日本の温帯落葉樹の南限と気温との関係

本間幸治・青野靖之・小元敬男

(大阪府立大学農学部大気環境学研究室)

Relationship between the Southern Limits of Japanese
Temperate Deciduous Trees and Temperature

Koji HONMA, Yasuyuki AONO and Yukio OMOTO

(Lab. of Atmospheric Environment, College of Agriculture,
University of Osaka Prefecture, Gakuen-cho 1-1, Sakai, 593 Japan)

Abstract

The relationship between temperature and the southern limits of temperate deciduous trees in Japan is discussed by using two indexes of temperature. One is the mean temperature of the warmest month to represent summer condition, and another is the chilling hours (accumulated hours below 7.2°C (45°F)) for winter. Eight species of deciduous trees (*Zelkova serrata*, *Fagus crenata*, *Aesculus turbinata*, *Pterocarya rhoifolia*, *Betula ermanii*, *Quercus mongolica*, *Ulmus davidiana* and *Acer mono*) were chosen for this purpose. It appeared that the chilling hours are effective in determining the southern limit of *Zelkova serrata*, suggesting at least thermal condition in winter is important in the warm side distribution for this species. For other species, the case in which winter condition may affect southern limits is found in the coastal areas and the relatively low latitude region of Japanese mainland.

The impact of global warming on the potential probability of occurrence for *Fagus crenata* in Osaka Prefecture and its vicinity is also examined. For a 1.5°C mean temperature rise, the potential probability becomes 0.02–0.21 from the present 0.13–0.68 in Mt. Izumi-Katsuragi and Mt. Koya area, and 0.24–0.70 from 0.65–0.76 in Mt. Kongo. For a 3.0°C rise, the probability decreases to 0.04–0.34 in Mt. Kongo. In the other two areas, it will become almost 0 suggesting the climatic condition becomes too warm for the occurrence of this species.

Key words: Beech (*Fagus crenata*), Chilling hours, Global warming, Mean temperature of the warmest month, Temperate deciduous trees

キーワード: 温帯落葉樹, 最暖月平均気温, 地球温暖化, 低温時数, ブナ (*Fagus crenata*)

1. はじめに

温帯落葉樹は、治水や環境保全などの観点から、最近その重要性が注目されている。一方、近年になって、地球上における温暖化の生態学的影響が注目され、温帯落葉樹の分布と気候との関係の研究も重要性が増してきている。

気候の湿潤な日本では、降水量の不足が直接的に植生分布を左右している例は一部を除いてあまり見られない。その他、土地の因子や生物の因子が影響する場合も考えられるが、日本のマクロスケールの植生分布に影響するのは主として気温であるとされ、植生の分布限界の重要な決定要素として注目されてきた(飯島, 1967; 吉良, 1971, 1976; 吉良ら, 1976; 山中, 1979)。しかし、どの季節の気温が分布限界の決定に重要か、また植物のどのような性質と関係して気温が分布限界に影響するかについては十分に明らかにされたとはいえない。気温によ

1993年11月27日 日本農業気象学会近畿支部大会にて一部発表

1995年3月24日 受付, 1995年8月2日 受理

る分布限界のうち北限に関しては、例えば酒井(1975)が樹木の耐凍性に注目して、冬の最低気温が重要であろうと報告している。しかし、南限に関してはこのような研究は少ない。温帯落葉樹の南限を暖かさの指数(Warmth Index; WI)で表すことがあるが(吉良, 1948, 1971, 1976), 暖かさの指数で南限が決まる理由は明らかではない。

本研究では、まず季節的に見た温帯落葉樹の分布南限と気温との関係をマクロスケールで解析し、南限がどの季節の気温に影響されているのかを考察する。また、マクロスケールでの気温とブナの分布との関係に基づき、大阪府とその周辺地域のブナを対象とし、温暖化が与える影響の群落スケールでの予測の事例解析を試みる。

