

温度による生態資源の評価法

— 温度変換日数を用いた果樹の開花予測を例として —

星川和俊*¹・小野佑幸*²・金野隆光*²・松田松二*¹

*¹ 信州大学教養部環境科学研究室

*² 農林水産省農業研究センター、第5研究プロジェクトチーム

Estimation of Ecological Resources by Temperature Conditions

— Case of Prediction of Flowering Day for Fruit Trees

by Days Transformed at the Standard Temperature —

Kazutoshi HOSHIKAWA*¹, Sukeyuki ONO*², Takamitsu KONNO*² and Matsuji MATSUDA*¹

*¹ Environmental Science & Technology, Faculty of Liberal Arts, Shinshu University

*² 5th Project Research Team, National Agricultural Research Center

Abstract : The knowledge of the effect of temperature on ecological resources under various environmental conditions is important in the agricultural management and land-use planning. The estimation method on the effect of temperature for biological activity was discussed, along with an example of predicting flowering day for fruit trees in Nagano prefecture.

Daily mean temperature under various topological conditions, was estimated with the square grid technique at an arbitrary point of the study area. By using estimated daily mean temperature, flowering day of apple trees (*Fuji*, *Starking*) at every grid was predicted from DTS method (the Days Transformed at the Standard Temperature), which was derived from Arrhenius' law. The predicted values were in close agreement with the observed.

Key word : ecological resources, estimation, temperature, days transformed at the standard temperature, mesh data, model

生態資源、評価、温度、温度変換日数、メッシュデータ、モデル

はじめに

植物ならびに農作物の生育は、それらが生育する場の自然環境によって、著しく影響される。その主な要因には、植物（以後、農作物も含めた意味で“植物”を用いる。）が立地する気象、土壌、水等の条件があげられるが、とりわけ温度が気象要因の中で最も重要なものであることが指摘されてきた。すなわち、植物学研究や農学研究の成果によると、植物にはそれぞれに生育適温があり、植物生長の良否が温度により支配されること、また発芽、開花、結実等の生育ステージも

温度により異なること等が実証されてきた。

ところで、わが国はその国土の形状により、亜熱帯気候区から亜寒帯気候区までを含み、大きな気温の相違がある。さらに、国土の内部においても標高、地形等は複雑であり、気温は時間的・空間的に多様に変化している。このことは、南北に長く、しかも地形変化に富む長野県を考えてみても十分に理解されよう。このような複雑な温度環境の中で、自然植生は成立し、農林業上の営みばかりか、我々人類の生活や生産活動も展開されているのである。

したがって、各地域の温度変化の様相を、たんに気

象の変動としてだけ捉えるのではなく、個々の地点が有している生態資源に対して、温度が与える影響を評価することは重要なこととなる。つまり、温度が生態資源に与える影響を定性的、定量的に評価することが可能になれば、それは植生の地域分布の解明、ならびに農作物の適地選定や適正管理等に対して、有効な指標を与えることができるからである。これによって、温度生態資源の評価が可能になると共に、自然環境保全や土地利用計画に対する重要な指針を与えることもできると考えられる。

本報告においては、温度から見た生態資源評価の可能性を探る方法を検討した。この目的のために、温度変換日数理論^{1,2)}を用いて、長野県全域での果樹の開花予測を試み、各地点の立地条件の相違、気温環境の相違が生態資源に与える影響を定量的に評価しようとするものである。

なお、本研究は信州大学教養部と農林水産省農業研究センターとの共同研究として進めている研究成果の一部である。また本研究の遂行に当って、長野県農政部ならびに日本気象協会長野支部からは、有益な御助言と多大な資料提供等の御協力を賜った。記して感謝申し上げます。

I. 温度による生態資源の評価法

1. 従来の評価法

これまでに提案されてきた代表的な温度による生態資源の評価法について、それらの特徴と問題点をとりまとめる。

1) 平均気温

平均気温は、植生の地理的分布ならびに農作物の生育適否の指標として、最も一般的に利用されてきた方法である。しかし、この平均気温の定義に際して、その値はいろいろなものが利用されてきた。たとえば、年平均気温、作付期間の平均気温、あるいは一定の作付期間での平均気温を採用するなどさまざまである。さらに、平均気温の代わりとして、平均最低気温あるいは平均最高気温などを用いて、上述のそれぞれの期間を採用するものさえある。

このような平均気温による評価法は、地形による温度の相違や植物の種類差などを考慮しないで、大まかな植物の分布基準を提供するには有効な方法である。

しかしながら、多様な温度環境をもつ局地域を対象として、この平均気温による評価法を適用しようとした場合、ある特定の植物やそれが生育する固有な環境に対して、個々にその指標を求めることが必要となる。

