森林植生帯分布の温度条件と潜在分布の推定

野 上 道 男*

Thermal Condition of the Forest Vegetation Zones and their Potential Distribution under Different Climates in Japan

Michio NOGAMI*

Abstract

Using the 1-km grid map of plant communities prepared by the Environment Agency of Japan, we recognized the five natural forest vegetation zones in Japan based on climatic data.

0. alpine :: *Pinus pumila* and alpine grass-land
(boundary WI=23)
1. subalpine :: Evergreen coniferous trees
(boundary WI=45)
2. cool-temperate :: Deciduous broad-leaved trees
(boundary WI=74)
3. semi-temperate :: Evergreen coniferous replaced by deciduous broad-leaved trees :
(boundary WI=117)
4. warm-temperate :: Evergreen broad-leaved trees :

In Japan, which receives sufficient precipitation in summer, the thermal condition during the plant growing season is the overwhelming factor that sets the limits of plant distributions. Using the 1-km grid map of monthly air temperature prepared by the Meteorological Agency of Japan, we made a grid map of WI (warmth index of Kira's), defined as the annual sum of monthly mean temperature above 5°C excluding negative values. This value, an indicator of summer warmth, ranges from 0.8 at the top of Mt. Fuji (3,776 m) to some 200 in the subtropical islands of southernmost Japan. WI is also an approximate indicator of annual potential evapotranspiration and net radiation, which are major factors of plant productivity.

We calculated the boundary values of WI for the natural forest zones using the grid map of plant communities and the newly prepared map of WI. At a boundary value, the two adjacent zones have the same grid numbers, that is, occupy the same area. The boundary values are given above. These values were used for estimation of potential vegetation for the grid cells whose natural vegetation had been lost by human land use, and for simulation of probable vegetation zones under different climates cooler or warmer than the present. Before doing this we analyzed statistical relationships between plant occurrence and local topography such as the slope and its direction, and the Laplacian value of height which indicates degree of convergence or divergence of water movements on the hill slope.

* 東京都立大学理学部地理学教室

* Department of Geography, Faculty of Science, Tokyo Metropolitan University

18.6 % of the total area of Japan is covered by natural vegetation, the rest by human-induced secondary forests (25.9 %), artificial afforestations (27.9 %), cultivated fields and grassland (21.4 %), rural and urban areas including industrial areas (6.2 %) etc. For these human-influenced areas we estimated potential vegetation on the basis of the boundary values of WI. Areal occupation ratios of the potential vegetation zones of Japan under present and different climates. are as follow :

Areal Occupation (%) of potential vegetation zones under different climates					
	natural (remaining)	potential (present)	-7°C cooler (full glacial)	-1.5°C cooler (little ice age)	+2°C warmer (CO ₂ -doubling)
alpine	0.3	0.8	26.9	1.4	0.6
subalpine	4.6	4.6	34.2	14.0	1.2
cool-temperate	12.0	31.8	37.8	34.1	22.1
semi-temperate	0.7	45.3	0.9	46.8	38.4
warm-temperate	1.0	17.5	0.2	3.7	37.7

Judging from the Plates on separate pages and the table above, it seemed that the shift of vegetation zones from the glacial time to the present skipped over the adjacent zone. The horizontal distance was short in the case of the shift in mountainous districts but long in flatter lowlands. In addition to this, human land use interrupted the horizontal shift of vegetation, especially in lowlands, for the last several thousand years. These historical situations influence strongly the distribution and composition of the vegetation of Japan.

I. 問題の所在

植物は長い時間をかけて自然環境に対する適応性を獲得した。その適応性には種の進化や、個体レベルの生理的適応のほか自然環境に適応した生活形をとるということも含まれる。さらに地史的にみれば振幅の大きい第四紀の気候変動に対応してその分布域を移動することも適応性の現われである。自然環境の変化に対応する分布の空間的移動は1つの点でとらえれば植生史であり、花粉分析などで復元される。これは同一の環境のもとで生態的理由によって植生が変化する遷移とは区別されなければならない。

現在の自然植生の大きな分布は気候が比較的長期間安定していた完新世の気候に対応していると考えられる。植物の生育に関係する自然環境(気候・温度、光、水、土壌など)のうち、土壌は主として地形・地質と気候によって、また、水分条件も地形・気候・土壌などによって決まっている。気候と地形はこれら自然環境の中で独立性が

高い要素である。さらに地形は数万年というような期間ではそれほど変化しない。ここでは変動の速さが大きい気候変動に着目して、現在の(自然)森林植生帯がどのような気候条件と統計的に対応しているかを鍵として、気候変動に対応して過去の森林植生帯の分布がどのようなものであったか、さらに地球温暖化によってそれがどのように移動する可能性があるかを予測することを試みる。

II. 使用データの吟味と気候指標値の計算

〔植生〕

植生についての数値データとして環境庁が作成した「緑の国勢調査」の植生群落コードファイルを用いる。このファイルのメッシュシステムは国土数値情報のそれ(矢口, 1990)に準じているが、ポイントサンプリングに近い方法でデータを作成している。すなわち3次メッシュ(約1 km × 1 km)の中央に直径250 mの円を描きその中で卓越する群落をそのメッシュの代表としている(津沢 1990)。従ってこのデータは3次メッシュの1/4

