

各種温度評価手法を統一するフレームワーク

水野 直美

(平成 22 年 10 月 1 日受理)

A New Framework for Unifying Several Methods
of Temperature Evaluation

Naomi Mizuno

I 緒 言

温度による植物の影響を評価する方法として、積算温度 (Réaumur (1735), 江幡 (1990)), 応答関数 (水野ら (1981)), 温度変換日数 (DTS, 金野ら (1986)), 発育速度・発育ステージ (DVR・DVS, de Witら (1970), 堀江ら (1984)), 発育指数 (DVI, 堀江ら (1987)), ノンパラメトリック法 (竹澤ら (1989)) などが利用されてきた。しかしながら、何れにおいても、解析原理を説明した初出論文、および、その後の様々な植物に対する応用例で、手法間の相互比較はあまりされてこなかった。その結果、手法のユーザは、自身の問題を解決しようとする際に、どういう方式でデータ解析を行うべきかについて判断に困り、既出の類似例をそのまま踏襲してきたようである。今回、これらの解析手法は、すべて同じ単一のフレームワークのものとして明示的に考えることで、これらの問題を克服できると気付いた。これまでに出版された報告では、もっぱら手法の操作的手続きが説明されており、このような解析法の抽象構造については指摘されたことはなかった。これにより、各手法が鳥瞰できるようになったので、新たに解析をする場合に、どのような手法を用いるべきかなどが明瞭となった。なお、本稿では温度応答関数が時間的に不変であるとする場合のみを扱い、DIFのようなそうではない現象に関しては考慮しない。

II 材料および方法

これまでに、提案、利用されてきた上記手法について、比較検討をした。文献により記号や関数の表現がまちまちなので、本稿では、可能な限り次のように統一しようとした。説明が必要なものについては、それぞれの提示個所で行う。時間： t 、イベントの発生時間： t^* 、時間分解能： Δt 、温度： θ ないし $\theta(t)$ 、出現した温度の範囲： Θ 、温度スペクトル： $A(\theta)$ 、発育零点： θ_0 (低温側 θ_{0L} 、高温側 θ_{0H})、最適温度： θ_m 、好適温度幅 (半値幅)： θ_w 、生長速度： $g(\theta)$ 、最大生長速度： g_m 、生長速度の温度依存性 (\sim 傾き) に関連するパラメータ： ρ 、一般的な関数： f 、温度評価値の積分 (線形な生長量)： G ないし $G(t)$ 、あるイベント発生時の値： $G^*(=G(t^*))$ 、実際の生長量 (非線形)： H 。

III 結 果

解析手法の検討の際に、これらの温度評価手法を統一するフレームワークを見出した。得られたフレームワークを図-1に示す。これまでの各種温度評価手法の説明では、この様な形でなされることはなかったことから分かるように、これ以外の説明や解析手法もあり得るが、少なくとも、この図に示された方式によっても説明可能であるということの意味する。

生長データは、例えば、草丈の生長を経時的に観察し

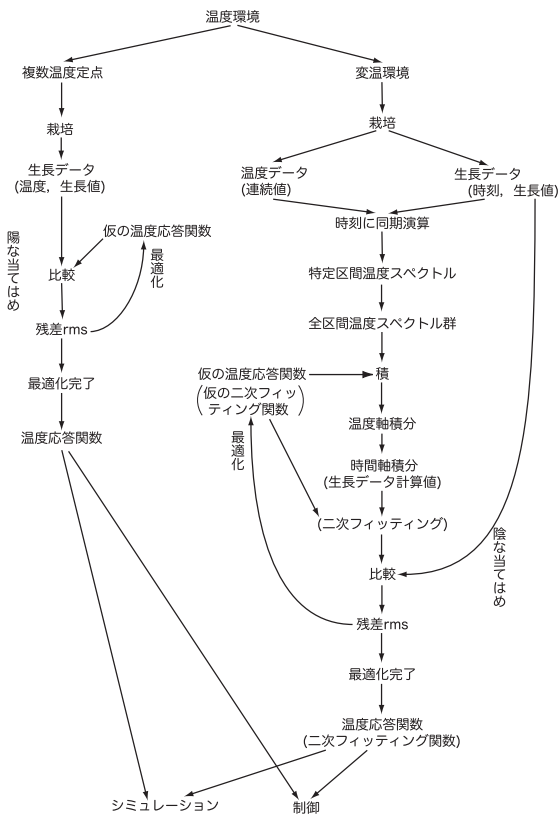


図-1 温度評価手法を統一するフレームワーク

た様なもの以外に、開花日、収穫日のようなイベントや、その他温度に影響を受ける現象を時間と関連づけたものが該当する。

温度は、実際にどのような形で計測されるにせよ、観察対象に連続的に作用している。本質的に連続量であるが、その後の計算処理がアナログコンピュータで実施されるのではなく、サンプリングのタイミングに関連した離散量として記録される。