したがって、この方法を各々の植物や環境条件下で普遍化するのには、著しく難しい。

2) 温量指数

温量指数には、暖かさの指数と寒さの指数がある。たとえば、1年のなかで月平均気温5℃以上の値を選び、それらの月平均気温から5℃を減じた値の総計値を暖かさの指数と呼ぶ。この温量指数による評価法は、局地的な気温の変化が平滑化されることにより、かなり広範囲を対象とする植物分布や作物の適地分布に対して、実用的な評価を与える。しかしながら、植物の感温特性が考慮されていないこと、ならびに植物の季節変化に対する評価ができないことなどに問題を残している。

また、この方法は次に述べる有効積算温度の特別なケースとも考えられ、有効積算温度と同じ欠点を有している。

3) 有効積算温度

この評価法は、生物の生育には一定の有効な熱量が必要であるという考えにもとづき提案された。一般的に、有効積算温度はある基準温度以上の時間(日単位)と日平均気温の積の和で示される。たとえば、農作物の基準温度としては、冬作物(ムギ類、秋播野菜等)の場合5℃、夏作物の場合10℃~15℃が用いられている。このように、本方法は植物における生物活性の特性値を含めたものであり、農業生産における生育適地、品種選定、播種期の指標として利用されている。

しかしながら、この方法の場合、植物の生育が有効温度と直線的に比例するものと仮定しているが、この関係がいかなる温度範囲においても成立するとは限らなく、適用すべき温度上の制限がある。さらに植物の種類や品種に応じて、どのような基準温度を採用すべきかも重要な問題である。

2. 温度変換日数理論

1) アレニウスの法則

一般的に言って、化学反応や酵素反応における反応速度と温度の関係は、(1)式に示すArrheniusの法則³⁾が適用できるとされてきた。

$$k = A \cdot \exp(-Ea/R \cdot t) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 k : 速度定数 [day⁻¹],

R : 気体定数 [8.314J · mol⁻¹ · K⁻¹],

T : 絶対温度 [K],

Ea : 見かけの活性化エネルギー [J · mol⁻¹],

A : 定数

このとき、速度定数の温度変化は(2)式で与えられる。

$$dk/dT = A \cdot Ea/R \cdot T^2 \cdot \exp(-Ea/R \cdot T) = K \cdot k$$

..... (2)

なお、 K は(3)式で表されるとする。

$$K = Ea/R \cdot T^2$$

..... (3)

ここで、 K は反応速度の温度係数であり、温度変化によって受ける影響の強さを表し、反応系に固有な特性値である。また、(3)式に示されるように、 K の値は見かけの活性化エネルギー Ea (以下、活性化エネルギーと略す)の値と温度によって決定される値である。

このアレニウスの法則は、化学反応や酵素反応における反応速度と温度の影響を説明するものとして、当該分野では多くの適用が行なわれ、その有効性も認められてきた。

近年、このアレニウスの法則を高等生物に適用する試みが、土壤微生物、種子の発芽、植物の生育などに対して行われてきている^{1,2,4,5,6)}。それらの結果によれば、複雑な温度環境に対する一つの生物活性の指標として十分に利用できるものであることが確かめられている。つまり、土壤微生物や植物活性と温度との関係は複雑なプロセスを有するものであるが、アレニウスの法則を用いることにより、実用的な精度でそれらの関係を単純化されることが実証されてきた。

2) 温度変換日数^{1,2,5)}

金野らは、生物活性と温度の反応系を対象としたアレニウス法則の検討から、生物活性の指標として温度変換日数と呼ぶ考え方を提案した。この考え方は、次の通りである。

すなわち、生物活性と温度の関係において、まず次の2つの仮定を導入する。

(i) 温度と反応速度定数の関係は(1)式で示されたアレニウスの法則に従う。

(ii) 各反応系1、系2、系3、……、系 N のそれぞれの温度を $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ ならびに速度定数 $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ とし、それぞれの系において同一反応量に至るまでの反応時間 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ とする。このとき、各系の速度定数 k_1 と同一反応量に至るまでの反応時間 t_1 との積 $k_1 \cdot t_1$ は一定とする。すなわち、

$$k_1 \cdot t_1 = k_2 \cdot t_2 = k_3 \cdot t_3 = \dots = k_n \cdot t_n = \text{一定}$$

..... (4)

ここに述べた仮定にもとづき、標準温度 T_s における速度定数を k_s 、同一反応量になるまでの反応時間を t_s とすると、(1)式と(4)式から(5)式が導かれる。

$$t_s = t \cdot k/k_s = t \cdot \exp(Ea(T - T_s)/R \cdot T \cdot T_s)$$

..... (5)

あるいは、

$$t_s = t \cdot m$$

..... (6)

ここで、 $m = \exp(Ea(T - T_s)/R \cdot T \cdot T_s)$,
 T_s, k_s, T_s :標準温度における T, k, t