細分メッシュに近い空間分解能を持っている。このデータのうち、自然度の高い群落（9または8, すなわち自然植生・自然林あるいは自然度の高い2次林）を対象とする。

〔気候〕

気象庁／国土庁の月平均気温メッシュデータを使用した。前報（野上, 1992）とやや重複するが、データについて記述する。気象庁のこのデータの作成方法は、1）従来の知識に基づいて気候区を定め、2）その気候区の中の観測所の既存観測値をDEMから導かれる多数の地形因子項で線形多重回帰する式を求め、3）それをを用いてその気候区内の全てのメッシュの気候値を推定する、というものである（北村, 1990）。このとき使われた標高値は国土地理院の3次メッシュDEMであり、それは3次メッシュを1/4細分したメッシュのDEM（約250 m 間隔）から5×5個の点の平均値として得られたものである。

前に述べたように緑の国勢調査は3次メッシュの中央部の小面積に対するサンプリングによっており、その中心点の標高値と平均値である3次メッシュ標高値とは等しくない。気温は標高値の変化に敏感であるから、各群落と気温の関係をみる場合はこの植生サンプリング中心点の気温の方が望ましい。この点の気温を次のようにして求めた。

約38万点ある3次メッシュのそれぞれについて、注目点の周囲を含む3×3=9個の点の月平均気温を標高値で直線回帰する式の係数を最小自乗法で求めた。この回帰式にサンプリング中心点の標高値を代入することで、その点の気温が得られる。このようにして12カ月分のファイルを作成した。緑の国勢調査のデータとクロスさせて用いる月平均気温のデータとしては気象庁／国土庁のもとのデータは用いず、この「中心点気温データファイル」を用いることにする。以上のようにして、250 m メッシュの精度で植生・気候・標高のデータが揃い、以後の分析が可能となった。

この月平均気温の中心点データファイル（12カ月分）から吉良の暖かさの指数（WI）を計算した。これは毎月の平均気温（°C）から5を減じてこれが正ならば加算するという方法で算出される値で

ある。吉良のWIは日本の自然植生帯の地理的配列を説明する指標としてしばしば使われてきたが、詳しいことは前報（野上・大場, 1991）で述べた。WIはゾーンスウェイト法の可能蒸発散量（年値）と非常に良い相関があり、この2つの量はいずれも正味放射量の近似であると考えられる（野上, 1990）。正味放射量は植物の生産量を支配する第一の要因であり（Uchijima *et al.*, 1992）、WIを植生分布の支配要因として用いることの妥当性の根拠となっている。

月平均気温が2°C上昇した時と、同じく7°Cと1.5°C低下した時のWIを計算した。これらの値は炭酸ガス2倍気候と最終氷期極相気候、あるいは数世紀前の小氷期の気候を想定したものである。GCM（地球気候モデル）の出力結果によれば一般に気温変化の幅は地球規模では、高緯度側ほど、また夏より冬の方が大きい。しかしこのデータは空間解像度が低く日本列島の地域差を明らかにするようなデータではないので、ここでは各月の平均気温が緯度によらず、また季節によらず一律に変化したという仮定を採用している。

〔地形特性〕

植生の分布が局地的な斜面の傾斜やその方位によって影響を受けていることは、しばしば観察されることである。そこで傾斜・方位を全国について250 m-DEMから計算した。3次メッシュの植生データのサンプリング中心点と合うように、この傾斜・方位ファイルから4点ごとにサンプリングして新しいファイルを作成した。なお250 m-DEMのメッシュ（グリッド）間隔は東西と南北で異なり、さらに東西間隔は緯度によって変化する。従って傾斜や勾配の計算ではそれに起因する誤差、すなわち方位ごとのピクセル数（面積）がこのことによって実際と異なる可能性が生じる。しかしこの補正はせずに計算を進め、傾斜帯ごと8方位ごとに各樹林の出現頻度を求めるとき、各方位ごとの面積率で除算して基準化することでこの誤差を軽減することにした。

ゾーンスウェイト法の月可能蒸発散量と月降水量を比較してみると、日本では夏季に著しい乾燥が持続することはないことがわかる。従って日本

表 1 暖かさの指数に対する分布域 北海道（黒松内低地以北）、寒い方からの積算頻度値で示す。

Table 1 Distribution of vegetation communities for warmth index in areal cumulative percentages (Hokkaido)

区分番号と名称	群落コード上 3 桁	1 %	5 %	10%	25%	75%	90%	95%	99%
11 高山低木林（ハイマツ）	101	8	11	13	16	26	31	35	47
12 風衝植生	102	6	7	10	13	29	37	41	51
13 雪田植生	103	7	8	10	14	24	51	52	54
21 常緑針葉樹林	201, 202, 204	24	28	31	36	47	52	60	60
22 上部落葉広葉樹林	206, 208, 304	18	23	26	31	43	47	49	54
32 針広混交林	426	37	41	43	46	53	56	58	62
43 エゾイタヤ・ミズナラ林	403	36	43	46	50	58	61	62	66
44 その他の落葉広葉樹林	411-416	44	48	49	51	58	62	64	67
51 ミズナラ・カシワ林	502	46	49	50	53	59	61	62	63
53 シラカンバ林	505	41	46	48	50	55	57	60	63
71 常緑針葉樹植林	901	39	43	45	49	56	59	61	64
72 落葉針葉樹植林	902	42	47	49	53	59	61	63	66
85 畑	913, 914	50	54	55	57	61	64	66	69
86 草地	915	46	48	49	51	57	60	62	66
101 水田	916, 917	57	58	59	61	65	67	68	69
111 市街地・住宅地	1,2	47	50	53	58	67	68	69	70