次に、こういった温度履歴を生長データと関連付けるために、「温度スペクトル」を考える（水野ら（1979）、水野ら（1982））。具体的には、横軸を温度目盛とし、縦軸をある温度における滞在時間としたヒストグラムであるが、一般のヒストグラムでは横軸の数値に均質性が想定できるのに対して、温度の作用は非均質なので、直交性のある電磁波のスペクトルや、隣接項目間の関連が低かったり、無かったりする抗菌スペクトル等の用語法に倣い「スペクトル」と表現した。これは、生長データのイベント間の温度履歴情報から、時刻の情報を消去し温度値とその出現頻度情報に集約したものである。ある時点で計測された生長データは、それ以前の計測時からその時点までの温度の影響により、構成されると考えられるので、ある生長データには対応する温度スペクトルを

伴うことになる。草丈の計測のように、実験期間中に10個以上の生長データが得られることもあるが、実験の種類によっては、開花期のように1回の試行で1個のデータしか得られないこともある。データ数が少ないと安定した推定が得られないので、このような場合は、年を変える、場所を変える、施設を使うなど、同一ではない温度環境での試行を可能な限り行い、データ点数を増加させる。この様にして、出来るだけ多くの生長データとそれに対応する温度スペクトルが準備されるものとする。記号としては $A(\theta)$ を用いる。

ここで、温度応答関数を考える。想定される温度域の温度に植物がどのようにに反応するかを表現するものである。典型的には、ファイトトロンやインキュベータを使って色々な一定温度で植物を育て、その応答値から温度が植物に対してどのように影響するかをグラフ化し、傾向線を引いたり、関数当てはめをすることなどはこれまでも良く行われてきた（陽な推定）。大局的に見れば、温度は高すぎても、低すぎても良くなく、その中間で最も応答程度が大きいことが普通であり、種々の鐘状曲線が利用されるが、特に自然状態で短期間の場合には、それほど温度範囲が広くないことも多く、その場合、直線や単調曲線で近似しても問題が出ないのが普通なのでこれらも多く利用される。また、通常関数ではない、ニューラルネットやその他の機械学習システムも利用できる。記号として、 $g(\theta)$ を用いる。

いずれにせよ、何らかの温度応答関数を用意し、温度スペクトルとの積をとる。これを温度軸方向に積分すれば、ある計測時点での生長データの計算値が得られる。生長データが経時的なものであれば、この計算を経時的に行うことで、実際に取得された生長データに対応する計算上の経時生長データ $G(t) = \int_{\theta} g(\theta) A_t(\theta) d\theta$ が得られる。開花期など経時的でないデータの場合は、実測値と計算値の組が多数作成されることになる。但し、このような計算値が実際の生長データと一致しない場合もある。この場合、更に二次的なフィッティングを行う。次にこういった計算値とそれに対応する実測値との差の二乗平均平方根（残差）を取り、これを最小化するように、応答関数を調節する。これを繰り返して、残差の最小化が達成できたと判断された時の応答関数が求めるものである（陰な推定）。方式により、繰り返しの最小化操作が不要なこともある。

全体像としては、以上であるが、解析に関わる具体的な問題について以下に補足を行う。

1 解析対象, 目的

これまでの解析例では, 応答関数自体やそのパラメータ値を明らかにしようとするもの, 単発的なイベントを説明しようとするものと, 経過を説明しようとするものに大別できる. 応答関数やパラメータ値を明らかにしようとするものとしては, 水野 (1981), 単発的なイベントとしては, 出穂日, 登熟日 (堀江 (1984), 堀江ら (1986)) など, 経過としては, 果実生長 (小野ら (1989)), 新芽の生長 (水野 (2009)) などがある.

2 陽な推定と陰な推定

温度定点を複数設定し, それぞれの条件における生長の記録から, 温度応答関数の形状を推定することは, 古くから行われてきた. データが得られれば, 即座に関数の概形は分かるし, 明示的に関数を決定できるので, これを陽な推定と呼ぶ. しかし, 変温環境における生長記録と温度記録から, 温度応答関数を推定することは全く異なるプロセスである. こちらは, 生長データ, 温度データ, 温度スペクトルを図示しても, 関数の形状が見えるわけではないので, 陰な推定と呼ぶ. 圃場のような完全な変動環境の他, 昼夜温が異なる設定のファイトトロンや (水野ら (1987)), 一部の時間のみ定温環境に収容した場合 (水野 (2010)b) にも陰な推定は有効である.

3 温度応答関数の例

温度値に対して, 生長速度を返す関数である. 考慮する温度値に時間的な幅がある場合, つまり Δt が比較的大きいこともあり, この場合は, その期間の平均値や積分値であったりする. 様々な関数が利用されてきたが, 基本的に「生長」は非負過程なので, 関数値が負の場合には 0 と見なすことがほとんどである. また, 日射量なども取り入れた応答関数が作成されていることもあるが, 本稿では温度以外の要因については, 定数として扱った.

a 単調関数

考慮すべき温度範囲が狭い場合に, 単調増加関数が主に利用される.