以上の(5)式あるいは(6)から、活性化エネルギー Ea をなんらかの方法で求めることができれば、多様な温度条件下での反応時間 t を、標準温度下での反応時間 t_s に変換することができる。よって、この t_s の値を温度変換日数と呼んでいる。

換言すれば、温度変換日数とは、“ある温度で、ある日数おかれた条件が、標準温度に変換すると何日に相当するかを表したもの”と定義される。

このアレニウス法則を応用した温度変換日数理論を用いて、水田や畑の土壤有機物の分解、種子の発芽、作物の生育期、果樹の開花などに対して、活性化エネルギー Ea を実験的に求め、それらの定量的な予測が試みられ、その有効性確かめられた^{1,2,3,4,5,6)}。

この温度変換日数による評価法の特徴は、温度変化が生物活性に対して、指数的に影響を及ぼすことを導入した点にある。また、多くの生物活性にはその反応速度が転換する温度(転換温度と呼ぶ)が存在することが知られている。しかし、本方法ではそれぞれの転換温度に至るまでの温度範囲において、温度係数がほぼ一定値となることを実験的に示し、その活性化エネルギー Ea を用いて生物活性を定量化したことにある。ちなみに、後述する果樹の活性化エネルギー Ea の場合、5~25℃において、その値はほぼ一定となることが実験的に確認されている。

その結果、自然条件下(圃場条件下)での生物活性と温度変化の影響を考える際、各生物の転換温度と活性化エネルギー(温度特性値と呼ぶ)を求めることにより、温度が生態資源に与える影響を容易に推定することを可能とした。

II. 温度変換日数理論による果樹の開花予測

1. 温度特性値の推定

前述した温度変換日数理論を用いるとき、(1)式に示したように対象とする植物の活性化エネルギーなどの温度特性値の推定が必要となる。ここでは、小野・金野⁷⁾によって求められたTable 1のリンゴに対する値を用いる。この値は長野県果樹試験場(須坂)で観測された果樹の開花日とそこでの日平均気温から、温度変換日数の平均値を求め、その値を用いて最小二乗法によって決定した値である。なお、このときの標準温度は20℃とした。

Table 1 Characteristic Values of Temperature for Estimating Flowering day of Some Apple Fruit Trees.⁷⁾

Kind	Activation Energy (Ea)	Days Transformed at the Standard Temperature (DTS)	Starting day for Estimating DTS
Fuji	21,000	19.075	5th Feb.
Tugaru	20,000	19.763	10th Feb.
Kougyoku	17,000	22.728	15th Feb.
Starking	18,000	22.086	15th Feb.

2. 開花予測結果と検証

Table 1 で示された温度特性値を用いて、温度変換日数によるリンゴ（フジ、スターキング）の開花予測を行った。なお、この予測には長野県果樹試験所の1960年～1986年までの日平均気温を使用した。

Fig.1 および Fig.2 は予測された開花日と実測された開花日の値の関係を示している。この結果によれば、温度変換日数による開花予測は、どの品種の場合においてもかなりの精度で、実際の開花の様子を表している。なお、この場合の予測誤差の最大値はフジの場合4.7日、スターキングの場合4.1日であり、誤差の平均はそれぞれ1.5日、1.0日であった。他の多くの果樹についても、実用的な精度で開花予測ができることが実証されている。

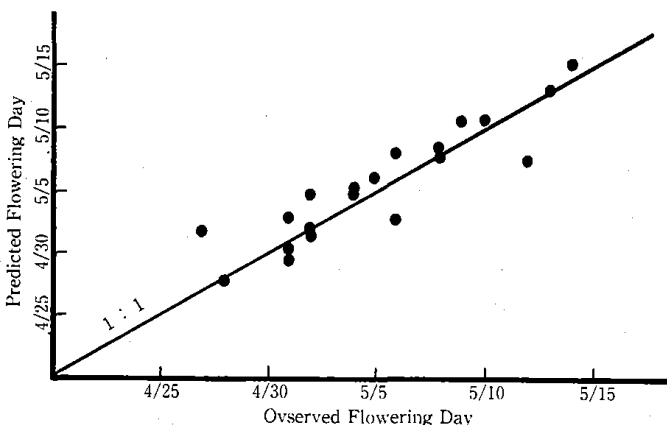


Fig. 1 Comparisons of Observed and Predicted Flowering Day of Apple Tree (Fuji)⁷⁾.

