ; 頻度因子 (定数)

E_a ; 温度特性値 (J mol⁻¹)

R ; モル気体定数 (8,314 JK⁻¹ mol⁻¹)

T_i ; *i*日の温度条件 (K)

$$k_i \cdot 1 = k_s \cdot t_s \quad (2)$$

但し $k_s = A \exp(-E_a / RT_s)$

$$\therefore t_s = \exp[E_a (T_i - T_s) / RT_i T_s] \quad (3)$$

図7 *E_a*に対する温度変換日数の変化 (*E_a*は80～200KJmol⁻¹)

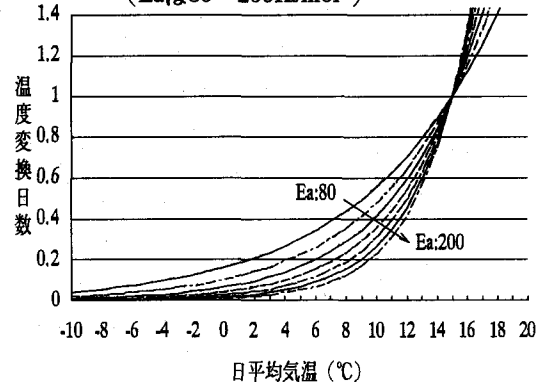
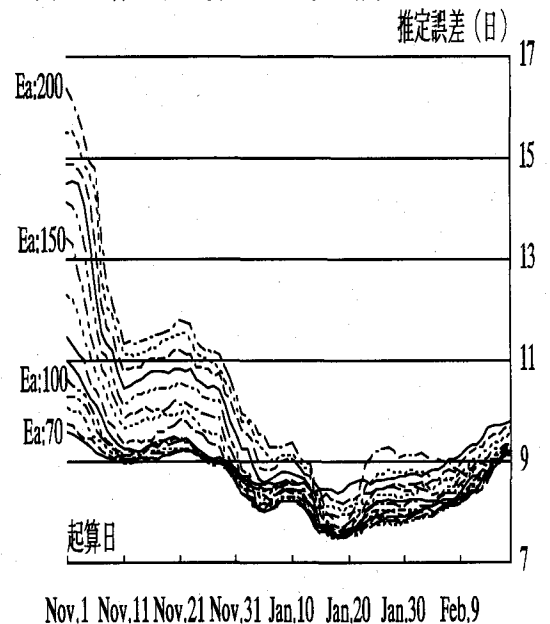


図8 各*E_a*、起算日における推定誤差



5. 2 結果

起算日を12月にとすると、冬の低温期以前の温度が積算値に大きく影響するため誤差が大きくなる。Eaがおおよそ $130 \sim 160 \text{ KJ mol}^{-1}$ の場合、起算日が1月後半から2月前半にかけてはそれほど推定誤差に変化は見られない。この時期の気温が低く温度変換日数がほとんど0に等しいために、起算日を少しずらしただけでは積算値に変化が起こらないからである。また、起算日が12月から1月15日辺りまではEaが高いほど誤差が大きいが、1月15日以降その順番に逆転が起こりEaが小さいほど誤差が大きくなっている。すべてのEaにおいて小さな誤差を示した49日(1月18日)を起算日に選び、その時7.5日という最小の誤差を与えた 140 KJ mol^{-1} をEaに設定して、各年の推定開業日を計算した。実測開業日も併せて示したのが図9である。対象年の前半では実測開業日よりも早めに開業日が推定されており、また後半では逆に遅めに推定されている。

5. 3 考察

図8から、温度変換日数法を用いた開業日推定では推定誤差が最低7~8日になることが明らかになった。この誤差は、小元・青野(1989)がソメイヨシノを推定誤差3日程度、青野・小元(1992)がフジ、ヤマツツジを4~5日程度で開花予測したのに比べてかなり精度が落ちる。これらの研究では対象年数が30年程度で、対象期間を通じての気象条件の変化は小さいといえる。本研究で対象とするデータは80年分以上であり、その間に地球温暖化、都市化など気象条件に変化が起きているため、大きな誤差が生じるにいたったと思われる。

