

広域的なスギ開花日分布の推定手法 — スギ花粉の拡散過程に関する研究 (IV) —

川島 茂人¹⁾・高橋 裕一²⁾

¹⁾ 農林水産省農業研究センター 〒305 つくば市観音台 3-1-1

²⁾ 山形県衛生研究所 〒 990 山形市十日町1-6-6

(1993 年 11 月 4 日 受理)

Estimation of Flowering Date of *Cryptomeria japonica* in Mesoscale Region — Studies on the Dispersion Process of Airborne Pollen of *Cryptomeria japonica* (IV) —

Shigeto KAWASHIMA¹⁾ and Yuichi TAKAHASHI²⁾

¹⁾ National Agriculture Research Center
3-1-1 Kannondai, Tsukuba 305, Japan

²⁾ Yamagata Prefectural Institute of Public Health,
1-6-6 Tokamachi, Yamagata 990, Japan

Several methods that estimate spatial distribution of flowering date of *Cryptomeria japonica* in mesoscale region from the meteorological data and the topographical data were compared and examined. In the regression method, the best result was obtained in the multiple regression from the altitude and the monthly mean air temperature of January. The standard deviation of the estimation error (Esd) was 3.3 days.

On the other hand, following three kinds of methods were compared as estimation methods based on the accumulation of air temperature.

1) $T_{\text{SUM}} = \sum T > b$, 2) $T_{\text{SUM}} = \sum (T - b)$, 3) $T_{\text{SUM}} = \sum \exp (E_a (T_z - b_z) / R T_z b_z)$, where $T(^{\circ}\text{C})$ and $T_z(\text{K})$ are daily mean air temperature (T_m) or daily maximum air temperature (T_x), $b(^{\circ}\text{C})$ and $b_z(\text{K})$ are criterion temperature, E_a is temperature characteristics value, R is gas constant. In the simple accumulation method, best result was obtained by T_x ($b = -5.6^{\circ}\text{C}$, $\text{Esd} = 5.5\text{days}$). In the accumulation method for the difference from criterion temperature, best result was obtained by T_m ($b = -7.1^{\circ}\text{C}$, $\text{Esd} = 3.7\text{days}$). In the accumulation method with exponential conversion, best result was obtained by T_m ($E_a = 98000\text{J/mol}$, $\text{Esd} = 5.6\text{days}$).

Although the estimation errors of the temperature accumulation methods are larger than that of the multiple regression method, the former methods take into account the plant physiological process. Then, it is concluded that the

accumulation method for the difference from criterion temperature is most suitable for estimating the flowering date of *Cryptomeria japonica*.

Key words : Flowering date, Estimation methods, Grid data, *Cryptomeria japonica*.

緒 言

前報⁽¹⁾において示したとおり、スギ開花日の分布は、スギ花粉の発生と拡散をシミュレーション手法を用いて評価する際において重要なデータとなる。また、飛散の開始日に密接に関わっている。このように、スギ開花日の面的な把握は、スギ花粉の拡散過程を解明するための大切なポイントの1つであり、花粉症対策として提供する重要な情報である。しかしながら、地形の変化に富む地域では、場所による開花日の違いが大きく、平坦地に比べて、より適切な推定手法を見いだす必要性が高い。

高橋ら⁽²⁾は、山形県内におけるスギの開花日を県内9地点の花粉飛散開始日などの観測値をもとにして推定する方法について検討した。その結果、1月1日からの日最高気温積算値が210℃になる日を開花日とすることにより、面的な分布の推定が可能であることが示された。しかし、この方法では複数の年次を統一して扱えないことや、地点によって開花日までの気温積算値が異なるなどの問題が残された。さらに、高橋ら⁽³⁾は、開花日をメッシュ気温の積算値から推定する試みを行った結果、標高と積算気温には直線的な関係があり、1991年の山形盆地におけるスギ開花日は300℃到達日からある程度推定可能であることを示した。しかし、各地点の実測開花日は回帰直線の上下にばらついており、推定誤差が問題となる。この誤差をより小さくするとともに、複数年次が扱える、より一般的な開花日の推定方法を見いだすことの必要性を示した。