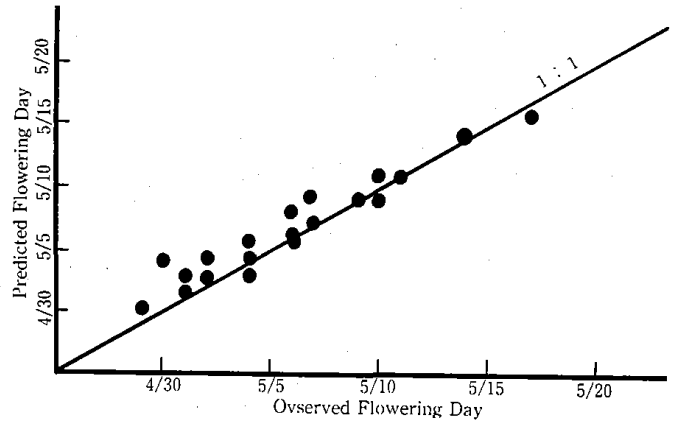


Fig. 2 Comparisons of Observed and Predicted Flowering Day of Apple Tree (Starking)⁷⁾.

III. 広域を対象とした気温推定と果樹の開花予測

1. メッシュデータの利用

これまでに述べてきた温度変換日数理論を用いて、ある一定の広がりを持つ多様な温度環境下での生態資源の評価を試みよう。そのため、地域内の局地的な温度変化を表すと共に、それらが生態資源に対してどのように影響するかを表現するモデルを考える。ここでは、この研究対象地域として長野県全域を選び、前述のリンゴの開花予測によって生態資源の評価を検討する。

ところで、広域な地域を対象とする場合、各地点の空間的な地形条件や気候環境の変動様相を表現するために、メッシュデータを用いる方法が一般的である。

本研究においても、国土数値情報⁹⁾の1×1 kmの標準メッシュを採用し、長野県全域を17,200メッシュに分割して、各メッシュの開花日予測を行なうことを基本とした。また、この国土数値情報にもとづき作成されている長野県農業気候メッシュシステム (AMINeS (Agro-Meteorological Information Network System for Nagano))^{9,10)}の1km²メッシュ毎の気温推定値を利用することとした。

AMINeSは長野県での安定した農業立地配置や作付体系の展開のために、農業気象環境情報の的確な把握と予測を目的として、開発されつつあるシステムである。このシステムでは、長野県を国土数値情報にもとづき1km²メッシュに分割し、メッシュ毎の各種気象要素（気温、降水量、日照時間、積雪深等）の分布図や平年値の推定を可能としている。

なお、メッシュデータについては、前述した国土数

値情報をはじめ、国勢調査、農業センサス等の五大統計資料、あるいは各地の細密数値情報（土地利用動向調査）、気候指数、植生等が、経緯度法と呼ぶ標準メッシュシステムによって規準化され、整備されている⁹⁾。このような標準メッシュを用いれば、各種のメッシュ属性値の利用により、生態資源の評価のみならず、環境保全や土地利用の評価・計画に対して、有効かつ統一的な方法論を提供するものである。

2. 日平均気温の推定

AMINeSにおいては、長野県内およびその周辺域におけるAMeDAS観測点の月平均気温と各観測点での多くの地形因子から、月平均気温を求める重回帰モデル(ステップワイズ法)を作成し、これによりメッシュ毎の月平均気温を推定している¹⁰⁾。また、推定された月平均気温をフーリエ級数に展開することにより、メッシュ毎の日別平滑平年値を推定できる。

本研究においても、AMINeSの方法に準じて、各メッシュ毎に推定された月平均気温を利用し、これらをフーリエ級数の第6項まで展開し、日別平滑平年値を推定した。

推定された日別平滑平年値の例として、軽井沢測候所および飯田測候所が位置するメッシュの日変化の様相を示すと、Fig.3 およびFig.4 のとおりである。また、これらの図には各観測所の実測平年値(1951~1980年)を示した。この結果によれば、実測値には日々の細かな変動があり、推定値との差が季節的に偏る傾向も見られた。しかしながら、これらの日別の推定値と実測値の誤差は最大1.6℃以内であり、その多くは1℃内外となった。この結果、推定された日別平滑平年値

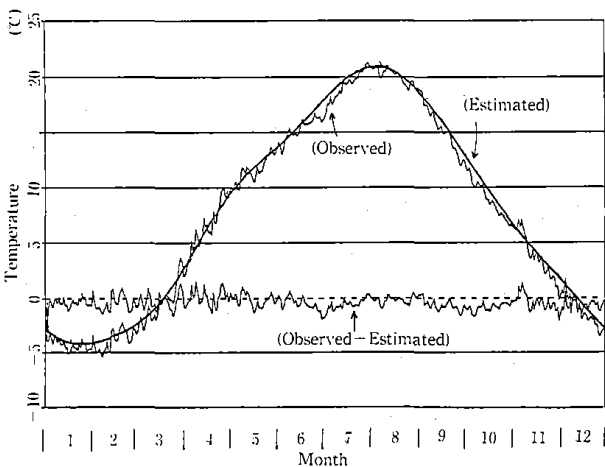


Fig.3 Relationship between Observed and Estimated Daily Mean Temperature at Karuizawa Meteorological Station.