2. データおよび方法

2.1 植生分布データ

本研究では日本に比較的広く分布する温帯落葉高木のなかから、ケヤキ(*Zelkova serrata*), ブナ(*Fagus crenata*), トチノキ(*Aesculus turbinata*), サワグルミ(*Pterocarya rhoifolia*), ダケカンバ(*Betula ermanii*), ミズナラ(*Quercus mongolica*), ハルニレ(*Ulmus davidiana*), イタヤカエデ(*Acer mono*)の8種類を対象として選んだ。

日本全国についての各樹種の分布範囲のデータは、Horikawa(1972, 1976)から得た。Fig.1はブナの分布図である。この分布図は、水平分布図、横軸に緯度をとった垂直分布図、横軸に経度をとった垂直分布図の3種類からなる。水平分布図には、緯度を10', 経度を15'ごとに区切った格子が設定され、また垂直分布図には横軸の緯度、経度をそれぞれ10', 15'ごとに、縦軸の標高を100mごとに区切った格子が設定されている。

2.2 気候指数の計算

温帯落葉樹の南限をWIで表した例がこれまでよく紹介されてきたが(吉良, 1948, 1971, 1976), WI自体が南限との関係においてどのような意味を持つのかはまだ明確でない。吉良(1976)は、WIはブナの分布下限と高い相関を持つが、ブナの分布下限を直接制約しているのは、WIが表す全生育期間の暖かさではなく、大きな呼吸消耗を強いる真夏の暑さであろうと述べている。そこで、本報では、温帯落葉樹の南限に関係すると思われる気温要素の一つとして、夏の暑さを取り上げ、これの指数として最暖月平均気温を用いることにした。

また、温帯落葉樹は、その生活環において休眠打破に必要な低温を要求するので、暖地では冬季の低温不足から分布が制限される可能性もある。そこで、二番目の気温要素として植物が冬季に遭遇する低温を取り上げ、低温の指数として7.2℃(45°F)以下の時数(以下、低温時

Fig. 1. Distribution of *Fagus crenata*. (Beech) in Japan. (A) Vertical distribution vs. longitude. (B) Vertical distribution vs. latitude. (C) Horizontal distribution. Based on Horikawa (1972, 1976).

数と記す)を用いることにした。低温時数は落葉果樹の低温要求量を表すのによく用いられる(Weinberger, 1950; 高馬, 1953)。温帯落葉樹については、Omoto *et al.* (1993)が、この指数を南限を表すのに用いている。実際には樹種によって感温特性に差があると推測されるので、留意する必要があるが、今回は7.2℃をしきい値とする低温時数で統一した。

これらの気候指数を計算する目的で、アメダスの時間別気温データと区内気象観測所の月別気温データ(月最高気温、月最低気温、月平均気温)を利用した。アメダスの時間別気温データは、全国94地点のものであり、1976~1990年の15年間のものを主体にして用いた。連続9時間未満の欠測については、その間の気温が直線的に変化したものとして取り扱い、欠測期間中の気温を推定した。ただし、1976年または1990年のいずれかの欠

測が連続 9 時間以上におよぶ地点があり、これらについては、この欠測のある年を除き、1977～1990 年または 1976～1989 年の 14 年間のデータとして利用した。なお、沖縄地方については観測期間が短いため、10 年間以上のデータがある地点のみを用いた。区内気象観測所の月別気温データは、1941～1970 年の 30 年間のうち 20 年分以上のデータがある 1236 地点を使用した。

最暖月平均気温は区内気象観測所の月平均気温データからそのまま求めることができる。低温時数は区内気象観測所の月別気温データからは直接計算できないため、アメダスの各地点について時間別気温より求めた結果をもとに区内気象観測所の値を推定した。その推定方法は次の通りである。

① 区内気象観測所の月最低気温、月最高気温の平年値から清野（1990）が示した気象庁開発の調和解析法により、日最低気温、日最高気温の平年値を推定する。

② 日最低気温、日最高気温の平年値を用い、時別の気温の内挿値を計算する。ここでは、気温が最高～最低気温の間を直線的に変化するものと考え、最高気温の出現時刻を同じ日の最低気温の出現の 6 時間後、また翌日の最低気温に下がる時刻をさらにその 14～18 時間後（この時間については後述）とし、その間の気温を比例配分する。