の植生の分布が乾湿に支配されていることは少ないと考えられるが、山地や丘陵の尾根型斜面（落水線が発散する）と谷型斜面（落水線が収束する）とで植生が異なることも多い。これは土壌水分を始め土壌そのものの特性が異なることの反映であろう。そこで地形高度のラプラシアン（勾配の変化率、すなわち凹凸の程度あるいは落水線の収束・発散の程度を示す）を全国について 250 m-DEM から計算し、傾斜・方位の場合と同じ手続きで植生ファイルと対応する新しいファイルを作成した。

III. 現在の気候成帯的植生帯

日本の植生帯については古くから多くの研究があるが（例えば、山中，1990，p. 24），ここではシミュレーションのモデル（分布の閾値）を得る目的で緑の国勢調査の群落データと WI を用いて独自に次のようにして植生帯を設定した。

まず緑の国勢調査の群落分類で、主要な、すなわち分布面積の広い群落のグループ（区分，表 1，2）を選び出し，WI に対する出現頻度分布（%）を求めた。これは WI 軸に沿って積分すれば 100

になるような曲線として得られている。表 1，2 にはそれぞれの区分の頻度曲線分布（正規分布に近い形のものが多い）で，その積算値が 1%，5%，10%，25%（別の方向から積算すれば，99%，95%，90%，75%）になる WI の値を載せた。

なお北海道の黒松内低地の南北で，ブナ林や針広混交林などをはじめとする樹林の分布に大きな差異があるので，ここを境にして日本列島を 2 つに分けて集計を行なうことにした。

〔WI に対する針葉樹林の分布〕

最初に針葉樹林だけを取り出して，WI に対する分布域を調べてみた。日本では十分な高さの山がないため該当メッシュ数が不十分で，ハイマツ低木林の分布上限（寒い方の限界）がどこにあるのかははっきりしない。北海道（黒松内低地以北をさす。以下同じ）では，ハイマツ低木林と針葉樹林（エゾマツ，トドマツ）の WI に対する分布域は隣接している（接してはいるが重なってはいない）。しかし，本州など（黒松内低地以南を含む。以下同じ）ではハイマツ低木林の方が広い分布域を持ち，針葉樹林（オオシラビソ，シラビソ，コメツガ，シコクシラベ）の分布域とかなり重なっ

表 2 暖かさの指数に対する分布域 全土（黒松内低地以北の北海道を除く）、寒い方からの積算頻度値で示す。

Table 2 Distribution of vegetation communities for warmth index in areal cumulative percentages (Honsyu, Shikoku and Kyusyu Islands)

区分番号と名称	群落コード上3桁	1%	5%	10%	25%	75%	90%	95%	99%
11 高山低木林（ハイマツ）	101	15	18	19	22	38	53	57	62
12 風 衝 植 生	102	10	15	17	22	50	58	63	79
13 雪 田 植 生	103	18	20	22	30	39	44	47	50
21 常緑針葉樹林	201, 202, 204, 205	23	27	30	34	44	48	51	58
22 上部落葉広葉樹林	206, 208, 213, 304	20	25	29	36	49	53	57	63
31 冷温帯針葉樹林	404-408	38	45	49	55	70	75	80	95
41 ブナ林（チシマザサ）	401	43	46	49	55	67	74	78	86
42 ブナ林（スズタケ）	402	43	48	51	58	75	82	85	94
43 エゾイタヤ・ミズナラ林	403	45	50	55	59	70	74	78	79
44 その他の落葉広葉樹林	409-416	46	53	57	62	78	90	98	104
51 ブナ・ミズナラ林	501, 502	50	55	59	64	78	83	86	92
52 コナラ・クリ・ミズナラ林	503, 701	53	63	68	77	98	109	114	124
53 シデ・シラカンバ林	504, 505	45	52	56	72	93	100	105	112
54 アカマツ林	506, 618, 710, 735	66	78	86	96	114	121	124	132
55 タブ林・シイ・カシ萌芽林	614, 702	90	100	104	114	132	139	145	171
61 カ シ 林	606-613	99	109	114	122	158	192	197	204
62 アカガシ・ウラジロガシ林	603, 604, 617	83	90	94	103	135	144	155	179
63 針 葉 樹 林	601, 602	66	71	75	83	100	110	117	130
71 常緑針葉樹植林	901	57	66	71	81	112	124	131	143
72 落葉針葉樹植林	902	41	47	51	56	69	76	80	87
81 常緑果樹林	908	109	115	118	123	132	137	140	151
82 落葉果樹林	909	75	79	80	85	114	122	127	132
83 桑 園	910	78	84	87	93	115	117	122	132
84 茶 園	911	88	104	108	114	128	132	139	148
85 畑	913, 914	61	69	75	87	126	140	154	206
86 草 地	915	50	57	60	70	111	121	127	158
101 水 田	916, 917	72	80	84	93	122	130	134	144
111 市街地・住宅地	1, 2	71	83	90	107	127	133	138	187
112 工 場 地	3	74	92	107	115	129	134	136	144
113 造 成 地	4	64	76	85	102	123	131	135	152

ている。すなわち現地におけるこの境（森林限界）は局地的な条件によって決まっていると推定される。

北海道では、針葉樹林と針広混交林は連続した分布域を持っている。本州などでは冷温帯針葉樹林（ヒノキアスナロ、クロベ、ヒメコマツなど）、温帯針葉樹林（モミ、ツガなど）、クロマツ林とそれぞれ分布域が隣接している。しかしリュウキュウマツ林だけは離れている（間に針葉樹林が分布しない WI 帯域がある）。なおアカマツの自然