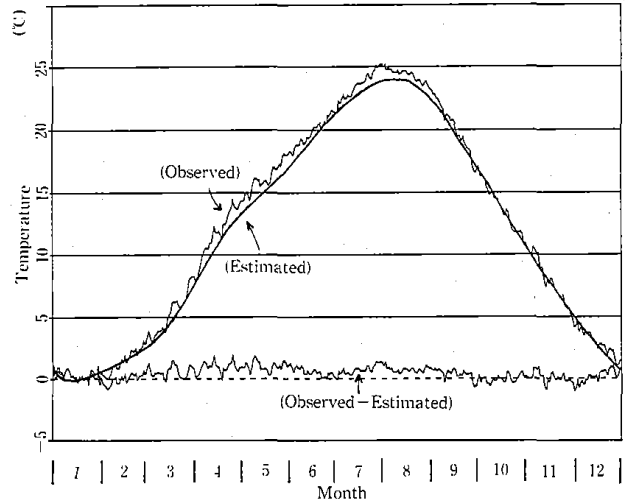


Fig.4 Relationship between Observed and Estimated Daily Mean Temperature at Iida Meteorological Station.

は、ほぼ気温の日別平年値に対応するものと考えられる。

3. 広域での開花予測

これまでに述べてきた温度変換日数ならびにメッシュ毎の気温の日別平滑平年値を用いて、各種果樹の開花日の推定を行った。この計算のためのフローチャートはFig.5 に示したとおりである。

開花予測を行った中で、長野県を代表する果樹であるリンゴ(フジ、スターキング)の推定結果を示したものがFig.6とFig.7である。なお、この計算は長野県内の全地域に適用すべきであるが、果樹栽培の実用上の制限および計算時間の都合上から、標高1,200m以上のメッシュでの開花予測は行っていない。

IV. 開花予測から見た生態資源評価についての一考察

1. 開花予測結果の検証

予測された結果は、長野県のように南北に長い地域での開花の状況をかなりの精度で評価していることが示されている。とくに、全域的な特徴から予測結果を見ると、温度は標高の影響を大きく受けることが予想されるので、開花の地域分布は標高分布と密接に関係していることが理解できる。しかしながら、局地的な地形因子の影響、例えば地形方位が開花に影響していることが、ここにあげた予測結果からも十分に読み取れる結果となっている。

なお、ここに示したリンゴの開花予測の場合において、ほぼ県内全域で5日間程度、推定値の方が遅くなる傾向となった。この原因としては、温度特性値の決定の際に利用した気温データ上に問題があったと考え