即ちこの手法が誤差を生み出した原因は、DTSを単純に全対象期間のDTSjの平均と定義したことにある。図10は各年のDTSjとその平均値DTS、及び実測開業日と推定開業日との差を示している。DTSj、DTSの定義から、実測開業日はDTSjに、推定開業日はDTSに積算温度変換日数が達した日である。それ故に、DTSjとDTSとの差が大きくなると開業日の推定誤差も大きくなってしまふ。結局、開業日が大きく変動しているに係わらずすべての調査年に対して起算日が固定されているため、DTSjの変動も大きくなっていると言える。この図10は年々低くなるDTSjを示している。積算値が小さくても開業し始めるようになっているように見えるが、実は年々開業日が早まり積算する期間が短くなっていることを示すものである。

6. 温度変換日数DTSjの分析

長期に渡る開業日データに対して、起算日を固定することに問題が生じた。そこで次に開業日を基準としてそれ以前の気象条件を捉え、そしてその経年比較を行った。

温度変換日数法はある一定の気象条件に達すると開業するという前提に立つものであった。この原則は、開業日を基準にすると、開業日前の気象条件がある一定値に達すると開業するということになる。すべての年のデータに対してこの値を固定しうる条件、及びその値を求めた。積算温度変換日数は積算する日数やEaにより異なる。そこでEaを $80, 120, 160, 200 \text{ KJ mol}^{-1}$ の4通り設定し、それぞれ80日間の積算を行った。図11がその結果で、縦軸には開業日からの積算温度変換日数を10日単位で示した。

図7が示すように同じ温度でもEaが小さいほど温度変換日数が大きいため、一定の日数での積算値は大きくなる。そしてEaが小さいほど積算値の年変動も小さくなる。また長期間積算すると低温期以前の温度が効いてきて、積算値は大きく年変動する傾向にある。どのEaに対しても30日以上積算すると変動が大きくなるが、そ

図9 温度変換日数法による開業日の推定

(Ea: 140 KJ mol^{-1} , Ds: 49日, 開業日は12月1日から計算)

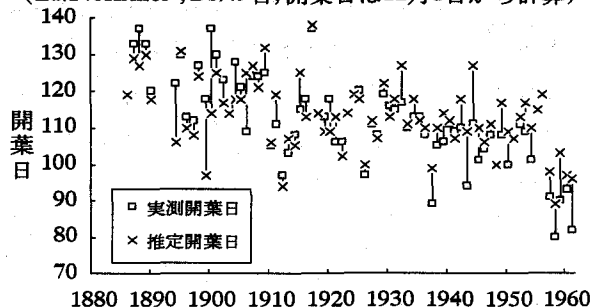
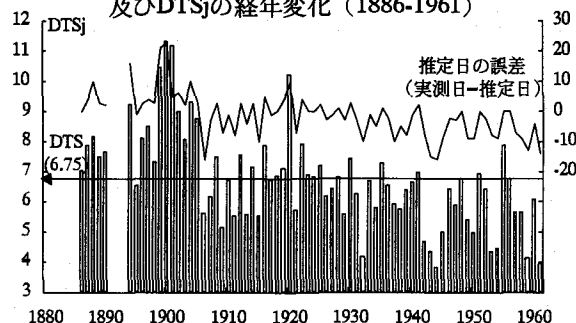


図10 推定開業日と実測開業日との差、及びDTSjの経年変化(1886-1961)



れ以下の日数での積算値は比較的経年的に安定しているように見える。しかし開葉までの10~20日分に限ってみると、積算値はある程度の大きさを持つが年変動も大きくなっている。これはEaが大きいほど顕著である。開葉に必要な気象条件、積算温度変換日数はEaが小さいほど決定しやすく、また30日分位の積算値が安定していることから、この期間の気温が開葉に効いていると言える。