そこで、本報告では、複数年次のスギ開花日データ、気象データ、地形データなどを用いて、メソスケール(約20km~200km規模)の複雑地形地域内のスギ開花日の分布を推定するための、より一般的な方法を見いだすことを目的として、いくつかの推定手法の比較検討を試みた。

解析データと方法

1. 対象地域の概要

Fig. 1 に研究対象地域を示す。北は北緯39度20分、南は北緯37度30分、東は東経141度30分、西は東経139度に囲まれた、南北約205km、東西約220kmの地形の変化に富む地域である。□は1992年のスギ開花の観測地点、●はアメダスによる4要素気象観測地点である。1991年のスギ開花観測地点は山形市から蔵王にかけての標高の変化に富む地域に11地点分布している。

2. 開花日観測値

山形市から蔵王山にいたる11地点における1991年の観測値、および山形県内9地点における1992年の観測値を解析した。各地点について特定の樹木を定め、3~4日おきに観測を行った。観測樹木は、雄花芽を良く付ける20林齢以上であること、枝打ちをしていないことなどを基準に選定した⁽⁴⁾。太陽が良く当たる面の雄花芽のついた枝に衝撃を与えた際の花粉の飛び出しの有無を各地点5~10樹木について調べ、その半数以上で花粉放出を認めた日をその地点のスギ開花日と判定した。開花日調査地点の位置、標高および開花日をTable 1に示す。

3. 気象データ、地形データ

対象地域内66地点のアメダス4要素観測地点における、1991年と1992年の1月から4月末までの毎時気温値を用いた。このデータをもとに、対象地域内の日別最高気温および日別平均気温の面的分布を補間手法を用いて求め、そこで得られた各開花日観測地点の日最高気温と日平均気温を解析に用いた。

一方、国土数値情報の標高データ⁽⁵⁾をもとに、対象地域内の3次メッシュ(約1km×1kmの地域)ごとの標高を求め、解析に用いた。

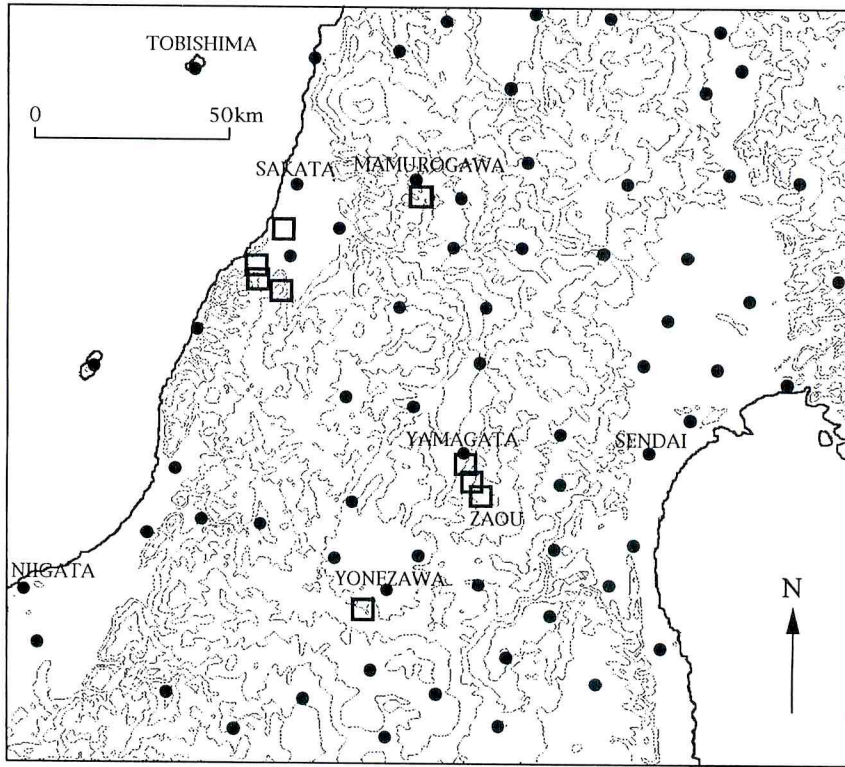


Fig. 1. Outlook of the research region. The size is 205 km in north-south direction by 220 km in east-west direction. Topographical feature is changeful. Symbols show the observation places of flowering date in 1992 (□) and the AMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System) stations (●). The observation places of flowering date in 1991 are located in 11 places of various altitudes from Yamagata-city to Zaou mountains.

