

## 北海道育種基本区における気象条件と育種区との対応

森林総合研究所林木育種センター北海道育種場

花岡 創

## はじめに

日本における林木育種は、全国を北海道、東北、関東、関西、九州の5つの「育種基本区」に分け、その育種基本区ごとに「林木育種推進計画」を策定して推進されている。また、各育種基本区は、環境をほぼ同じくすることを概念に策定された「育種区」に分割されている。環境が類似する育種区毎に精英樹系統の選抜・評価を行い、育種区内にそれらに由来する種苗を普及することで、期待されるパフォーマンスが確保できると考えられる<sup>(4,7)</sup>。

育種区の設定において第一に検討されるべき要素は、林木の生育に影響を及ぼす気候型であり、「まず、環境条件の均質性による線引きを設定して多くの樹種に適用し、情報が増えてから訂正をすれば良い」とされている<sup>(4,7)</sup>。現行の育種区に関しては、気候や植生分布等を基に線引きがなされたと言われるが、検討に用いられた具体的なデータや、検討の過程に関しては詳細な記録が残されておらず、再確認を行うことは重要である。また、今後、気候変動が生じた際に育種区の再検討の是非を考える上でも、気象条件と育種区との対応を詳細に理解しておくことが求められる。本研究では、北海道育種基本区内の気候区分の作成を試み、それが同育種基本区内に設定されている3つの育種区（中部育種区、西南部育種区、東部育種区）の境界とどのように対応するかを検証するとともに、気候変動による育種区の見直しの可能性について考察した。

## 材料と方法

## 1. 気候区分の作成

北海道全域について、国土交通省国土政策局国土情報課が公開する国土数値情報の中から平年値(気候)メッシュの3次メッシュシェイプファイルをダウンロードし、解析に用いた。ダウンロードしたデータは全て結合して一つのシェイプファイルとした後、属性テーブルを出力して全メッシュの属性値84要素(メッシュ番号、月別の降水量データ、最高・最低・平均気温、最大積雪深、日射量、日照時間等; 付表1)を抽出した。これらの作業にはArcGISを使用した。抽出したデータのうち、メッシュ番号を除いて全ての気象値を平均0、標準偏差1となるように標準化した上で、主成分分析を行った。本研究では、第1主成分(PC1)から第3主成分(PC3)までの累積寄与率が80%を超えたため、これらの主成分スコアを用いること

とした。全メッシュに対して算出された主成分スコアは、k-means法を用いて2から6分割した。k-means法の計算には、データ解析環境Rのkmeans関数を用いた。最適な分割数(k)をTibshirani(2001)<sup>(6)</sup>の手法に従って検討した結果、k=5が採択されたため、本研究では全メッシュの主成分スコアを5区分し、これを気候区分と定義した。作成した気候区分は3次メッシュデータに結合して地図化し、育種区の境界線との対応を確認した。

## 2. 検定林の生存・成長データと気候区分との関係

本研究では、北海道の主要造林樹種であるトドマツを対象に、生存・成長データと気候区分との対応を確認した。データ解析には、森林総合研究所林木育種センター北海道育種場が1981年に北海道内各地に17ヶ所造成した地域差検定林のデータを供試した。地域差検定林には、北海道内全域から選抜されたトドマツ80精英樹に由来する自然交配の実生苗が共通して植栽されている。これら検定林における20年次の生存率および樹高データを検定林毎にとりまとめ、上記1.で作成した気候区分ごとにグルーピングして傾向を確認した。なお、生存率の計算では獣害や人為害が記録されている個体を除き、また、成長量の計算では回復が見込めない程度の被害や極端な被圧が生じていた記録のある個体を除いた上で、全家系・全個体のデータを用いて計算した。