林ではコードの 408 と 618（緑の国勢調査データのコードの上3桁、以下同じ）は区別する必要はない（WI 帯域がほとんど同じである）。二次林のアカマツ（506, 710, 735）は本州南西部に広く分布する。

〔WI に対するそれぞれの樹林の分布〕

ハイマツ低木林と雪田植生・風衝植生の分布域はほとんど重なっている。温度（WI）からはハイマツ低木林の分布が可能な帯域であっても、雪田植生あるいは風衝植生となっているのは局地的

な条件のためである。またハイマツ低木林の下限（針葉樹の樹木限界）付近で積雪が多いと後述するように、ハイマツ低木林や針葉樹林ではなくダケカンバ林（上部落葉広葉樹林）が現われやすい。すなわちこの WI 分布域ではハイマツ低木林だけを成帯的植生であるとする。ここで成帯的という言葉は温度環境によってマクロな分布が決まっているという意味で用いており、明示的に気候成帯的と言うこともある。積雪はマクロに見れば気温に支配されているが、同じ温度環境であっても積雪深や持続期間には地域差が大きいので、積雪の影響を受けた分布現象を気候成帯的とは言わないことにする。雪田植生は日本海側高山に多い。雪田植生と風衝植生は山頂付近の自然条件に対応する代償植生である。

北海道のトドマツ・エゾマツ林（と多雪対応型のアカエゾマツ林）、本州などのシラビソ・オオシラビソ・コメツガ林などをまとめて（亜高山帯）常緑針葉樹林、あるいは単に針葉樹林と呼ぶことにする。この樹林の WI 分布域は上部落葉広葉樹林（ダケカンバ）の分布域と重なっている。針葉樹林は多雪だとダケカンバ林に置き替わっていることがその分布からわかり、針葉樹が積雪に弱いことと対応している。以上の記述は積雪・標高・植生群落コードのメッシュマップを CRT に表示して観察し、さらにクロス集計して統計的に確かめた結果であり、従来の知見とも矛盾しない。以下の記述も同様な根拠によっている。

針葉樹林の下位（暖かい方）には、本州などではブナ・ミズナラなどを主とする落葉広葉樹林（自然度の高い樹林のみを対象とする。以下同じ）がくる。この樹林の WI 分布域は本州ではウラジロモミ・ヒノキアスナロ・クロベ（これは多雪対応型）・ヒメコマツなどからなる冷温帯系の針葉樹林の分布域とほとんど重なっている。しかしこの WI 分布域では冷温帯系の針葉樹林は劣勢で分布面積は狭い。北海道では冷温帯系の針葉樹林は分布せず、エゾマツ・トドマツとエゾイタヤ・ミズナラが混生する針広混交林が広く分布することは前述した。

ブナは積雪深の大きいところで分布を広げてお

り、ダケカンバと同じように多雪対応型の落葉樹と考えられる。その意味でブナは陰樹で極相林を作るとは言っても、ブナ林、特に林床にチシマザサを持つブナ林は多雪という特殊条件の地域（ただし現在は広い面積を占めているが）に成立している局地的な極相林としての性格が強い。

最終氷期以後の海面上昇によって日本海に暖流が入るようになり、それによって生じた多雪帯（日本海に面する丘陵や山地の中腹）を伝わるようにブナが北上して分布を広げたとされている（安田，1990，p. 148）。その北進は黒松内低地の暖かさのために阻まれ（野上・大場，1991），ブナに適した北海道島主要部の多雪地はダケカンバやナナカマドなど他の落葉広葉樹によって占められている。分布の普遍性から見て、北海道のエゾイタヤ林、本州のミズナラ林は成帯的な植生帯を形成している。エゾイタヤ林とミズナラ林は WI 分布域がやや離れており、ブナ林がその中間を占めている。

落葉広葉樹林の下位にはシイ・カシなどの照葉樹林がくるとされている。アカガシやウラジロガシは耐寒性のあるカシであり、分布域が寒い方に広がっている。しかし、照葉樹林（萌芽林を含む自然林）がブナ林やミズナラ林と直接接しているところは多くはない。従って、そこに別の植生帯（中間温帯林）を置くなどの解釈が行なわれている。中部地方から九州までの、照葉樹林もブナ・ミズナラ林も分布しない広大な地帯を中間温帯林としたとき、その成立条件を冬の寒さ（たとえば1月の平均気温）だけに求めることは困難である。なぜなら中間温帯林の代表的樹種とされるモミ・ツガなどの温帯系の針葉樹林が、統計的扱いでは無視せざるをえないほどの小面積にしか分布していないからである。実際にそこを埋めているのは2次林のコナラ林とアカマツ林である。

広大な面積に分布するにもかかわらず、コナラ林を極相林として認めないのはそれが陽樹であることによる。照葉樹林を伐採しても、ブナ林を伐採してもコナラ林となることが知られている。しかし現在のコナラ林の全てが照葉樹林とブナ林の伐採などによって生じた2次林であるとするのは

表 3 日本の森林植生帯と暖かさの指数
Table 3 Forest vegetation zones and warmth index

気候成帯的森林植生帯	WI 閾値	代償植生 (その原因)
高山低木林 (ハイマツ)	— 23 —	高山草本植生 (雪田・風衝)
常緑針葉樹林 (トドマツなど)		ダケカンバ林 (多雪)
落葉広葉樹林 (ブナ・ミズナラ・エゾイタヤなど)	— 45 —	ブナ=チシマザサ群落 (多雪)
	(74)	
中間温帯林 (モミ・ツガなど)	— 92 —	コナラ林・アカマツ林 (気候変化・人為)
常緑広葉樹林 (シイ・カシなど)	(117)	コナラ林・アカマツ林 (気候変化・人為)

(北海道の針広混交林は漸移帯であるとしていずれにも含めず、ブナ=チシマザサ群落は分布面積が広いので成帯的落葉広葉樹林に含めてWI 閾値を計算している.)