③ 日最低気温と日最高気温の標準偏差の月別平均値を計算する。さらに、その全国平均値を求める。

④ 上記で求めた日最低気温、日最高気温の標準偏差についても前述の日変化モデルの勾配に従って比例配分により各時刻の標準偏差を推定する。その推定時間別気温と標準偏差の値から、各時間の平年気温が、7.2℃以下になる確率を正規分布を仮定して計算し、その確率を年間にわたって積算する。

上記の方法による低温時数の推定精度は、アメダスの 94 地点について検討した。気温の日変化の内挿方法別に RMSE (Root Mean Square Error; 平均二乗誤差の平方根) を求めて比較した。その結果、最高気温出現後 15 時間で翌日の最低気温まで直線的に下げ、残り 3 時間についてはそのまま一定とするような内挿方法をとった場合、RMSE が 52.6 時間と最小になった。この他の方法として、月最高、月最低気温のデータから比例配分を用いて推定した時別気温を使って低温時数を推定する方法も試みたが、RMSE は 189 時間となり、上記の方法より精度は悪かった。

2.3 存在率の計算

Fig.1 に示したような各樹種の分布図を用いて、アメダスおよび区内気象観測所の各地点にそれぞれの樹種が分布しているとみなされるか否かを判定した。判定は、

水平分布図、横軸に緯度をとった垂直分布図、横軸に経度をとった垂直分布図の 3 種類の図を用いて行った。判定の結果得られた分布の有・無別の区内気象観測所数を Table 1 に示す。この数値は解析対象の全範囲でまとめたものであり、ケヤキやイタヤカエデなど、日本の広い範囲で見られる樹種ほど、分布すると見なされる地点数も多くなっている。

Table 1 The number of meteorological station, classified by occurrence of each plant species.

Species	Number of station	
	Present	Absent
<i>Zelkova serrata</i>	816	420
<i>Fagus crenata</i>	213	1,023
<i>Aesculus turbinata</i>	281	955
<i>Pterocarya rhoifolia</i>	159	1,077
<i>Betula ermanii</i>	128	1,108
<i>Quercus mongolica</i>	505	731
<i>Ulmus davidiana</i>	256	980
<i>Acer mono</i>	497	739

判定の結果をもとに、以下の方法で気候指数に対する各樹種の存在率の変化を計算した。まず横軸に、ある気候指数のデータの最小値から最大値までの範囲をとり、それを 100 等分するようなポイント (101 ポイント) を設定した。そして、(そのポイントの気候指数の値) ± (横軸範囲の 1/10 の気候指数値) の範囲内にデータ値が含まれる気象観測地点をそれぞれのポイントにおいてピックアップした。各ポイントでピックアップした地点について、存在率すなわち、(対象の樹種が分布するとみなされる地点数) / (ピックアップした全地点数) の値を計算し、これを縦軸にとる。

縦軸、横軸に異なる気候指数をとった場合についても存在率変化を以下の方法で計算した。この場合は縦軸、横軸の最大値から最小値までの範囲について、それぞれ 50 等分したポイント (51 × 51 = 2601 ポイント) を設定する。そして縦軸および横軸の方向に (各ポイントの中心の気候指数値) ± (縦軸および横軸範囲の 1/10 の気候指数値) の領域を設定し、領域内の地点について、(対象の樹種が分布するとみなされる地点数) / (領域内の全地点数) の値を計算した。

3. 結果および考察

3.1 温帯落葉樹の南限と気候との関係

各樹種の存在率の低温時数並びに最暖月平均気温に対する変化を Fig.2～5 に示す。

それぞれの気候指数に対する南限側での存在率の減少傾向に顕著な差が見られるのはケヤキである。南限側でのケヤキの存在率は、最暖月平均気温に対しては 0.5 以

下にならないが、低温時数に対しては0近くまで減少した(Fig. 2, 3)。Fig. 6はケヤキの南限付近の区内気象観測所について散布図を描いたものであるが、その南限は最暖月平均気温で説明できないが、低温時数では分布の有無が明瞭に分かれる。ケヤキが現在の南限以南の九州最南部や南西諸島に分布が見られないのは、ケヤキの休