## 3. 気候変動後の気候区分の作成

WorldClim (<http://www.worldclim.org/>)にて公開されている現行の気象データおよび、3つの二酸化炭素排出シナリオ(rcp2.6, rcp6.0, rcp8.5)に対するMIROC-ESMによる2061年から2080年までの気候の予測平均値の30seconds解像度データ(おおよそ3次メッシュに対応)をダウンロードし、解析に用いた。WorldClimで公開されているデータでは、気温と降水量に関する19変数のみが利用可能となっており、本研究では、メッシュ毎の年平均気温、気温の季節性(気温の標準偏差×100)、最暖月3ヶ月の平均気温、最寒月3ヶ月の平均気温、年降水量、最暖月3ヶ月の降水量、最寒月3ヶ月の降水量、降水量の季節性(降水量の標準偏差×100)を抽出して以降の解析に用いた。まず、上記1.と同様の手法で気象8変数による主成分分析を行い、k-means法で主成分スコアを5区分することで気候区分を作成した。また、rcp2.6, rcp6.0およびrcp8.5の3つの二酸化炭素排出シナリオに対応する8変数の値を現行の気象データに基づいて作成した合成変数に当てはめて主成分スコアを求めるとともに、その座標値が現行のどの気候区分に属するかを求め、気候変動後

に現行の気候区分の分布がどのように変化するかについて地図化した。

### 結果と考察

#### 1. 気候区分の作成

主成分分析の結果, PC1, PC2, PC3 の寄与率はそれぞれ 39.7%, 26.3%, 14.3%となり, 3 軸の累積寄与率は 80.3%となった。各気象要素の固有ベクトルを付表 1 に示す。大まかな傾向として, PC1 により気温が, PC2 により日射量や日照時間が, PC3 で降水量が特徴付けられるような傾向となった。各メッシュポイントの PC1 から PC3 の主成分スコアを k-means 法で 5 分割した結果を図 1 に示す。大まかな傾向をとらえると, 気候区分 1 は寒冷多雪な地域, 区分 2 は寒冷な地域, 区分 3 は北海道全体として見たときに中庸な気象条件の地域, 区分 4 はやや温暖かつ日射量の多い地域, 区分 5 は区分 4 よりもさらに温暖かつ夏季の日射量の多い地域というような特徴となっていた。

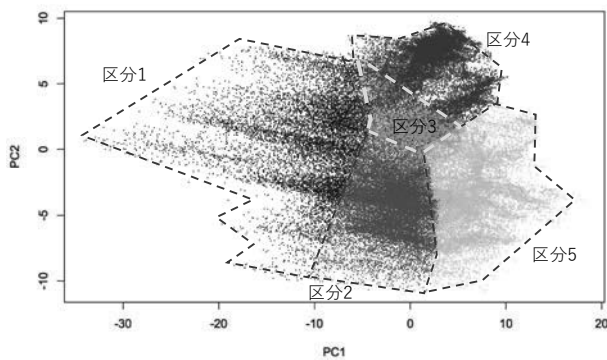


図 1: PC1 および PC2 の主成分スコアと k-mean 法による区分の結果。波線は区分のおおまかな境界を示す。

図 1 の分け方をメッシュ番号と結合して地図化した結果, 区分 1 は日高山脈および大雪山周辺に, 区分 2 は中部育種区の大部分に分布した。区分 3 は主に東部育種区の北側地域に, 区分 4 は東部育種区の南側地域に分布し, 区分 5 は主に西南部育種区の一部の高標高地以外の地域に分布するような区分けとなった (図 2)。育種区の境界線は基本的に区分 1, 2 とその他の区分とを分けるような形で線引きされており, 概ね気象条件の大きく異なる地域を, 行政区界に合わせて的確に分けることができていると考えられた。

#### 2. 検定木の成長データと気候区分との関係

17ヶ所のトドマツ検定林が上記 1. で作成したどの気候区分に属するか確認したところ, 気候区分 1 から 5 にそれぞれ 1, 4, 2, 5, 5ヶ所の検定林が属していた。生存率については, 台風や豪雪など局所かつ単発的なイベントによる死亡率の変動等も生じ得るため解釈に注意が必要と考えられるが, 供試した 17 検定林における 20 年次の生存率は, 気候区分 1 に属する検定林で 47.7%, 同様に区分 2 で 40.0%, 区分 3 で 64.5%, 区分 4 で 60.7%, 区分 5 で 48.0%