無理であろう。コナラ林はブナ林と較べてはるかに多様な環境条件 (温度および雪の多寡) のところに分布を広げており、人為の影響の少ない樹林がかなり存在すると思われる。

最終氷期以後の気候温暖化によって生じた、南方系の樹林に適した生活空間は、コナラ林によってまず先駆的に占められてしまい、そのコナラ林を駆逐しながら照葉樹林がゆっくり北上しているときに、縄文時代となり (安田, 1990, p. 157), 人間によって分布の拡大が制限されてしまった, という仮説が考えられる。現在の高山・亜高山の植生は気候変動に対して分布域の垂直移動で対応できたが (水平移動距離は小さい), 山麓部・平野部の植生は遠距離の水平移動を必要とした。そこで移動速度の遅いものは速い気候変動に対応できないという可能性が生ずることになる。ここではコナラ林 (自然林) をこのような気候変動に起因する代償植生とし, 本来の中間温帯の帯域をこの代償植生が占めているのだと解釈している。

北海道の針葉樹林や落葉広葉樹林 (エゾイタヤ林), 本州島北部のブナ林, 南西部の照葉樹林など氷期以降の気候変動によって遠距離の水平移動を強いられるものについては, その時間的変遷の歴史を花粉分析のデータを用いてさらに多くの地域で意識的に検討してみる必要があるのではないだろうか。すなわち分布論から導かれる仮説をさらに別の角度から実証する必要があるだろう。

以上のような検討をふまえ, 自然植生 (緑の国勢調査のデータで自然度 9 または 8, 一部 7 を含む) を気候成帯的樹林と特殊な自然環境に対応する代償植生など (人為に起因する自然度の高い代償樹林を含む) に分類した (表 3)。この統合・分類手続きでは群落コードとその WI に対する分布特性だけを用いているが, 従来の森林植生帯の分け方 (山中, 1990, p. 34) とも大筋において矛盾しない。この小論ではブナ=チシマザサ群落を気候成帯的植生とはせず, 多雪による代償植生とみなしていることだけが異なる。

表 3 でそれぞれに区分された植生は温度条件 (WI) に対して独自の生活空間を持っており, 植生帯と呼ぶことができる。そのうち気候成帯的植生とは WI に対応して分布している植生をさし, 自然補償植生とはその枠組みの中でそれ以外の特殊な自然条件に対応している植生 (具体的には, 雪田・風衝植生, 多雪地のダケカンバ林とブナ林) と環境変動によって新たに生じた生活空間 (ニッチェ) を先駆的に埋めている植生 (具体的にはコナラ林) をさしている。

気候成帯的植生帯を分けている閾値が表 3 に示されている。ここで閾値とは予め決めた幅 (ここでは 1) の WI に対して, 隣接する 2 つの植生帯が占める面積が等しくなるとき, その WI を 2 つの植生帯を分ける閾値として定義している。表 3 の閾値は次のようにして求めた。

ハイマツ低木林と針葉樹林の面積が等しくなる(すなわち針葉樹の森林限界の) WI の値は 23 であり、これは北海道でも本州でも同じ値である。

針葉樹林と落葉広葉樹林の閾値については、区分の仕方によって値が異なる。北海道では針広混交林を針葉樹林に統合すると、WI = 50 であるが、広葉樹林に算入すると 42 となる。どちらにも算入しないと 45 である。一方、本州などでは、多雪対応型のブナ=チシマザサ群落を代償植生として扱うと(すなわち気候成帯的落葉広葉樹林に算入しないと)、WI = 49 となり、これを算入すると 45 となる。野上・大場(1991)では、針広混交林を漸移帯であるとして除外し、ブナ=チシマザサ群落を成帯的落葉広葉樹林に含めたので、日本全土(北海道を含む)の値として 45 が採用されている。

落葉広葉樹林と常緑広葉樹林(照葉樹林)の接触はわずかであるが、その閾値は WI = 92 である。この閾値を中心に 5% および 95% 積算値で 63 から 114 にかけて、2 次林とされるコナラ林が分布している。この帯域は気候成帯的植生帯としては中間温帯林であるが、本来の植生である温帯系の針葉樹林(ツガ、モミ)は分布が狭く、それに替わってコナラ林が落葉広葉樹林帯の下部(暖かい方)から常緑広葉樹林の上部まで広い面積を占めている。同じく 2 次林であるアカマツ林はコナラ林より暖かい方に寄った分布域を持っている。

コナラ林と常緑広葉樹林の面積が等しくなる WI の値は 117 である。いっぽう コナラ林と落葉広葉樹林の面積が等しくなる WI の値は 68 または 74 である。ここで 68 はブナ=チシマザサ群落を成帯的落葉広葉樹林に算入しない場合であり、74 は算入した場合である。ここでは WI = 74 を採用する。

ここで述べた閾値(表 3)はあとで気温変化の影響のシミュレーションを行なうとき基準となる値として使用される。ただ WI = 74 と 117 はコナラ林との閾値であって、中間温帯林のそれではないが、中間温帯林の推定閾値として、仮にこの値を採用している。