眠打破に十分な低温が得られないことが主な理由である可能性が示唆された。低温時数は、温帯ではWIとほぼ直線の関係にある(本間ら, 1994)。ケヤキの南限はWIによっても表すことができる。しかし、上記のように、ケヤキの南限は夏の高温よりむしろ冬の低温に支配されていると見られることから、南限を表すのにはWIより

Fig. 2. Changes in probabilities of occurrence for *Zelkova serrata*, *Fagus crenata*, *Aesculus turbinata* and *Pterocarya rhoifolia* as a function of chilling hours.

Fig. 3. Changes in probabilities of occurrence for *Zelkova serrata*, *Fagus crenata*, *Aesculus turbinata* and *Pterocarya rhoifolia* as a function of mean temperature of the warmest month.

Fig. 4. Changes in probabilities of occurrence for *Quercus mongolica*, *Betula ermanii*, *Ulmus davidiana* and *Acer mono* as a function of chilling hours.

Fig. 5. Changes in probabilities of occurrence for *Quercus mongolica*, *Betula ermanii*, *Ulmus davidiana* and *Acer mono* as a function of mean temperature of the warmest month.

Fig. 6. Scatter diagram of *Zelkova serrata*, (●) present and (x) absent: chilling hours vs. mean temperature of the warmest month.

低温時数のような低温の指数を用いるのがより合理的と思われる。区内気象観測所のデータから最暖月および最寒月平均気温とWIとの相関係数をみると、 $WI \leq 80$ の場合は最暖月平均気温がWIについて $r=0.944$ 、最寒月平均気温がWIについて $r=0.701$ であるのに対し、 $WI \geq 140$ の場合は、最暖月平均気温がWIについて $r=0.089$ 、最寒月平均気温がWIについて $r=0.939$ であり、日本の暖地ではWIはむしろ冬の気温と相関が高くなっている。暖地の場合にはWIの値が冬の気温に左右されていることになり、ケヤキの南限がWIによって表せるとしてもそれは冬季の気温を反映したものと考えることができる。

次に、ケヤキ以外の樹種について、現在の南限側で分布が見られない地点を対象に、高温と低温のどちらの気温要素によってより分布が制限されているかを調べることを試みた。ここでは、Fig. 2～5において、存在率0.5以上と判断された場合を安全域、0.5未満の場合を危険域にあると仮定した。ブナについての解析結果をFig. 7に示す。Fig. 7によると、海岸に隣接した地域や、あるいは比較的緯度が低い地域には、夏の気温は安全域にあるが冬の気温が危険域にある地点(△)が見られる。残りの樹種についても同様の結果が得られた(存在率が最大でも0.5に達しないサワグルミは除く)。このことは、海岸に近い場所や、比較的緯度の低い場所では、冬の気温が相対的に高く、それが低温を要求する温帯落葉樹の分布の障害となる場合のある可能性を示唆している。以上の低温要求量による温帯落葉樹の分布限界については今後実験的アプローチによる結果との比較が必要である。

分布曲線の南限側での勾配を比較すると、Fig. 2とFig. 3ではブナと比較して、トチノキ、サワグルミの減少傾向がやや緩やかであり、Fig. 4とFig. 5ではハルニレが

Fig. 7. The locations of auxiliary meteorological stations where the distribution of *Fagus crenata* might be limited by chilling hours rather than mean temperature of the warmest month (△), and limited by the mean temperature of warmest month rather than chilling hours (○).