4. 解析方法

植物の開花推定を扱った従来の研究の多くは、一年生植物を対象としており、手法としては、1)重回帰を用いたもの（いくつかの時期の気温や日長時間の積算値を独立変数とし、開花日を従属変数として重回帰式を求めて推定する方法）と、2)生育指数（DVI : Development Index）を用いたもの（播種から開花までの期間について気温などの変換値を積算し、積算値が1に達した日を開花として推定する方法）に大別される。一方、多年生植物の開花推定手法を扱った従来の研究としては、ソメイヨシノの開花日やヤマツツジなどの開花日を、3)温度変換日数法（気温を指数関数を用いて変換した値を積算して開花の指標とする方法）を用いて推定した例がある^(6,7,8)。しかしながら、

この方法がスギの開花推定に対してどの程度有効であるかは不明である。

今回の解析では、標高などを用いた単純な重回帰推定法と、温度変換日数法を含めたいいくつかの積算値による開花日推定法について比較検討を行った。その手順は次のような3つの段階から成り立つ。

第1段階として、離散的に分布している気温データを標高データ等を用いて補間することによって3次メッシュ単位の面的な分布データを作成し、開花日観測地点の気温時系列データを得た。補間手法は距離補間法を用いた。推定地点に近接する3地点の気象観測値をもとに、観測地点と推定地点間の距離の2乗の逆数を重みとして用いて推定した⁽⁹⁾。標高の変化に伴う気温遞減率も考慮した。本報告では、開花日推定手法の

Table 1. Locations of observation places and observed flowering dates. Mesh unit is 3rd-order grid system. Flowering dates are represented by total days from the 1st of January.

Year	No.	Observation point	Mesh Position		Altitude (m)	Flowering Date(day)
			Verti.	Horiz.		
1991	1	IWANAMI	134	109	260	80
	2	TUCHIZAKA	136	110	450	94
	3	KANNOU	138	109	520	93
	4	NAKASAKURADA	135	108	180	78
	5	UENO	140	108	460	84
	6	HOTTA	140	109	590	94
	7	DOUSIDAIRA	141	110	640	91
	8	ZAOUUCHI	141	111	780	101
	9	HOTEL 1	142	112	910	107
	10	HOTEL 2	142	113	970	110
	11	KUROHIME	143	112	980	110
1992	12	MAMUROGAWA	55	99	113	73
	13	YONEZAWA	176	85	385	79
	14	IWANAMI	134	109	220	71
	15	KANNOU	138	109	529	89
	16	ZAOU	142	113	960	110
	17	NAGASAKI	66	64	41	64
	18	MIZUSAWA	76	60	30	56
	19	ISIIYAMA	77	60	52	58
	20	SHOURENJI	80	62	137	58

比較検討が主目的であるため、気温データ補間手法の詳細については、文献⁹⁾を参照されたい。

第2段階として、気温データや開花日データをいくつかの開花日推定手法に適用し、最もよく説明できるパラメータをそれぞれの方法について求めた。

第3段階として、このようにして得られたモデルがどれぐらいの精度で開花日を推定できるかについて検討した。

解 析 結 果

1. 標高等を用いた回帰推定法

標高と開花日の関係を Fig. 2 に示す。回帰の寄与率（相関係数の2乗）は0.92であり、標高だけでかなりよく開花日を説明している。しかしながら、少蓮寺(No.20)、土坂(No.2)、中桜田(No.4)のように、回帰直線のまわりにばらついている点もあり、このような地点における推定誤差はかなり大きくなってしま