IV. 局地的地形条件の影響

局所的な地形条件(斜面の方位と傾斜の大きさ)と植物群系の分布の対応関係を調べてみた。方位は N から 45° おき、すなわち 8 方位に区分し、傾斜の大きさは約 1/2, 1/4, 1/5, 1/10, 1/20 を閾値としてクロス集計を行なった。以下の記述はその集計結果に基づいている。

ハイマツ低木林は NW-SW-SE に多く分布し、反対側には非常に少ない。ハイマツは厳冬期には積雪で保護される必要があるにもかかわらず、消雪が遅れるようなところ(NE 側)には分布できないことを反映しているのであろう。ダケカンバ林は SE 側にやや多く、N-NE に少なく分布する。針葉樹林はハイマツ林と同じ傾向を示し NW 側に多く、E 側に少ない。このことは立山周辺でリモートセンシングデータによる分析で確かめたこととほぼ合致しており(加藤・野上, 1990)、このような特徴的な分布傾向は雪に対する特性から生ずるのであろう。

同じ落葉広葉樹林でもエゾイタヤ林は E 側に、ブナ林は NW 側に多く分布する。ミズナラ林は傾向がはっきりしない。温帯系の針葉樹林は SW 側にはあまり分布しない。コナラ林は分布の傾向がはっきりしない。照葉樹林は S 側に多く N 側には少ない。アカマツ林も同様である。上記のように方位が樹林の分布に影響するのは勾配が 1/5 位までであって、1/5 以下の緩斜面になると方位の影響は見られないか弱い。

標高値のラプラシアンはそこが凸斜面(尾根型)であるか凹斜面(谷型)であるか、またその程度を示す指標である。当然のことながら風衝植生は凸斜面に、雪田植生は凹斜面に分布する。ハイマツ林は凸斜面に広く分布し凹斜面では少ない。アカマツ林は平らな斜面に広く分布し、谷筋にはあまり分布しない。エゾイタヤ林とコナラ林は斜面が凸→平→凹となるにつれて分布を広げる。針葉樹林とダケカンバ林、照葉樹林はやや平面に近い凸斜面ではあまり分布が広くなく、凸斜面か凹斜面で分布が広いが、凹斜面の方に 2 倍以上も多く出現している。これと同じ傾向をもっと明瞭に示

表 4 現在およびそれと異なる気候下における潜在植生帯の占有面積率（日本全土を 100% とする）

Table 4 Areal Occupation (%) of potential vegetation zones under different climates

	自然植生 (現存)	潜在植生 (現在)	-7°C 低温 (氷期極相)	-1.5°C 低温 (小氷期)	+2°C 温暖 (炭酸ガス 2 倍気候)
高山低木林	0.3	0.8	26.9	1.4	0.6
常緑針葉樹林	4.6	4.6	34.2	14.0	1.2
落葉広葉樹林	12.0	31.8	37.8	34.1	22.1
中間温帯林	0.7	45.3	0.9	46.8	38.4
常緑広葉樹林	1.0	17.5	0.2	3.7	37.7

すのはブナ林とミズナラ林，温帯系の針葉樹林である。

以上のようなそれぞれの植物グループの分布特性は，局地的な地形特性に対するカテナの配列がマクロ的な統計値として現われているのだと解釈される。

V. 気候成帯的植生帯の移動に関するシミュレーションの結果

シミュレーションの手続きは次のようである。まず現在の月平均気温（植生サンプリング中心点対応ファイル）のデータに，変化させる気温の分だけ増減して暖かさの指数 WI を求める。その WI に対して表 3 の閾値を適用することで，気候成帯的植生帯の分布図（推定図）ができる（口絵 3 参照，面積集計は表 4）。それと現在の WI から求めた分布図を重ね合わせることで，現在の植生帯が将来どのように変わるか推定でき，また過去の植生帯（推定）がどのように変わって現在の植生帯となったかがわかる（このような地図を読む作業は言うまでもなくコンピュータの CRT 上で行なっている）。このシミュレーションは現在の植生帯と WI とのスタティックな関係をもとにしているので，どれくらいの時間があれば予想された植生帯の変化が実現するか，その途中ではどうなるかなどということはわからない。シミュレーションの結果は，短期的には変化の方向を予測し，長期的には十分な時間が経過したとき出現する状態（潜在植生）を予測するものである。

2°C の気温上昇：推定分布図から以下のことが読み取れる。北海道を除いてハイマツ低木林はほとんど消滅する。雪田・風衝などに起因する自然

代償植生は残るであろうが，現在の高山植生帯面積の大半は針葉樹林帯に編入される。すなわち現在の高山植生地の広範囲にわたって針葉樹林が進入してくる可能性がある。一方，針葉樹林帯の暖かい方の限界に近いところで現在の面積の大半が落葉広葉樹林に置き替わる可能性が生ずるので，差引で針葉樹林の面積は現在の 1/4 程度に減少する可能性がある。この変化の大部分は北海道で起こる。また紀伊山地・四国山地の山頂部の現在の常緑針葉樹林は消滅する。このことは逆に言えば縄文時代の最温暖期といえども針葉樹林が消滅するほどの暖かさではなかったということになる。ただし山頂近くのレフュージ（待避所）にレリックとして存在していたなら話は別である。

ブナ林の消滅も広範囲で起こるが，両白山地で特に著しい。飛騨山脈・越後山脈などの西斜面の多雪地でもブナ林の消滅が広く起こる。平地における照葉樹林帯の北限は新潟平野・福島盆地まで北上する。この線以南ではコナラやクスギなどの雑木林を現在のように放置しておくことを続けると，照葉樹林化が急速に進むであろう。この傾向は北関東，房総・伊豆半島，濃尾平野北東丘陵地帯，中国地方において顕著となるであろう。