1) 単純積算温度. これは, 一次関数を応答関数として利用していることになる. 温度応答関数は大局的には鐘状曲線であるが, 温度範囲が狭く, かつ負にならない場合にはほぼ直線と見なして支障ない場合が多いと考えられる. 関数としては, $g(\theta) = \theta$ となる. 使われる状況により, 次項も含め, デグリーデイ, デグリーアワー, ヒートユニット, チルユニット等と呼ばれることがある. Réaumur (1735), 鮫島ら (1987), 川方ら (1989).

2) 有効積算温度. 積算温度でも, それ以下の温度は生長に寄与しないという, いわゆる発育零点 (生育零点 = θ_0 , 但しほとんどが θ_{0L}) を想定し, 温度値がそれより低い場合を 0 と見なし, それ以上の場合には実際の温度から発育零点温度 (θ_{0L}) を差し引いたものを加算するという考え方がある. 応答関数として見ると, これは屈曲点 1 個の折れ線である. 屈曲点が複数のものも想定できるが, これは c-2) 区分多項式で扱う. これらは, いずれも最も単純な区分関数である. 関数としては, $g(\theta) = \theta - \theta_{0L} : \theta > \theta_{0L}, g(\theta) = 0 : \theta \leq \theta_{0L}$. 江幡 (1990).

3) $1 - e^{-x}$ 型. 単分子反応方程式. x が 0 の時 0 で, x の増加に伴い 1 に漸近する. 実用的には, 発育零点 (θ_{0L}) を想定し, 傾斜を支配するパラメータ ρ により上限 (g_m) に漸近する関数として使われる. $g(\theta) = g_m (1 - e^{\rho(\theta - \theta_{0L})}) : \theta > \theta_{0L}, g(\theta) = 0 : \theta \leq \theta_{0L}$. 堀江 (1984), 川方ら (1989).

4) $\frac{1}{1 + e^{-x}}$ 型. いわゆるロジスティック曲線. 自己触媒方程式. 上限 (1) と下限 (0) に漸近する関数. 上限が g_m で, 生長速度が最大生長速度の 1/2 となる温度を θ_m , その時の傾きを ρ とすれば, $g(\theta) = \frac{g_m}{1 + e^{-\frac{-4\rho(\theta - \theta_m)}{g_m}}}$ となる. 堀江ら (1986), 堀江 (1987), 川方ら (1989).

5) $e^{-\frac{1}{x}}$ 型. アレニウス則. DTS 曲線. x が正值の場合, 0 から始まって 1 に漸近する. 負値では, 0 で無限大になり, それから離れるに従い 1 に漸近する. 複数の曲線を組み合わせ, より複雑な応答を表現することも行われている. 金野ら (1986), 小野ら (1989), 金子 (1990), 小野 (1990), 石田ら (1994), 菅原ら (1999).

6) その他. 関数の定義域全体で単調であるものや, 部分的に単調と見なせる関数は多いが, 以上のもの以外で植物において一般的に使われるような関数は見出せなかった.

b 鐘状関数

考慮すべき温度範囲が広い場合によく使われる. 逆に, この様な関数を使う際には, 遭遇させる温度範囲が広くないと推定精度が低下する可能性があると考えられる.

1) e^{-x^2} 型. ガウス関数. 0 で最大値をとり, 両側で 0 に漸近する. 0 を中心にして左右対称である. 広い温度域で有用である. 実用的には, 次の表現形がある.

$$g(\theta) = g_m \exp\left(\frac{-4 \ln 2 (\theta - \theta_m)^2}{\theta_w^2}\right)$$

水野ら (1981), 水野 (1982), Takeuchi ら (2009), 水野 (2010).

2) $e^{-(\ln x)^2}$ 型. 非対称ガウス関数. ガウス関数の x^2 の代わりに非対称関数を用いると非対称ガウス関数になる.

様々なものが考えられるが、 $(\ln x)^2$ を使う関数はクロマトグラフのピーク解析でよく使われる。 $x \leq 0$ では定義されず、1で最大値を取り、それ以上で0に漸近する。 実用的には、次の表現形がある。

$$g(\theta) = g_m \exp \left(- \ln 2 \left(\frac{\ln \left(1 + \frac{2 \sinh \rho (\theta - \theta_m)}{\rho} \right)}{\rho} \right)^2 \right)$$

$$g(\theta) = 0 \quad \theta_w \leq 0, \frac{2 \sinh \rho (\theta - \theta_m)}{\theta_w} \leq -1 \text{ の時}$$

水野ら (1981), 水野ら (1982), 水野 (1982), Higuchiら (1987), 水野 (1988), 米山ら (1997), 水野 (1999), 水野 (2010).