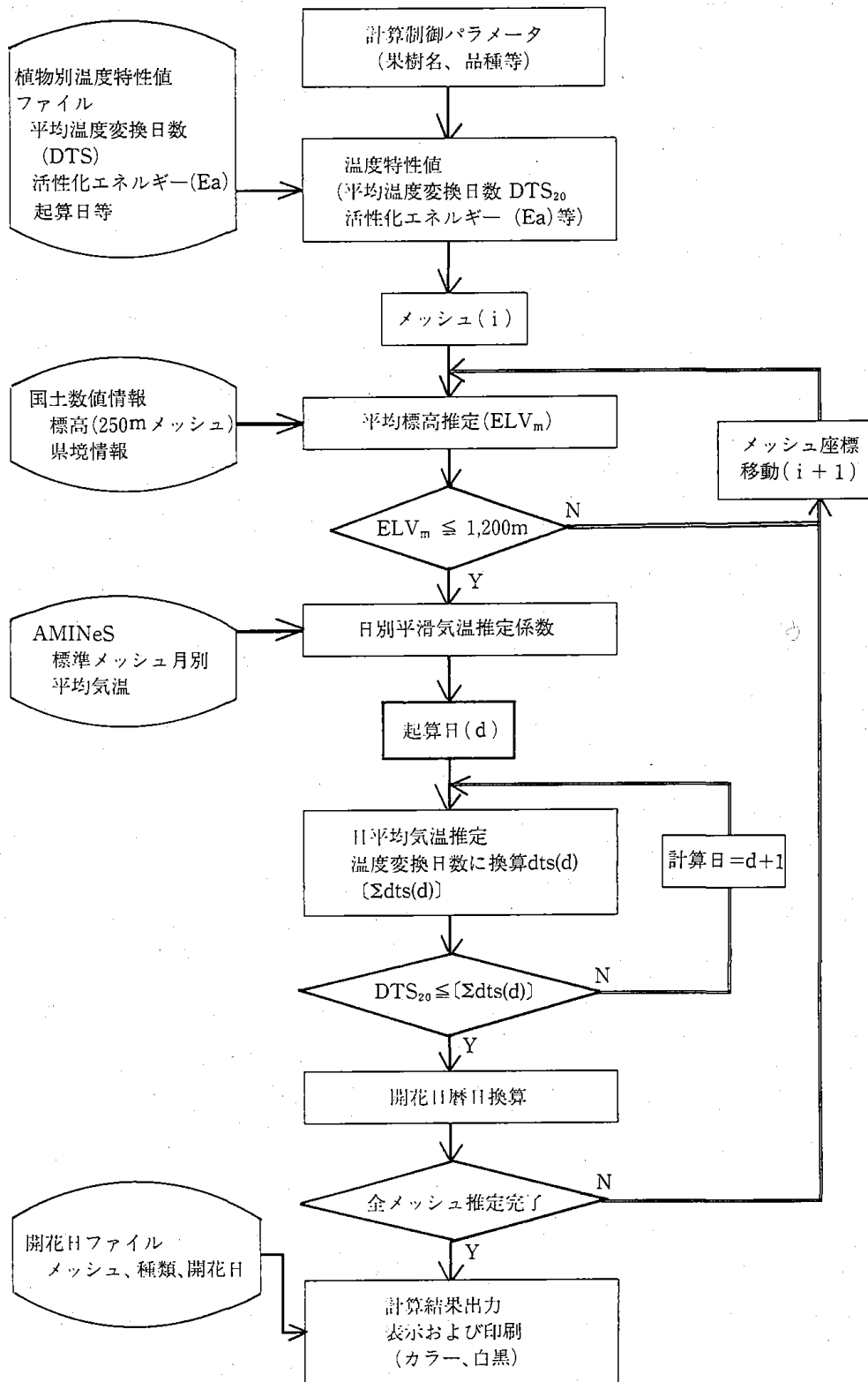


Fig. 5 Flow Chart for Estimation of Ecological Resources.

られる。すなわち、長野県果樹試験所の気象観測点の位置が移動したため、観測された気温が果樹生育の指標を代表する気温となっていなかったことが予想される。また、Fig. 3, 4 で示したようにメッシュ気温の平滑平年値には、固有な季節的な偏りが存在するので、これが推定に影響を与えたとも推察される。

推定された各種果樹の開花日の詳細な検証については、現在検証データを収集している途上であり、その結果については別報において報告する予定である。また、この検証によって、開花予測の精度向上も十分に期待される。

2. 問題点と今後の展望

果樹の開花予測を例として、生態資源の温度による評価法を示してきた。ここでは、この評価法における今後の問題点と展望について若干の考察を行なう。

最初は温度特性値の問題点である。温度特性値は、本研究で示した果樹以外にもいくつかの作物や土壌等に対しても求められてきているが、今後、より広い範囲の植物や農作物などの生態資源に対して、その値を精度よく求める必要がある。それによって、ここに述べた方法が地域生態資源の実用的な評価法となると考えられる。

次は本評価法の利用上の問題点であり、評価(予測)の精度にかかわるものである。たとえば、農業を例にして本評価法の応用を考える場合、そこには大きく二つの利用法がある。

一方は、時々刻々の気温変化から開花期、収穫期等の作物の日々の生育状態等を短期的に高精度で把握(評価、予測)する場合であり、農作物の日常的な管理にかかわるものである。他方は、作物の適地、作付体系の選定を行なう場合で、生態資源に対する適正配置計画や土地利用計画等に应用する場合等である。

前者の場合には、対象とする植物の正確な温度特性値の把握、高精度な気温変化の実測が必要と考える。また、このような利用のとき、本評価法の適用できる植物の種類は、その生育が主に温度によって支配されるものに限定されるであろう。

後者の場合には、局地的な気温の変化のみならず、広域を対象とした実用的精度を保証する平均、最高、最低気温等の推定が要求される。本研究では、平年値気温による生態資源の評価を試みたが、土地利用計画等においては地域の気温変動に応じた評価が重要となるからである。さらに、多様な生態資源に対する温度特性値の把握も課題である。

最後に、ここに述べた評価法は、生物活性が主に温度に依存することが前提であった。しかし、生態資源の中には、温度条件以外の要因によって規定されるものもある。たとえば、日射や土壌水分などである。このように温度以外の要因が主な生物活性の支配因子となる場合は、本評価法の適用は困難である。したがって、このような場合には、星川ら^{11,12)}が提案した日射、気温、土壌水分条件を用いて、地域生態資源の評価を行なう潜在生産力評価法などとの併用が必要と考える。

あとがき

本研究においては、温度が生態資源に与える影響を定量的に評価する方法について考察を加えた。すなわち、温度による生物活性の程度を温度変換日数を用いることによって、また地域的な気温の時間・空間的な変化を 1km²標準メッシュにより表現することによって、地域生態資源の評価の可能性を明らかにした。