ここで仮定している気温の 2°C 上昇は人によるもので，自然の気候変動とは異なりその変化は急激である（100年以内に起こるとされている）。従って森林植生はそれに適応できないだろうから，実際に生態系にどんなことが起こるのか，予測は難しい。

また，現在は人為によって植生の分布が孤立化しているので，植物は（もちろんそこに住む動物も）これまでのように分布域を移動させることで

気候変動に対応することはできない。急激な気候変動に起因する2次林が広範に出現するであろう。

7°Cの気温の低下：最終氷期最盛期（略して氷期）には気温が現在より約7°Cも低かったとされている。推定分布図から以下のことが読み取れる。北海道では石狩平野や旭川盆地などを除き大部分特に東北海道はほぼ完全に高山植生帯（ツンドラ）と化していた。東北地方の平野部では庄内平野・福島盆地付近までは落葉広葉樹林が残ったが、それ以北ではほとんどが常緑針葉樹に覆われていた。九州島では山地を除き落葉広葉樹林が広く分布し、少なくとも九州島には小さなレフュージュは別として照葉樹林帯は存在しなかった。

氷期から現在への植生帯の移動という見地からみてみよう。現在の高山植生帯は氷期には氷河に覆われていた地域である。氷期に形成された圏谷底の高度は当時の雪線高度の近似値を与えるとされているが、現在の森林限界（すなわち高山植生帯と常緑針葉樹林帯との境界）の高度と圏谷底高度は良く一致する。

現在の針葉樹林帯は氷期には高山植生帯（ツンドラ）であった。すなわち氷期以後の気候の温暖化にともなってハイマツや草本しかないような平野（北海道の場合）や山地に針葉樹が進入して森林が成立していった。温暖な気候帯の樹林と比べて針葉樹林では森林を構成する樹種が少なく、単純な森林構造を持っていることが特徴的とされているが、これは森林帯の成立が若いことの反映であり、大陸氷床が退いたあとを追いかけるようにして北上して成立した北方針葉樹林（タイガなど）と共通の性格であると言える。ただし大陸の北方針葉樹林では、氷期のレフュージュと現在の分布地の距離が数千 km も離れているのに対して、起伏の大きい日本の山地では基本的に垂直移動であるので、水平移動距離は短かくて済む。ただし阿寒や知床の針葉樹林は他と比べて長い距離を移動している。WIの分布からみると、北海道の西の方あるいは十勝平野の中心部に針葉樹林の氷期のレフュージュがあったと推定される。

現在の落葉広葉樹林は、北海道（特に東部）では氷期には主として高山植生帯（ツンドラ）であ

ったところに、東北地方では針葉樹林帯であったところに成立している。北海道東部の平野部では一旦針葉樹林が成立した後に落葉広葉樹林に変わったのか、あるいは直接高山植生から落葉広葉樹林に変わったのか花粉分析などで検証する必要がある。このことによって針葉樹林の移動速度と気候変動の速さを比較することができる。

東北地方では氷期には平野まで針葉樹林となっていたが、氷期後の気候の温暖化によってその生活圏が失われた。しかしそれを決定的にしたのは多雪化であったと考えられる。大量の積雪のために衰弱した針葉樹林を駆逐するようにして、氷期には平地では庄内平野付近まで南下していたブナ林の北限が北上し、黒松内低地帯まで達した。東北地方以南では一般に氷期の落葉広葉樹林帯の上限（寒い方の限界）と現在の落葉樹林帯の下限（暖かい方の限界）は山地で隣接しており、長い水平距離の移動は必要としなかった。

九州島以北の現在の照葉樹林は氷期の落葉広葉樹林帯に成立している。WIの閾値からみる限り、氷期の照葉樹林帯は九州島最南端や種子島でも現われない。氷期には海面が140 m 低下していたとして、その気温は約1°C 高いことになるので（WIでは最大12大きくなる可能性がある）、九州島最南端の氷期の海岸線でようやく WI = 92程度となり、照葉樹林帯の分布域には辛うじて入る（表1、2の1%値で WI = 90）。このことから分かるように、現在の本州島の照葉樹林は水平距離が非常に離れた氷期のレフュージュ（それが具体的にどこであったか特定するのは興味ある問題である）から移動してきているのであり、氷期以降の1万3千年程度の温暖な期間の長さでは、まだ移動が完了してはいない可能性がある。また縄文時代以降は人間の影響力が強くなり、照葉樹林の北上を遅らせたと考えられる。

そのようなわけで、ブナ林やミズナラ林など冷涼な気候と対応する落葉広葉樹林が気候の温暖化によって北上して放棄したが、そこにまだ照葉樹林が到着していないような生活空間が存在することになる。それが中間温帯林帯と呼ばれているものではないだろうか。

この考え方の傍証として次のような事実を指摘できる。前に述べたように局地的地形環境からみてブナ林は南向き斜面よりは冷涼で積雪の多いNW側に多く分布する傾向があり、寒冷気候時のレリック的な分布特徴を示している。それに対して、照葉樹林は温暖な南向き斜面に分布する傾向があり、温暖な土地から寒冷な土地に進出してきたという分布特徴を示している。別の表現をすれば、中間温帯林の境界付近では照葉樹林への遷移の途上にあるか（南方あるいは下限）、ブナなどのレリックが残っているか（北方あるいは上限）であり、まさに中間帯と呼ぶにふさわしい性格を持っているとも言えよう。