最も緩やかである。トチノキ、サワグルミ、ハルニレは、いずれも沢沿いや谷間を好んで生育する樹種であり、そうした地形的要素の影響により、気温に対する存在率の反応が明確でなくなっていると推測される。

沼田(1994)は温帯性のタケの南限が種間競争によって決まる例を紹介しているが、温帯落葉樹についても南限が種間競争により決められる場合が存在する可能性がある。気温以外の条件がマクロスケールの分布に影響する場合には、トチノキ、サワグルミ、ハルニレの場合のように存在率変化の勾配が緩やかになると推測される。一方、種間競争で南限が決まる場合には間接的ではあるが温度条件が重要な決定要素として関係する可能性がある。存在率変化の勾配には影響が現れないかもしれない。種間競争が南限に影響しているかを明らかにするには、生育に適した温度条件を実験的に調べ、実際の分布範囲と比較する必要がある。

3.2 大阪府とその周辺地域のブナに対する温暖化影響の評価

大阪府とその周辺地域にはわずかではあるがブナが分布している。その中には和泉葛城山のブナ林のように国の天然記念物に指定される重要な群落もある。ここでは、こうしたブナを対象に温暖化が与える影響の事例解析を試みる。

大阪府とその周辺地域に生育するブナの分布データは、環境庁(1981, 1985)の現存植生図に基づいた。これらは、それぞれ1979年の第2回自然環境保全基礎調査および1984年の第3回自然環境保全基礎調査の結果を集

成したものである。対象とした地域は大阪・和歌山府県境の和泉葛城山、和歌山県の高野山東方、大阪・奈良府県境の金剛山の3つに大きく分けられる。使用した現存植生図によれば、和泉葛城山には、シラキ-ブナ群集が、高野山東方にはブナ-ミズナラ群落、金剛山にはブナ-ミズナラ群落とスズカケ-ブナ群団が分布する。

植生データの読みとりは、5'×5'の格子ごとに行った。格子の半分以上に上記の群集、群落、群団を含む場合を対象とし、その数は和泉葛城山が4、高野山東方が61、金剛山が48の合計113である。格子内の気温は、それぞれの格子から最も距離の近い区内気象観測所のデータより、標高に対する気温の減率を0.6℃/100mとして推定した。各植生の中心から最も近い区内気象観測所までの距離は、和泉葛城山で10km(上之郷観測所)、高野山東方で6km(荒神岳観測所)、金剛山で5km(五條観測所)である。

ここでは、平均1.5℃および3.0℃の気温上昇時を想定し、低温時数-最暖月平均気温に対する存在率変化(Fig. 8)により、潜在的にどの程度の存在率を示す温度条件となるかを調べた。しかし、実際の群落スケールの分布には、温度条件以外の要素も影響する可能性があり、また、マクロスケールの分布に対しても温暖化に伴う降水量の変化や、さもなければ温暖化に伴う蒸発散量の変化が影響することもあり得るが、ここでは考慮しなかった。

Fig. 9 A, B, Cは現在の気温、平均1.5℃上昇時、および平均3.0℃上昇時について、対象格子の潜在的存在率をそれぞれ度数分布で示したものである。現在の潜在的存在率は、和泉葛城山については0.56~0.65、高野山東方については0.13~0.68、金剛山については0.65~0.76となった。平均1.5℃上昇時の潜在的存在率は、和泉葛城山については0.13~0.17、高野山東方については0.02~0.21、金剛山については0.24~0.70となった。平均3.0℃上昇時の潜在的存在率は、和泉葛城山については0.01~0.02、高野山東方については0.00~0.02となり、金剛山については0.04~0.34となった。和泉葛城山および高野山東方の対象格子のほうが低い潜在的存在率を示すのは、金剛山の対象格子のほうが高標高のためである。すなわち、和泉葛城山および高野山東方の対象格子の中心標高が620~940mであるのに対し、金剛山の方は820~1100mである。このような地域差はあるものの、平均1.5~3.0℃の気温上昇は、大阪府とその周辺地域のブナにとって生育に非常に不利な温度条件を生じさせるといえる。

対象地域の一つである和泉葛城山のブナ林は、現在ナショナルトラスト団体などによる保護、植林活動が盛んにおこなわれている。しかし、想定したような温暖化が

Fig. 8. The probability of occurrence for *Fagus crenata*: chilling hours vs. mean temperature of the warmest month.