理由を気象データから調べたところ、標高の割に気温が低いことが明らかになった。そこで、1月から3月にかけての様々な時期の旬別平均気温や月平均気温を説明変数に加えることによって、回帰誤差が小さくなるか否かを検討した。その結果、標高と1月の平均気温を用いた重回帰が、最もよく開花日を説明できることが明らかになった。重回帰式は、

$$Df = 0.0466H - 5.23 T_1 + 71.9 \quad (1)$$

ここで、Df は開花日で1月1日からの通算日数で表わしたもの、Hは標高(m)、 T_1 は1月の平均気温である。Fig. 3 に重回帰式によって得られた実測開花日と推定開花日の関係を示す。回帰の寄与率は0.96と、かなり高くなり、各観測地点の推定誤差の標準偏差は3.3日であった。

2. 積算気温にもとづく推定法

スギ開花日の推定に関する既往の研究、ならびに解析方法で示したいくつかの推定方法を考慮して、以下

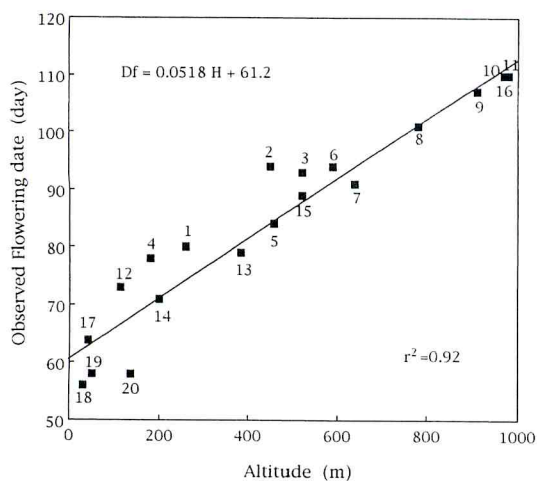


Fig. 2. Relation between the altitude and the flowering date. The contribution ratio of the regression is 0.92 and the flowering date is explained well only by altitude. However, the errors of some places are large.

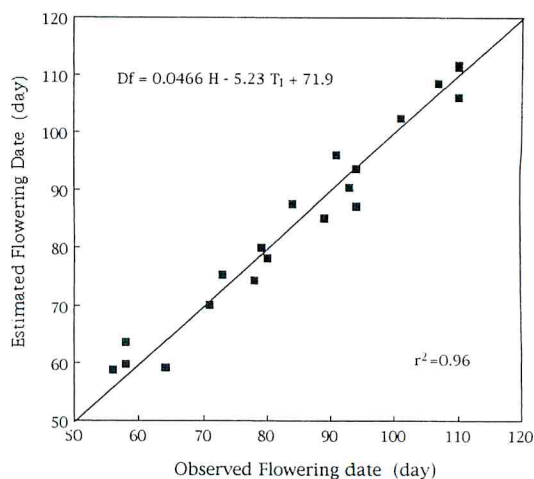


Fig. 3. Relation between observed flowering date and estimated flowering date based on the multiple regression from altitude and monthly mean air temperature of January. The standard deviation of estimation error is 3.3 days.

の3種類の開花日推定方法について比較検討を行った。気温は、日平均気温と日最高気温の両者について検討を行った。気温の単位は特に示さない限り℃である。以下、各手法の説明中の、「ある敷居温度」や「ある基準温度」は、誤差が最小となるようにして決められるパラメータである。