現在中間温帯林ではコナラ林やアカマツ林が大部分の面積を占めている。コナラやアカマツは陽樹であり極相林にはならないので、前述したような理由から大きな意味での先駆的な樹林であると解釈される。北進してきた照葉樹林を伐採するとコナラ林になるのは遷移の進行を逆戻しすることになるからであり、ブナ林の南限（あるいは下限）縁辺部でブナを伐採するとコナラ林になるのは結果的にレリックとしてのブナ林を絶滅させることになるからだと解釈される。中間温帯林のクリやコナラ林の移動速度は照葉樹林のそれよりかなり大きいのではないだろうか。

クリやコナラ、アカマツなどは人間と関係の深い樹種である。上述のような理由で気候変動でクリ・コナラ林が広範囲に生じ（先駆的2次林）、それを人間が利用してきた（人為的2次林）。そのような植生が生じやすい中間温帯林の特性とそこへ人口が集中してきたという歴史的経過はお互いに関連が深いと思われる。

1.5°Cの気温の低下：いわゆる小氷期（約300-100年前）は1万3千年頃から始まり現在に至る温暖期の中で最も顕著な寒冷期である。樹木の年齢を考えれば現在に最も強い影響を残している過去であるとも言えよう。小氷期の気温低下とその後の温暖化による植生帯の移動が観察できるかどうかは興味ある問題であり、分布の縁辺部で盛んな幼樹の生育とか樹林の自然更新の停止などの現象が起きている可能性がある。1.5°Cという小さな

気温変動でも、平野部だと対応する森林植生帯の水平移動の距離は大きくなる。

1.5°Cの気温低下は、北海道では宗谷丘陵や根釧原野の全部が針葉樹林帯に入るくらいの寒さであり、本州では関東地方から東海地方・瀬戸内海地方・北九州地方に至る地帯で照葉樹林が消滅するほどの寒さである。寒さに対するセンシビリティからみてこの地帯は照葉樹林帯縁辺部であるといえることができる。ここは現在日本の大部分の人口が集中している地域でもある。照葉樹林帯が残るのは南九州・宮崎平野、四国・紀伊半島の沿岸部である。小氷期とならんで弥生時代も比較的寒冷であったとされているが、現在より1-1.5°C程度の寒冷化の時代には、出雲平野や伊勢平野が照葉樹林の前線地帯となっていた。

VI. おわりに

この小論では気候変動に対する成帯的植生帯の移動という形で、気候変動の影響をスタティックではあるが空間的にとらえてみた。いっぽう花粉分析のデータは時系列的なデータであり、蓄積が多いと言っても空間的には限られたデータである。ある時間断面で空間的に見れば植生帯の分布と移動という植物地理学の問題と、同じ地点で時系列的に見れば環境に対する広い意味の遷移という生態学の問題とを結合させて、伝播速度あるいは遷移速度を取り入れ、花粉分析の成果を初期条件の設定とシミュレーション結果の評価に使えるような新しい動的モデルの構築が望まれる。それによってそれぞれの成帯的植生帯の氷期のレフュージがどこにあったか、その後どのように分布を変化させながら現在に至ったかの動的過程を説明できるようになるだろう。

謝 辞

この研究は文部省重点領域研究「気候変化と文明」の「気候植生の変遷と文明の盛衰」研究班の分担研究として行なわれた。研究代表者安田喜憲教授（国際日本文化センター）に感謝する。日本の植生帯に関しては、前報（1991）の共同著者であった大場秀章教授（東京大学総合研究資料館）によるところが大きい。また意見を頂き英文レジュメを校閲して下さいました Elgene Box 教授

(東京大学生産研究所) に感謝する。なおこの研究で用いたデータは文部省重点領域研究「近代化と環境変化」の「原環境の復元」班で著者が作成したものを用了。原資料を提供して頂いた環境庁・気象庁・国土地理院／国土庁に感謝する。

文 献

- 加藤千葉美・野上道男 (1990) : ランドサット TM データによる立山付近の林相分類とその分布に及ぼす気温と消雪時期の影響. 地学雑誌, **99**, 330-348.
- 北村 修 (1990) : 気候値 メッシュファイルの作成と応用. 地学雑誌, **99**, 594-601.
- 野上道男 (1990) : 暖かさの指数と 流域蒸発散量 —— 気候値メッシュデータによる解析——. 地学雑誌, **99**, 682-694.
- 野上道男 (1992) : 地球温暖化が 農業的 土地利用に与える影響の予測. 地学雑誌, **101**, 506-513.
- 野上道男・大場秀章 (1991) : 暖かさの指数から見た日本の植生. 科学, **61**, 36-49.
- 津沢正晴 (1990) : 自然環境保全基礎調査 (緑の国勢調査). 地学雑誌, **99**, 602-609.
- Uchijima, Z., Seino, H. and Nogami, M. (1992) : Probable shifts of natural vegetation in Japan due to CO₂-climatic warming. In Shiyomi, M. et al. ed.: *Ecological processes in agro-ecosystems*. (NIAES), Yokendo Publishers, Tokyo.
- 矢口 彰 (1990) : 国土数値情報の整備とその発展. 地学雑誌, **99**, 541-549.
- 山中二男 (1990) : 日本の森林植生 (補訂版). 築地書館 223p.
- 安田喜憲 (1990) : 気候と文明の盛衰. 朝倉書店, 358p. (1994年11月14日受理)