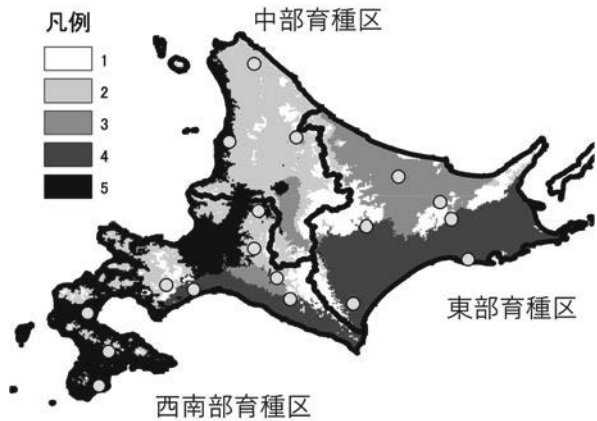


図 2: 作成した気候区分の分布と育種区の境界線。太い線は育種区の境界を, 丸は検定林の位置を示している。

となり, 区分 3, 4 で比較的生存率が高く, 区分 1, 2, 5 でやや低くなる傾向が見られた。樹高 (平均±標準偏差) については, 気候区分 1 に属する検定林で 6.1m (1 検定林のみのため標準偏差なし), 区分 2 では 6.3m±1.0m, 区分 3 では 8.5±1.0m, 区分 4 では 7.4±1.3m, 区分 5 では 7.6m±1.1m となった。

いずれの気候区分においても樹高の標準偏差は同様に 1 m 程度となり, 気候区分 3 で特に樹高が高く, 区分 1, 2 で樹高が低い傾向が見られた。

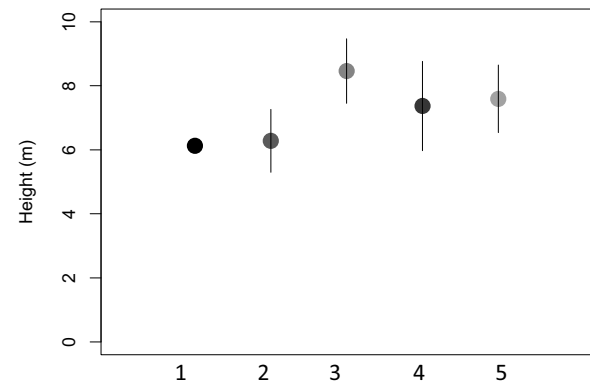


図 3. 気候区分 1~5 に属する検定林から算出した平均樹高と標準偏差

今回作成した気候区分は, 主に気候区分 1, 2 と 3, 4, 5 間で生存率や成長量に一定の差が検出される形となった。北海道のトドマツでは, 2000 点近い人工林データから地位指数を推定する研究が複数実施されており, 総合振興局あるいは振興局別に地位指数を推定した試みでは, 主に石狩, 渡島, 空知, 上川, 日高, 十勝 (総合) 振興局管内で比較的樹高成長に優れること, 根室および宗谷振興局管内で比較的樹高成長に劣ることを示している<sup>(5, 10)</sup>。津山ら (2017)<sup>(9)</sup>は 1400 点以上のトドマツ人工林の成長データとの気象条件等を用いてトドマツの造林適地の推定を試み, 温暖で夏季の降水量が多い地域で成長に優れ, 造林適地であると結論付けている。同研究で造林への好敵度が高いと推定されている地域は, 本研究の気候区分 3, 4, 5 の地域とも概ね対応していた。これらのことから,