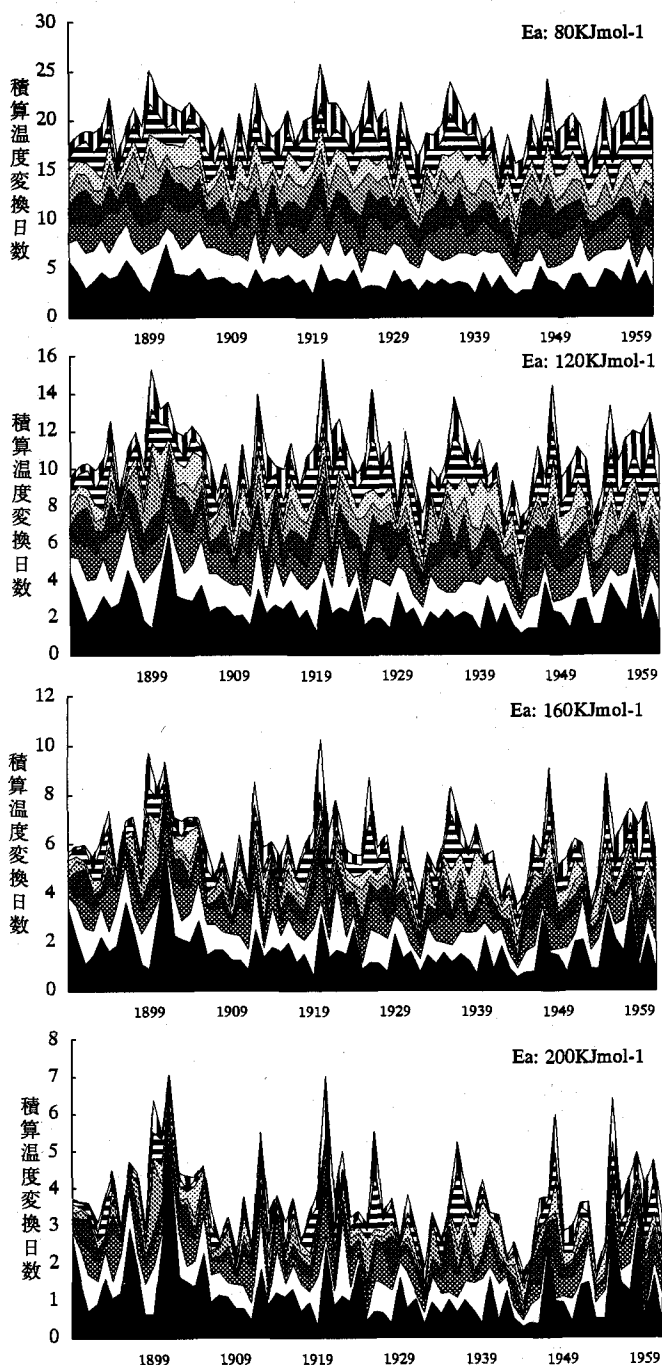
5. で設定した起算日1月18日は開葉日からおよそ50~80日前にあたり、ここで求めた30日に比べると長く、これが誤差の原因の一つと考えられる。

7. 結果のまとめ、及び今後の課題

本研究では日平均気温データを用いて開葉日データの解析を行った。その方法として、温度変換日数を使う開葉日推定法を用いて、開葉の決定因子の数量的把握を試みた。その結果、誤差を最小とするDs:49日、Ea:140KJmol⁻¹という値を得たが、その誤差は大きかった。これは80年に渡る全期間を同一条件で分析した点に問題があり、地球温暖化の影響を考慮する必要が示された。そのため開葉日に視点をおいて、その前の気温条件にこの温度変換日数を適用して、開葉の決定因子を明らかにした。その結果、開葉日前30日位の気温が大きく効いていて、それ以上の日数を考えると、積算温度変換日数が一定になる日数が大きく年変動することが分かった。また、Eaを小さくする方がこの因子を決定しやすいことも分かった。今後、20~30日分の温度変換日数をすべての時期で積算し、それが特定値に達した時期から推定された開葉日を実測値と比較することで、この手法の妥当性を検証していく予定である。

これらの手法に改善を加え、開葉という生物季節機構を解明することで開葉日の推定精度を高め、そしてこの過程の中で、気候変動指標としての開葉日記録の利用価値を探ることに主眼を置いていきたい。明瞭に早まる傾向を示す開葉日を、気温など他の指標と組み合わせることで、気候の長期変動を明らかにできると考えていた。しかしここで、温度変換日数法のように全データを総合的に扱う方針から一度離れて、温暖化の影響を受けるデータを個別に検証する必要性も感じている。さらにこれ以外の長期間に渡る自然現象記録とも対比させていきたい。

図1 1 開葉日から逆算した積算温度変換日数
(図は上からEa=80,120,160,200KJmol⁻¹、
下層から10,20,30,40,50,60,70,80日分の積算値)



参考文献

- 1) P. Stoller (1984) : La Première Feuille du Marronnier de la Treille 2nd ed. Republique et Canton de Geneve.
- 2) 青野靖之・小元敬男 (1992) : ヤマツツジ・フジ・アジサイの開花日の推定. 農業気象, 47 (4) 233-240.
- 3) 小元敬男・青野靖之 (1989) : 速度論的手法によるソメイヨシノの開花日の推定. 農業気象, 45 (1) 25-31.
- 4) 金野隆光・杉原進 (1986) : 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. 農環研報, 1, 51-68.