3) $\frac{x e^{-\frac{1}{x}}}{1 + e^{-\frac{1}{x}} + e^{\frac{1}{x}}}$ 型. この表現では温度応答は見えてこないが、スケージングの他、3個の指数関数を1にする定数を適宜設定することで鐘状曲線を表現できるようになる。熱力学的な根拠を持つ式の表現があり、昆虫の成長を表すのに使われるが (Schoolfeldら (1981), 池本 (2005)), パラメータ個数が多く、パラメータ間の相関も強い。植物ではあまり使われない。

4) その他. 様々な鐘状関数があり、温度応答解析に用いられるものもあるが、植物において常用的に使われるものはないようである。

c 複合型

モデルの作り方で、単調関数にも鐘状関数にもなるもの。

1) 多項式. 典型的な使用例として、温度範囲が広い場合にその中央付近に最適値があり、両側で応答値が漸減するような場合がある。鐘状曲線としての利用で、二次関数 (金子 (1990), 川方ら (2005)) や三次関数 (川方ら (2005)) が用いられることが多い。

2) 区分多項式. 区間を区切って、それぞれの区間に異なる多項式を当てはめる手法。前述のように、a-2) 有効積算温度も該当するが、これは常にこの形式でしか利用されないし、単調関数として見なせるので、そのように扱った。また、これ以外の単調関数において、多項式でなくても同様なことが可能であるが、本稿では扱わず、当該項に含める。de Witら (1970) は DVR, DVS の命名の初出例と思われるが、ここでは DVR として、8個の屈曲点を持つ折れ線を利用している。但し、先験情報としての利用のみで、関数の最適化は行われていない。階段関数は情報量の観点からは有利であり、何らかの補間法や平滑化法をモデルやパラメータとして含むことも可能である。

3) ノンパラメトリック法. モデルの構造を予め決めて

おき、実際のデータを与えると、自動的に「関数」 (= 温度に対して応答値を返すもの) が決まるものである。内部的にはパラメータを持つ関数が使われても良いが、その値は外部的には意味を持たない。様々な手法がありうるが、柔らかい関数 (族) を定義しておき、実際のデータを最もよく説明するものを使う。区分関数のように局所性の高いものが利用され、パラメトリック関数より柔軟である。内挿的な予測、推定には適しているが、最適温度などのパラメータは直接的には得られないので、温度がどの様に植物に作用しているかが見えにくい。竹澤ら (1989), 久米ら (1994)。

4) その他. 応答関数の構成法として、様々な機械学習などが考えられるが、実際の植物に対する応用例は見出せなかった。

4 二次フィッティング

あるイベントを記述、予測しようとする場合に、独立したのや、複数を経時的に発生しても、開花期と登熟期のように個々のものは独立して考えられる場合は、前述のような関数やその積分値を用いて温度応答特性を明らかにすれば良い。しかし、複数のイベントが経時的に発生して、その過程を追跡しなくてはならない場合などには、その過程を記述する関数に対して、更に二次的にフィッティングを行う必要がある。たとえば草丈の生長は通常経時的に計測されるが ($H=f(t)$)、これを温度のみとの関連で記述しようとする場合 ($H=f(G)$) が該当する。この様な時に使用されるのは、いわゆる「生長曲線」であり、様々なものがあるが、最も一般的なものは a-4) にも記したロジスティック曲線である。DTS を使ったロジスティック曲線で果実の生長を表したり (小野ら (1989), 金子 (1990), 石田ら (1994), 菅原ら (1999)), 新芽の生長を追跡 (水野 (2009)) したりすることなどが行われている。また、温度応答関数ないしその積分値を一種の環境評価値と考え、更に別の生長モデル、収量モデルなどに組み込むことも行われている (矢島 (1990), 鴨田 (1990))。

5 最適化手法

多くの場合、事前に準備した応答関数や二次フィッティング用の関数そのまま結果となることはなく、様々な手法を用いて最適化を行う。この際、手法内で反復計算により残差を小さくしていき、予め定義されていた「最小に達した状態」と判断された時の関数を結果とする。データや手法により、反復が不要の場合もあり得る。データ点が少ない場合や、パラメータ間の相関が高い場合に

は、「最適化」に失敗することもあり得る。この場合、別の手段でパラメータを推定したり、生物学的に想定できるパラメータ値の範囲で、十分小さい刻み幅を取り、悉皆計算を行い、誤差を最小化するパラメータを最適解とする。具体的な最適化手法には色々なものがあるが、手法名の明らかなものとして、シンプレックス法（堀江（1984）など）、準ニュートン法（川方ら（1985））、修正グラムシュミット法（川方ら（2005））、Excelのソルバー（菅原ら（1999））がある。

6 時間分解能 (Δt)

ほとんどの例で、1日単位でデータ処理を行っている。時間のSI単位は秒(s)なので、 $\Delta t=86,400$ sとなる。これは日平均気温をその日の温度として86,400s継続したと考えるということの意味する。月平均気温を使った計算例もあった（金野ら（1986））。de Witら（1970）のシミュレーションや高木（1990）の積算温度では1時間単位の計算であった。水野ら（1981, 1982）では時間単位の分解能データを日単位で表示している。水野（2009）では時間単位の計算であった。荒い分解能の場合、応答関数の精度が低下する可能性があるため、同一生長データに対して、時間分解能を変えた場合、推定される関数がどのようになるかについて、解析手法ごとに検討しておくことが必要と思われる。