1) 日別気温積算法

ある敷居温度以上の日別気温を積算し、その値がある閾値を越えた日を開花日とする方法。式で書くと、

$$T_{\text{SUM}} = \sum T : \text{ただし } T < b \text{ で } T = b \quad (2)$$

ここで、 T_{SUM} は積算気温であり開花日を決めるための指標に用いる、 T は日最高気温もしくは日平均気温、 b は敷居温度である。

2) 基準温度を用いた日別気温積算法

ある基準温度と日別気温との差を積算し、その値がある閾値を越えた日を開花日とする方法。式で書くと、

$$T_{\text{SUM}} = \sum (T - b) \quad (3)$$

ここで、 b は基準温度である。他の記号の意味は1)の方法と同じである。

3) 温度変換日数法

日別気温を指数関数変換した値を積算し、その値がある閾値を越えた日を開花日とする。温度変換日数法の式は、

$$T_{\text{SUM}} = \sum \exp (E_a (T_z - b_z) / R T_z b_z) \quad (4)$$

ここで、 E_a は温度特性値で通常20000~125000 (J/mol)の値をとる。 T_z は絶対温度単位の日最高気温(K)もしくは日平均気温(K)、 b_z は標準温度(K)、 R は気体定数(8.314J/K mol)である。上記の式の指数変換部分は次のように変形できる。

$$\begin{aligned} & \exp (E_a (T_z - b_z) / R T_z b_z) \\ &= \exp (E_a / R b_z - E_a / R T_z) \\ &= \exp (a_1 - a_2 / T_z) \\ &= \exp (a_1) \exp (-a_2 / T_z) \\ &= a_3 \exp (-a_2 / T_z) \end{aligned}$$

ここで、 a_1 、 a_2 、 a_3 は E_a 、 R 、 b_z などの定数から決まる定数であり、変換式の特性を表わすために便宜的に用いた。最後の式からわかるように、 a_3 は変換値の倍率としてしか働いていない。 T_{SUM} は開花を計る

Table 2. Optimum parameters and threshold values to decide the flowering date. ‘Max’ means daily maximum air temperature, ‘Mean’ means daily mean air temperature. Threshold values are used for the decision of flowering date with models.

MODEL	1	2	3
Temp. data	Max	Mean	Mean
b (°C)	−5.6	−7.1	
Ea (J/mol)			98000
Threshold values	218	523	85.9

Table 3. Estimation errors of flowering date in each model. The standard deviation of estimation error in each model is shown in last line.

Year	No.	Obs.point	Model 1	Model 2	Model 3
1991	1	IWANAMI	−4	−3	1
	2	TUCHISAKA	−5	−8	−5
	3	KAMIO	0	−4	−2
	4	NAKASAKURADA	−10	−6	0
	5	UENO	9	5	8
	6	HOTTA	2	0	1
	7	DOUSIDAIRA	8	5	5
	8	ZAUGUCHI	3	1	−1
	9	HOTEL 1	1	1	−5
	10	HOTEL 2	−1	−2	−8
	11	KUROHIME	1	2	−7
1992	12	MAMUROGAWA	9	4	12
	13	YONEZAWA	−4	1	7
	14	IWANAMI	−10	−2	3
	15	KAMIO	−3	−3	1
	16	ZAOU	2	−1	−4
	17	NAGASAKI	−9	−4	−2
	18	MIZUSAWA	−3	3	5
	19	ISUYAMA	−3	2	5
	20	SHOURENJI	2	5	10
S.D. of Error (day)			5.5	3.7	5.6

ための指標であるため、その絶対値は問題ではない。 a_3 を適当に決めることによって、閾値を任意に設定できるが、 a_3 を変えてもパラメータの最適値や推定誤差が変化するわけではない。本手法において問題となるパラメータは a_2 であり、結局 a_2 を決めている E_a である。そこで b_z は既往の文献^(6,7,8)を参考にし

て273.2 (K)を用い、 E_a の最適値を探索した。

3種類の方法について、開花日を推定するための最適パラメータを非線形最適化手法の中のPowell法⁽¹⁰⁾を用いて探索した。パラメータの適合状態を評価するために、次の式を用いた。

$$SS=0.5 (SD1-SD2)/(SM1-SM2) \quad (5)$$

ここで、SM1とSD1は開花日における T_{SUM} の平均値と標準偏差、SM2とSD2は開花前日における T_{SUM} の平均値と標準偏差である。そこで、SSは開花前後における開花指標値のばらつきを基準化したものであり、これを最適化のめやすとした。積算開始日は、初め固定せずパラメータの1つに加えていたが、いずれの方法においても、積算開始日を変えても推定誤差があまり変化しないことや、従来の方との継続性を考慮して、1月1日に統一して比較検討を行った。