ここに述べた方法を、より実用的な評価法としていくためには、その利用目的に応じて、とくに各種植物の温度特性値の把握と気温の測定・推定が重要な課題である。

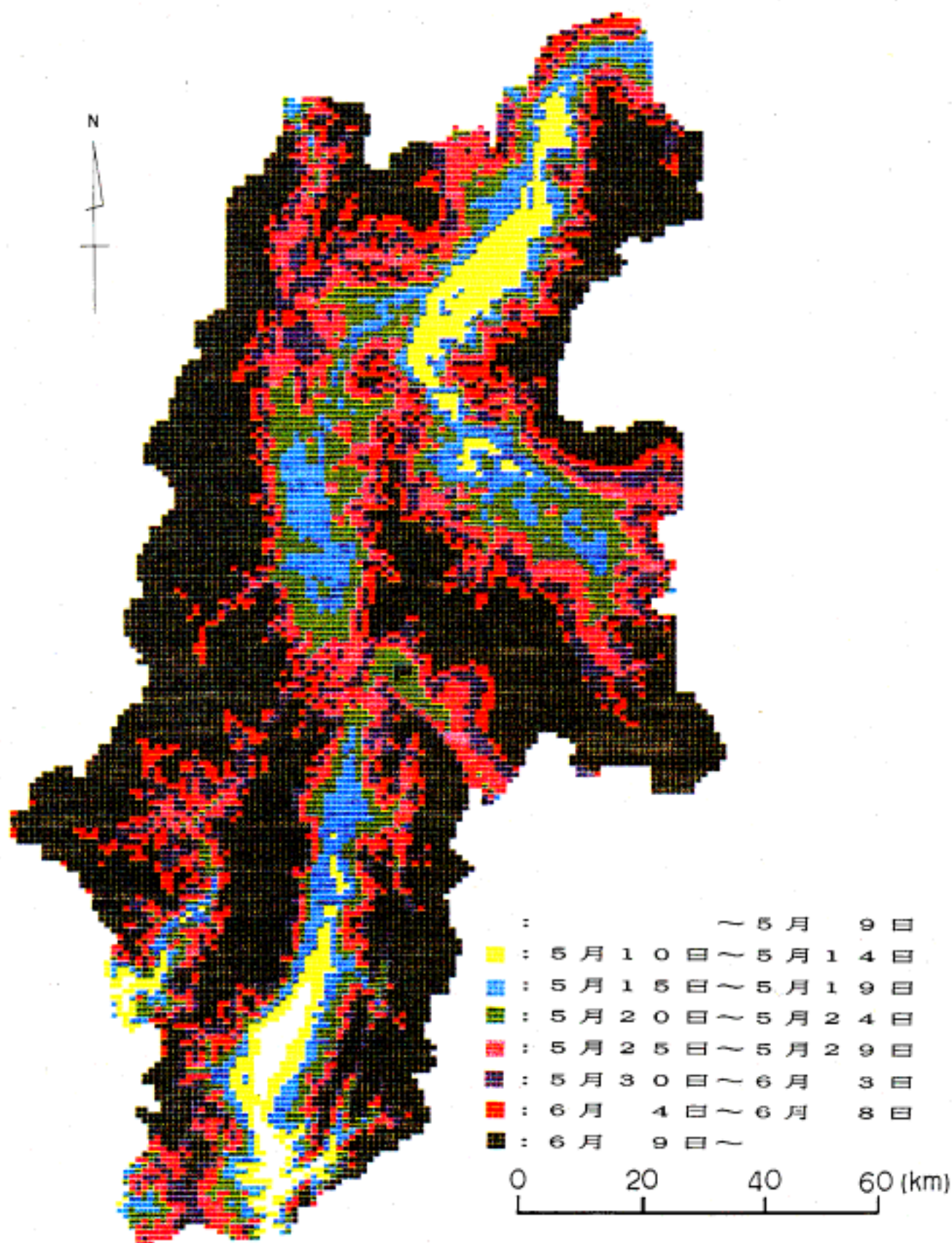


Fig. 6 Spatial Variations of Predicted Flowering Day of Apple Tree (*Fuji*).