7 応答関数推定に用いるデータ組数

1年1回の開花日データなどでは、ある年の温度データと開花日の組を複数用意して解析を行う。結果として得られる温度応答関数は、複数年の平均となる。年次や場所の効果を考慮する必要がない、つまり、温度特性が不変と考えられるなら、年次はランダムでよいし、場所も異なって良い。一方、芽の生長などでは、その計測期間の温度データと計測値の組となる。多くの場合、この組を複数年分用意し解析される。こちらも年次の不連続や場所の変遷があっても良い場合があるであろう。いずれにせよ、両者においてデータ組数が多い方が、計算時間はかかるものの安定した結果が得られる。原理的には1本の芽の生育開始～終了までの伸長データと温度データから応答関数を推定することも可能であるが、通常最適化法では良好な推定が得られないことが多く、悉皆法での実施例がある（水野（2009））。

8 起算日

開花日などのような事象を解析する際には、通常起算

日が設定され、その後の温度が開花に影響するものとされる。起算日は、最適化手法の中で、推定すべきパラメータとすれば、自動的に決定できる。温度データのみを与えて結果を推定するという、起算日のないモデリングも可能であるが、モデル中に何らかの「状態」を保持する必要があると考えられる。

9 制御への利用

評価手法が確立されれば、現象の説明が可能になると共に、任意の温度環境下におけるシミュレーションが可能となり、更に、特に施設においてはイベント発生時の制御が可能となる。Higuchiら（1987）、水野（1988）はその実施例である。

10 解析手法の相互関連

単純積算温度は通常、毎日の平均気温を注目する期間分積算して、たとえば400°C(日)になったら開花が起きるとするといった使われ方をする。例えば、1日目の平均気温 θ_{t_1} が20°Cであり、2日目の平均気温 θ_{t_2} も20°Cであったとき、単純積算温度はこれらの合計で40°C(日)となる。本フレームワークでは、 $\theta(t)$ の効果は $g(\theta)$ と $A(\theta)$ を用いて評価される。前記の例では、 $\Delta t=1$ (日)に対して、その1日の平均気温 θ が $g(\theta)$ となる。 $g(\theta_{t_1})=20$ 、 $g(\theta_{t_2})=20$ であるので、結果的に $g(20)=20$ のみを考えればよい。一方、 $A(\theta)$ は $A(20)$ のみが2で、他は0であり、結局、 $G(t)=\int_{\theta_0} g(\theta) A_t(\theta) d\theta$ となる。一方、有効積算温度を含む他のすべての手法では、「積算」を行う前に、何らかの演算操作が行われる。つまり、演算操作後の数値が積算される。本フレームワークでは、この演算操作が $g(\theta)$ である。積算後の数値に対して、積算「温度」や変換「日数」などとよばれることがあるが、本フレームワークでは特に意識せず、必要に応じて G は生長量に関連する単位に換算することができる。関数が決まった状態ではこのようになるが、未確定な場合には、通常、適当なパラメータ値の関数を使って演算処理した後、実測値との二乗誤差を最小化するような最適化が行われる。

$g(\theta)$ は生長速度 (cm/day) のような実測値と関連付けられるものを想定し、 G はその積分であるが、DVR、DVS、DVIはイベント発生時の G^* で正規化が行われた数値である。DVSは1個のイベントを想定したものであり、DVIは2個のイベントを想定していること以外は全く同じものである。1日単位で演算されることの多い積算温度、温度変換日数などでは、それぞれの1日値と、ある期間の

度、有効積算温度の次元は[温度]ではないし、時にデグリーデイ、デグリーアワーと呼ばれることがあることから類推されるように、[温度・時間]でもない。これらは実際には、適当な定数 a を使って、 $[aG]$ で表されるものである。何らかのイベントを考えれば、 G^* と同義であると言える。途中経過である $G(t)$ の意味で使われることもある。ここで例えば $\frac{aG(t)}{aG^*_{\text{開花}}}$ を考えれば、これは DVS そのものである。温度変換日数も同様で、これは[日数] (= [時間]) ではなく、基準温度に於ける 1 日当たりの生長量 G^* の逆数 ($\frac{1}{G^*_{\text{day}}}$) となる。ある DTS 値に開花が起きるとすると、 $\frac{DTS(t)}{DTS^*_{\text{開花}}} = DVS$ となる。DTS や DVR は一日当たりの生長量 aG^*_{day} の意味で用いられることが多い。通常 DTS も DVR も温度として日平均気温が用いられるので、時間単位が 1 日になるからである。DVS は $aG(t)$ のことである。したがって、時間間隔はほとんどが 1 日である。DVI は 2 個のイベントを持つ DVS であり、出芽時 0、出穂時 1、登熟時 2 とする指数であるが (堀江 1987)、これは $\frac{G(t)}{G^*_{\text{出穂}}}$ 出穂ないし $\frac{G(t)}{G^*_{\text{登熟}}}$ である。