Fig. 9. Frequency distributions of potential probabilities of occurrence for *Fagus crenata* at 113 points in Osaka Prefecture and its neighborhood: (A) the present temperature (B) a global temperature increase of 1.5℃ (C) a global temperature increase of 3.0℃.

あと数十年内に起こった場合、和泉葛城山での保護活動が期待した効果を示さない可能性もある。将来起きるかもしれない温暖化を見越すとすれば、温暖化に対してより安全な代替地に改めて植林するといった配慮も必要となろう。

4. ま と め

本報では最暖月平均気温、7.2℃以下の低温時数を用い、8種類の温帯落葉樹の南限と気温との関係を調べた。加えて大阪府とその周辺地域のブナ林に対する温暖化の

影響評価を試みた。

(1) ケヤキの南限は、主として冬の寒さに支配され、低温要求量が満たされるか否かによって決まることが推察された。

(2) ケヤキ以外の樹種についても、海岸に近い場所、比較的緯度の低い場所では、夏よりむしろ冬の気温が南限付近の分布を制限している場合があることが示唆された。

(3) 大阪府とその周辺地域のブナ林は、平均 1.5～3.0℃の温暖化により、著しく生育に不利な温度条件にさらされることが予想される。

謝 辞

本論文の作成にあたり、大阪府立大学農学部大気環境学研究室の文字信貴教授より有意義なアドバイスをいただいた。また、本稿を改稿するにあたって、担当編集委員および査読者の方々から有益なコメントをいただいた。以上の方々には、ここに厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 本間幸治・青野靖之・小元敬男, 1994: 気温と温帯落葉樹の自生南限との関係について. 気候影響・利用研究会会報, **10**, 10–11.
- Horikawa, Y., 1972: *Atlas of the Japanese flora. An introduction to plant sociology of East Asia, Vol. I.* Gakken, p. 1–500.
- Horikawa, Y., 1976: *Atlas of the Japanese flora. An introduction to plant sociology of East Asia, Vol. II.* Gakken, p. 501–882.
- 飯島 亮, 1967: 日本における造園樹木の分布に関する研究. 千葉大学園芸学部特別報告, **1**, 1–108.
- 環境庁, 1981: 現存植生図‘岸和田’.
- 環境庁, 1985: 現存植生図‘五條・高野山’.
- 吉良竜夫, 1948: 温量指数による垂直的な気候帯のわかちかたについて. 寒地農学, **2**, 143–173.
- 吉良竜夫, 1971: 生態学からみた自然. 河出書房新社, 295 pp.
- 吉良竜夫, 1976: 生態学講座 2 陸上生態系. 共立出版, 166 pp.
- 吉良竜夫・四手井綱英・沼田 真・依田恭二, 1976: 日本の植生. 科学, **46**, 235–247.
- 高馬 進, 1953: 落葉果樹の自発休眠に関する研究 (I) 自発休眠期の開始, 完了並びに自発休眠の深さについて. 信州大学農学部紀要, **3**, 189–204.
- 沼田 真, 1994: 自然保護という思想. 岩波新書, 212 pp.
- Omoto, Y., Aono, Y. and Hamotani, K., 1993: Use of chilling requirement in the estimation of the effects of warming on shifts of warmside boundaries in certain types of trees. *J. Agric. Meteorol.*, **48**, 603–606.
- 酒井 昭, 1975: 日本における常緑及び落葉広葉樹の耐凍度とそれらの分布との関係. 日生態会誌, **25**, 101–111.
- 清野 裕, 1990: メッシュデータによる農業気候資源と作物生産への利用. メッシュ気候値の農業環境研究への利用, 農業環境技術研究所, 21–42.
- Weinberger, J. H., 1950: Chilling requirements of peach varieties. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **56**, 122–128.
- 山中二男, 1979: 日本の森林植生. 築地書館, 219 pp.