各推定法における日別気温の種類、パラメータの最適値、開花判定のための閾値をTable 2に、各開花日観測地点における推定誤差日数およびその標準偏差をTable 3に示す。誤差日数は(推定日-実測日)として求めた。従って、誤差が負であるのは推定日が実測日より早く、誤差が正であるのは推定日が実測日より遅い場合である。また、Fig. 4に各推定法によって得られた実測開花日と推定開花日の関係を示す。

日別気温積算法では、日最高気温の方が日平均気温より良い結果が得られ、敷居値の最適値は -5.6°C 、誤差の標準偏差は5.5日、回帰の寄与率は0.93であった。1991年の中桜田および1992年の岩波と長崎で推定日が特に早く、1991年の上野と同子平および1992年の真室川で推定日が特に遅い傾向が見られた。基準温度を用いた日別気温積算法では、日平均気温の方が日最高気温より良い結果が得られ、基準温度の最適値は -7.1°C 、誤差の標準偏差は3.7日、回帰の寄与率は0.96であった。1991年の土坂で推定日が早い傾向が見られるものの、全体的な誤差も小さく、良好な結果が得られた。温度変換日数法では、日平均気温の方が日最高気温より良い結果が得られ、温度特性値の最適値は 98000J/mol 、誤差の標準偏差は5.6日、回帰の寄与率は0.93であった。1991年の高標高地点で推定日が特に早く、1991年の上野および1992年の真室川、米沢、少蓮寺で推定日が特に遅い傾向が見られた。以上の結果、積算気温にもとづく推定法の中では、基準温度を用いた日平均気温積算法によって最も良好な結果が得られた。

考 察

標高等を用いた回帰推定法では、標高と1月の平均気温を用いた重回帰式が高い寄与率を示し、推定誤差

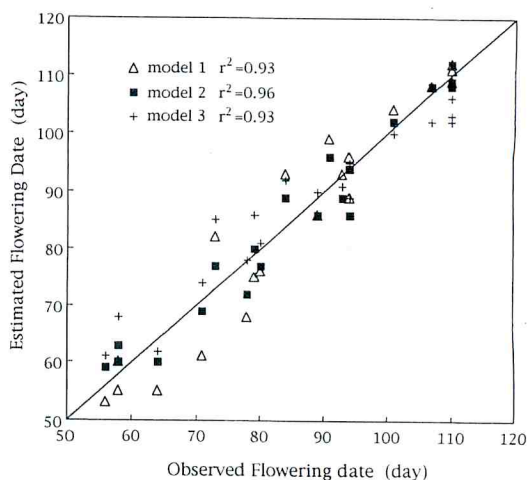


Fig. 4. Relations between observed flowering date and estimated flowering date based on the temperature accumulation methods. Model 1 (Δ) represents the simple accumulation method. The standard deviation of estimation error is 5.5 days. Model 2 ($\square$) represents the accumulation method for difference from criterion temperature. The standard deviation of estimation error is 3.7 days. Model 3 (+) represents the accumulation method with exponential conversion. The standard deviation of estimation error is 5.6 days.

の標準偏差は3.3日であった。一方、積算気温にもとづく推定法では、基準温度を用いた日平均気温積算法によって最も良好な結果が得られ、推定誤差の標準偏差は3.7日であった。重回帰法のような統計的推定法では、意味の明かでないパラメータが複数使われることになり、その再現性が疑われることが多い。多少数字の上での精度は劣っても、より合理的あるいは具体的プロセスが考慮された手法の方が良いと考えられる。本解析の結果においても、積算気温による推定法は、標高等を用いた回帰推定法に比べて、若干誤差が大きい結果となったが、そこには植物が気温の高低によって影響を受けながら生育し開花をむかえるという植物生理的に見て合理的なプロセスが考慮されている。そこで、今回検討した推定法の中では、基準温度を用い