IV 考 察

これまでの報告に於ける手法の説明は、手続き論に終始し、本報告のように各種手法を鳥瞰することはなかった。このため、手法の比較や最適解析法などについても考慮されることなく、既存の研究のうち類似性の高いものを踏襲することが行われてきたように思われる。本報告のフレームワークは、いわばコロンブスの卵であり、本来自明のものであるにもかかわらず、明瞭に意識されることなく、文書化もされてこなかった。本フレームワークに依れば、従来の解析手続きは同一のものとなり、温度応答関数や Δt が個々の解析ケースにより違うということになった。この違いは、従来手法では、関数型や Δt の大きさが手法と比較的強く結びついていたが、これらは手法とは関連しないものとなった。また、手続きが少々迂遠ではあるが、プログラム化した状態ではそれは陰蔽されるので問題なく、Web バージョンを開発中である。これを契機に、個々の手法に拘泥することなく、最適解析が行われるようになることを期待したい。

生物を知る場合には、生態を考えるにしろ、生理を考えるにしろ、その温度特性を知ることが極めて重要である。特に、細菌、糸状菌、昆虫などの分野では、新種や新規系統が見出された際には、ほぼ必ず温度特性が計測されてきた。植物では、労力や費用、時間がこれらとは比較にならないほどかかることと、日長や光強度などが

応答に影響することがあって、あまり実施されていないのが現状である。比率としては少ないにしろ、圃場データやファイトトロンなどを利用したデータから、積算温度や温度応答関数など、植物の特性を解明する研究は古くから行われてきた。これは、陽な推定であり、固定的なデータ組から最適な関数を決定するという、古典的なカーブフィッティングである。しかし、時々刻々と変化する温度を記録し、生長結果と対比することにより温度応答関数を定める陰な推定は、逆問題を解くことであり、逆問題では解の一意性は必ずしも保証されない。この手法による応答関数の推定は水野ら (1981) が嚆矢であり、その後、堀江ら (1984)、金野ら (1986)、竹澤ら (1989) が続いた。陰な推定法や、その制御への応用は、日本以外での実施例は無いようである。なお、陽な推定法は、単一ピークからなる複数の温度スペクトルを用いた陰な推定法であると解釈することが出来る。最適手法では、パラメータの直交性が前提なので、相関がある場合にはうまく働かないことがあるし、データ数が少ない場合にも同様である。水野 (2009) ではその双方に該当すると考えられたので、悉皆法に切り換えて最適値を求めた。いずれにせよ、通常の圃場条件で、1 個体の草丈を追跡することで、温度応答関数が決定できるということは、大きな進歩である。菌や昆虫においては、当たり前の基礎データである温度特性は、これまで植物では前述のように、あまり実施されてこなかったが、通常の耕種条件で、発芽後 1、2 ヶ月の生長を追跡するだけで温度特性を解明できるということであれば、通常の栽培実験自体から温度特性データが得られるということであり、余分のコストはほぼ無視できるので、広く実施されるべきであると考えられる。また逆に、通常の圃場における耕種条件のように、積極的な制御が行われていない環境下において、植物の応答を精度良く推定できるので、これに少しだけ環境制御を加えるといった利用にも応用できると考えられる。厳密な温度管理ではなくて、厳密な状態推定によって省エネ制御が実現できる可能性があると考えられる。

現在では、気温はほぼ電子計測なので、毎 10 秒値、毎分値、毎 10 分値、毎時間値等の日平均であることが多いが、古いデータでは、日最高気温と日最低気温の平均であったり、日平均に近い温度であることが多いとされる午前 10 時や午後 3 時、またその平均であったりのケースもあるようである。平均気温の他に、日最低気温や日最高気温を利用した方が精度がより向上する場合もある。電子計測が一般化した現在において、こういった温度値に対する操作は極力避けるべきであり、任意の時

間隔で環境特性の把握が可能な、温度スペクトルの利用が望ましい。現在、気象庁の多くの観測点では10秒間隔の計測を行い、これを基に種々の気象データを公表している。通信や計算機の能力は今後も増大するので、将来はより時間分解能の高いデータが公表されることになると思われる。これまでの研究では、 $\Delta t=1$ 日というものが多く、高分解能データの入手や処理が容易となったので、気象庁のWebで公開されているように、 $\Delta t=1$ 時間ないし $\Delta t=10$ 分の利用が拡大して行くであろう。植物の温度応答に時間遅れや履歴現象が存在する可能性があるが、これらは時間分解能を変えてデータ解析をすることで、明らかになると考えられる。