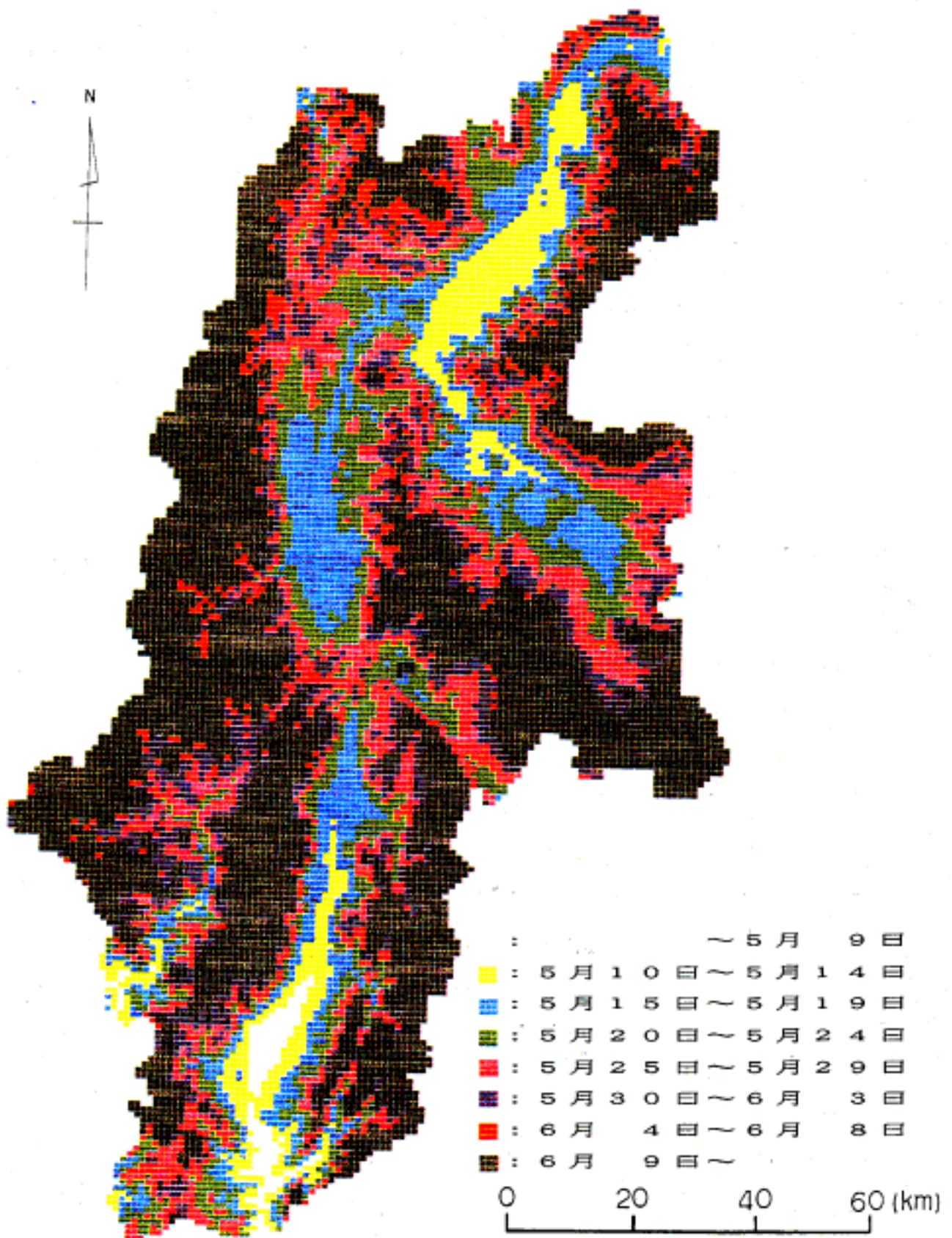


Fig. 7 Spatial Variations of Predicted Flowering Day of Apple Tree (*Starking*).

引用文献

- 1) 金野隆光, 杉原進: 土壤生物活性への温度影響の指標化と土壤有機物分解への応用, 農環研報, 1, pp. 51~68, 1986
- 2) 金野隆光, 杉原進: 温度指標と土壤有機物分解予測, 微生物の生態15, 日本微生物生態学会編, 学会出版センター, pp. 53~70, 1987
- 3) 例えば, J.Sutcliffe (佐藤庚訳): Plants and Temperature, 植物と温度, 朝倉書店, pp. 22~31, 1981
- 4) 金野隆光: 種子発芽速度と地温, 北海道農試研究資料, 8, pp. 43~58, 1976
- 5) 小野佑幸: 果樹の開花における感温特性評価, 第1回研究会地域農業資源の作物生態学的評価と利用, 農業研究センター及び農業環境技術研究所, pp. 76~89, 1987
- 6) 小野祐幸, 金野隆光他: 日本ナシの催芽・開花まで日数への温度の影響, 農業気象, 44(3), pp. 203~208, 1988
- 7) 小野佑幸, 金野隆光: 未発表データ
- 8) 建設省国土地理院: 国土数値情報の概要, 建設省国土地理院, pp. 1~147, 1983
- 9) 長野県農政部: 農業気象メッシュデータ活用推進事業報告書—平年値表示システムの概要—, 長野県農政部, pp. 1~60, 1988
- 10) 長野県農政部: 長野県メッシュ農業気候指数解析調査報告書—気温編—, 長野県農政部, pp. 1~98, 1986
- 11) 星川和俊, 松田松二: 地域潜在生産力の推定とその検証, 農土論集, 128, pp. 11~21, 1987
- 12) 星川和俊, 長智男, 黒田正治: 土壤水分条件を考慮する植物生産力の推定法, 農土論集, 134, pp. 19~26, 1988