た日平均気温積算法が最も適切なスギ開花日分布の推定方法であると考えられる。

本報告で検討した推定方法は、3次メッシュ(約1 km²)を推定の単位としている。この単位での開花日推定結果をシミュレーションに活用するには、同じ単位の従来よりも詳細なスギ森林分布データが必要となる。そこで、リモートセンシング手法などを活用して作成する手法⁽¹¹⁾の広域への適応性などを検討する必要がある。一方、推定誤差をさらに小さくするために、その原因を局地気象や微気象の観点から調べなければならない。また、新たな推定手法、例えばより複雑な変換を伴う積算気温法などの検討が考えられる。この場合、モデルのパラメータの数が増えるために、より多くの地点や年次における開花日の観測値が必要となる。

要 約

広域的なスギ開花日の分布を、気象データと地形データから、より正確に推定する手法を検討した。標高等を用いた回帰推定法では、標高と1月の平均気温を用いた重回帰式が高い寄与率を示し、推定誤差の標準偏差は3.3日であった。一方、積算気温にもとづく推定法として3種類の方法を比較検討した。日別気温積算法では、日最高気温の方が日平均気温より良い結果が得られた。敷居値の最適値は-5.6℃、誤差の標準偏差は5.5日であった。基準温度を用いた日別気温積算法では、日平均気温の方が日最高気温より良い結果が得られた。基準温度の最適値は-7.1℃、誤差の標準偏差は3.7日であった。温度変換日数法では、日平均気温の方が日最高気温より良い結果が得られた。温度特性値の最適値は98000J/mol、誤差の標準偏差は5.6日であった。積算気温にもとづく推定法の中では、基準温度を用いた日平均気温積算法によって最も良好な結果が得られた。積算気温による推定法は、標高等を用いた回帰推定法に比べて、若干誤差が大きい結果となったが、そこには植物生理的に見て合理的なプロセスが考慮されている。そこで、今回検討した推定法の中では、基準温度を用いた日平均気温積算法が最も適切なスギ開花日分布の推定方法であると考えられる。

謝 辞

開花日の調査にあたり、小野正助氏、小野 静氏、石森久子氏、青木四郎次氏の各位には多大の御協力をいただいた。各種のデータ処理手法の利用にあたり、

農林水産研究計算センターの江口 尚氏には、多くの御指導をいただいた。また、本研究の推進に対して、香川大学の石田智之博士には、多くの御助言と御鞭撻をいただいた。各位に対して心より厚くお礼申し上げます。

引 用 文 献

- (1) 川島茂人・高橋裕一：開花日を考慮したスギ花粉拡散シミュレーション。花粉誌 37, 137-144 (1991)。
- (2) 高橋裕一・川島茂人・大江栄悦・片桐 進：スギ花粉の発生と拡散過程のモデル化—メッシュ化手法を用いたスギ開花日の予測(Ⅱ)—。花粉誌 37, 35-40 (1991)。
- (3) 高橋裕一・小野正助・小野 静・石森久子・青木四郎次・川島茂人・木村和則・相川勝悟：スギ開花の時期と標高、メッシュ気温との関係。花粉誌 39, 113-120 (1993)。
- (4) 金指達郎・横山敏孝、金川 侃：スギ人工林における雄花生産量。花粉誌 36, 49-58 (1990)。
- (5) 建設省国土地理院：数値地図ユーザーズガイド。494pp (1992)。
- (6) 小元敬男・青野靖之：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, 25-31 (1989)。
- (7) 青野靖之・小元敬男：チルユニットを用いた温度変換日数によるソメイヨシノの開花日の推定。農業気象 45, 243-249 (1990)。
- (8) 青野靖之・小元敬男：ヤマツツジ・フジ・アジサイの開花日の推定。農業気象 47, 233-240 (1992)。
- (9) 川島茂人：アメダスデータにもとづく毎時気温補間手法の比較。農林水産省別枠研究「情報処理」研究成果集第1分冊, 322-333 (1990)。
- (10) Powell, M.J.D.: An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. *Computer Journal* 7, 155-162 (1964)。
- (11) Takahashi, Y., K.Tokumaru and S. Kawashima: Distribution chart of *Cryptomeria japonica* forest through data analysis of Landsat-TM. *Jpn. J. Palynol.* 38, 140-147 (1992)。