温度応答特性を表現するパラメータとして、アレニウスの法則など理論的根拠が想定されるものが望まれたり、現象論的、実存的、直感的なものが望まれたりする。現象の解析が目的なので、目的に応じて、つまりたとえば理論的パラメータが現象の説明ふさわしければその様にすればよいと考える。昆虫などでは特に低温側高温側双方の発育零点 (θ_{0L} , θ_{0H}) が重要であるとされている (Briereら (1999))。昆虫では鐘状曲線の低温側の中位付近であることの多い、「内的な発育最適温度」が鐘状曲線の頂点である最適温度より重要であるという見解がある (池本 (2005))。虫体サイズや死亡率の温度依存性から導かれたものようであるが、植物ではその様なことは観察されていないと思われる。このため、植物では、最適温度 (θ_m)、好適温度幅 (半値幅) (θ_w)、最大生長速度 (g_m) が重要であると考えられたので、これらのパラメータを用いて関数を記述した。しかし、どのような関数を採用すべきかについては、まだ共通認識が形成されていない。同一データに対して異なる関数を比較した例として、川方ら (1989)、水野 (1993) がある。関数のパラメータ数が多ければ、データにより良くフィットする可能性が高い。陽な推定ではパラメータ数をデータ個数以上にすれば、残差を0にできるが、これは推定がノイズに汚染されることを意味する。情報論的には、データへの適合度とパラメータ数のトレードオフが重要であり、AICのような指標が判断に使われる (水野 (1988)、水野 (2010)a)。但し、ノンパラメトリック法ではAICは定義されないので、比較にこれを含める場合、双方で利用できる何らかの別の情報量基準を考える必要がある。なお、植物の生長の記述にノンパラメトリック法を用いたのは Mizuno ら (1980) が最初と思われる。一方、パラメータ数が多くても、理論的根拠がある関数を用いるべきとも考えられるが (Schoolfeldら

(1981))、蓋然性は高いとしても実験対象の現象で理論があてはまることが常に証明されているわけではないことは注意すべきである。

V 摘 要

これまでに提案されてきた、温度による植物の影響を評価する各種方法を統一できるフレームワークを見出した。評価手法としては、積算温度 (Réaumur (1735)、江幡 (1990))、応答関数 (水野ら (1981))、温度変換日数 (DTS, 金野ら (1986))、発育速度・発育ステージ (DVR・DVS, de Witら (1970)、堀江ら (1984))、発育指数 (DVI, 堀江ら (1987))、ノンパラメトリック法 (竹澤ら (1989)) などが利用されてきたが、これらの手法の持つ意味やそれぞれの相互比較はあまりされてこなかった。このため、手法の利用や選択の際の問題発生を避けるため、同様な実験系の既出例に倣うような選択が行われてきたように思われる。今回、これらの解析手法は、すべて同じ単一のフレームワークのものとして明示的に考えることができることがわかったので、手法間の相互比較や、新規解析時の手法選択が自由に行えるようになった。

引用文献

- 1) Briere, J. F., P. Pracos, A. Y. Le Roux, J. S. Pierre (1999): A Novel Rate Model of Temperature-Dependent Development for Arthropods. *Population Ecology*, 28 (1), 22-29.
- 2) de Wit, C. T., R. Brouwer, F. W. T. Penning de Vries (1970): The simulation of photosynthetic systems. Proc. of the IBP/PP Technical Meeting, Trebon (1969), PUDOC, Wageningen.
- 3) 江幡守衛 (1990)：有効積算温度とイネの生長。第1報 有効下限温度の実践的算出法とイネの栄養生長への応用。日本作物学会紀事, 59 (2), 225-232.
- 4) Higuchi, H., N. Kimura, I. Hiyama, N. Mizuno (1987): Flowering Characteristics and its Regulation of *Habenaria (Pecteilis) radiata*. Proc. 12th World Orchid Conference, Tokyo, 1987, 248.
- 5) 堀江武 (1984)：イネの生産の気象の評価・予測法に関する研究(3)発育予測モデル並びに主要品種の発育パラメータ。昭和59年度日本農業気象学会全国大会講演要旨, 5-6.
- 6) 堀江武・中川博視・吉良知彦 (1986)：イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究 (1) 発育動態の気候的予測モデルについて。日本作物学会紀事, 55 (別1), 214-215.
- 7) 堀江武 (1987)：水稻生育の気象的予測モデル。近畿作物・育種研究, 32, 83-90.
- 8) 池本孝哉 (2005)：ベクター昆虫の地理的分布に影響を与える発育最適温度は実在する。衛生動物, 56 (別), 65.
- 9) 石田博人・福井謙一郎 (1994)：日本ナシ ‘二十世紀’ の温度変換日数法による果実肥大予測。近畿中国農業研究, 87, 3-6.
- 10) 鴨田福也 (1990)：気象要因に基づく果樹生育予測の問題点。果樹・野菜栽培における予測と診断, 60-65, 化学工

- 業日報社, 東京.
- 11) 金子友昭 (1990): ニホンナシの果実肥大予測法. 果樹・野菜栽培における予測と診断, 70-73, 化学工業日報社, 東京.
 - 12) 川方俊和・岡田益己 (1989): 発育指数を用いた水稻の幼穂形成始期と出穂期の推定. 農業気象, 45(3), 137-142.
 - 13) 川方俊和・横山宏太郎 (2005): 気象要因・土壌条件に基づくキャベツの生育予測技術の開発. ファーミングシステム研究, 7, 85-92.
 - 14) 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. 農業環境技術研究所報告, 1, 51-68.
 - 15) 久米信夫・竹澤邦夫 (1994): ノンパラメトリック DVR 法による一番茶の萌芽期予測. 農業気象, 50 (3・4), 221-224.
 - 16) Linkosalo, T., R. Häkkinen, H. Hänninen (2006): Models of the spring phenology of boreal and temperate trees: is there something missing? Tree Physiology, 26, 1165-1172.
 - 17) 水野直美・加古舜治 (1979): 環境要因評価の一方法について. 日本生物環境調節学会第17回大会講演要旨集, 44-45.
 - 18) Mizuno, N., S. Kako (1980): Fluctuation of Leaf Number in *Paphiopedilum insigne* under Controlled Environments (I). Duration of Stem Growth and Seasonal Change in Leaf Shedding. Environ. Control in Biol., 18(4), 95-101.
 - 19) 水野直美・加古舜治 (1981): 変動環境下における生育データと環境データからの応答関数の推定. 日本生物環境調節学会第19回大会講演要旨集, 104-105.
 - 20) 水野直美 (1982): 植物の温度適性の問題点. 園芸学会昭和57年度秋季大会研究発表要旨, 210-211.
 - 21) 水野直美・加古舜治 (1982): 変温度環境下の実験データに基づく温度応答曲線の推定. 生物環境調節, 20 (1), 43-50.
 - 22) 水野直美 (1988): サギソウの開花調節. 第17回ラン懇話会講演要旨, 1-3.
 - 23) 水野直美 (1993): ファイトテクノロジーの試み[20]—園芸学からのアプローチ—. 農業および園芸, 68 (5), 631-636.
 - 24) 水野直美 (1999): チャの温度応答特性パラメータの同定. 茶業研究報告, 88 (別), 94-95.
 - 25) 水野直美 (2009): 一番茶芽の伸長と温度. 茶業研究報告, 108 (別), 68-69.
 - 26) 水野直美 (2010)a: 温度応答関数の非対称性. 東海作物研究, 140, 12.
 - 27) 水野直美 (2010)b: 低温微速生長～茶などは5(2)°C 恒温で生長する. 東海作物研究, 141, (受理).
 - 28) 小野祐幸・金野隆光・吉沢しおり・柴寿 (1989): 温度変換日数法によるリンゴ果実肥大予測. 園芸学雑誌, 58 別1, 118-119.
 - 29) 小野祐幸 (1990): リンゴ果実肥大予測法. 果樹・野菜栽培における予測と診断, 66-69, 化学工業日報社, 東京.
 - 30) Réaumur, M. (1735): Observations du thermomètres, faites à Paris pendant l'année 1735, comparées avec celles qui ont été faites sous la ligne, à l'isle de France, à Alger et quelques unes de nos isles de l'Amérique. Acad. Sci. Paris, 545 p. (cited as in Linkosalo et al., 2006.)
 - 31) 鮫島良次・岩切敏 (1987): 気象と大豆の生育動態に関する研究 (1) 開花までの期間における発育速度と日長・気温の関係. 農業気象, 42 (4), 375-380.
 - 32) Schoolfield, E. M., P. J. H. Sharpe, C. E. Magnuson (1981): Non-linear regression of biological temperature-dependent rate models based on absolute reaction-rate theory. J. Theor. Biol., 88, 719-731.
 - 33) 菅原幸治・高田睦 (1999): セイヨウナシにおける温度変換日数法による果実肥大ならびに収穫適期の予測. 農業情報学, 1, 47-50.
 - 34) 高木伸友 (1990): チル・ユニットによる果樹の萌芽予測法. 果樹・野菜栽培における予測と診断, 70-73, 化学工業日報社, 東京.
 - 35) Takeuchi, K., Y. Nakano, U. Kato, M. Kaneda, M. Aizu, W. Awano, S. Yonemura, S. Kiyonaka, Y. Mori, D. Yamamoto, M. Umeda (2009): Changes in Temperature Preferences and Energy Homeostasis in Dystroglycan Mutants. Science, 323, 1740-1743.
 - 36) 竹澤邦夫・田村良文・小野祐幸 (1989): 作物の発育ステージのノンパラメトリック推定の有効性. 農業気象, 45 (3), 151-154.
 - 37) 矢島正晴 (1990): 作物生育過程のモデル化について. 果樹・野菜栽培における予測と診断, 39-45, 化学工業日報社, 東京.
 - 38) 米山彰造・中谷誠・山村忠明 (1997): プロトプラストを用いて作出したタモギタケ交配株の特性. 木材学会誌, 43 (5), 434-438.

A New Framework for Unifying Several Methods of Temperature Evaluation

Naomi Mizuno

Summary

Many methods of temperature evaluation in biology have been proposed and used, but they have never been compared, and their meanings have not been discussed. Here, we describe a new framework for unifying several methods of temperature evaluation and elucidating their meanings. Within the framework, all methods are comparable on the same concept basis, and their meanings can be clarified. Thus, the methods can now be used outside their original contexts.