本研究で作成した気候区分は、気象条件の大きく異なる地域を区分することに加え、その区分は成長や生存率に一定の差が生じる水準であることを確認できた。

### 3. 気候変動後の気候区分の作成

WorldClim から入手した気象 8 因子を用いて主成分分析を行い、各メッシュの主成分スコアを k-means 法を用いて 5 区分した結果を図 4 に示す。主に年平均気温、最暖月および最寒月 3 ヶ月の気温が PC1 によって（負の方向で高気温）、年降水量および最寒月 3 ヶ月の降水量が PC2 によって（正の方向で多雨）特徴付けられた。また、気温の季節性が大きい地域では PC1 と PC3 の両方が正の値となり、最暖月 3 ヶ月の降水量が多い地域は PC1 で正かつ PC3 で負の値をとるといった特徴となった。

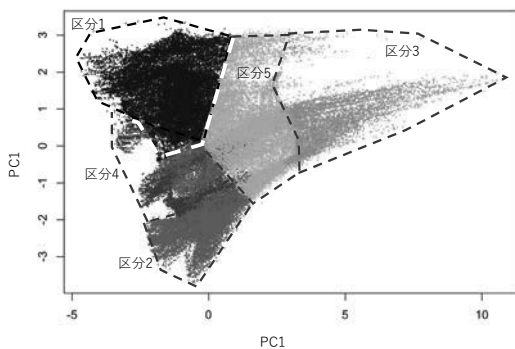


図 4. WorldClim データによる PC1 および PC2 の主成分スコアと k-mean 法による区分の結果。破線は区分のおおまかな境界を示す。

この気候区分を地図化した結果を図 5a に示す。積雪深や日射量、日照時間に関する因子が解析に入っていないため、図 2 とはやや異なる気候区分の分布となっているが、おおまかに 3 つの育種区との対応は維持されていることが確認できた。3 つの二酸化炭素排出シナリオ (rcp2.6, rcp6.0, rcp8.5) における気象 8 因子の値を、現行の気象データに基づいて作成した合成変数(図 4)に当てはめたところ、全メッシュの主成分スコアは rcp2.6 の場合は PC1, PC2, PC3 方向にそれぞれ平均-1.54, 1.17, -0.71 移動した。同様に rcp6.0 の場合は PC1, PC2, PC3 方向に平均-2.10, 1.52, -0.53 移動し、rcp8.5 の場合は PC1, PC2, PC3 方向に平均-2.69, 1.88, -1.23 移動し、気温と降水量の上昇傾向を示した。それぞれのメッシュ点の移動先の座標が、現行の気候モデル (図 4) におけるどの気候区分に属するか確認して地図化した結果を図 5b, c, d に示す。用いる二酸化炭素排出シナリオにより程度は異なるが、いずれのシナリオにおいても、主に西南部育種区で優占する気候区分 (図 5a 上の気候区分 1) が中部育種区及び東部育種区の西側にまで拡大するパターンが示された。この結果は、北海道西南部のような比較的温暖な気象条件の領域が広がることを予測しており、現行の育種区と同様の根拠の線引きを維持したいと考えた場合には、育種区の見直しが必要となることを示唆している。今後、気候変動が実際にどのように進行するかは不明であるが、本研究で作成した気候区分(図 2)が現行の育種区と良い対応をしていたことから、同主成分分析の合成変数に将来

のその時々々の月別の各種気象値を当てはめることで、現行と同様の根拠となる線引きを検討することが可能となるであろう。

林木の成長は一般的に気象条件によって変動し、また、気象への応答性についても一定の遺伝変異が見られる。トドマツにおいても、耐凍性や成長に関する遺伝変異が示唆されており<sup>(2,3)</sup>、また、母性遺伝するトドマツのミトコンドリア DNA を解析した結果では、異なる育種区に属する集団間で遺伝変異が検出されている<sup>(4,5)</sup>。これらの結果は、それぞれの育種区に分布するトドマツに一定の遺伝的分化があることを示唆しており、異なる気象条件への適応性にも変異が存在する可能性がある。本研究で解析に用いた地域差検定林は、全道から選抜された精英樹に由来する実生苗が植栽されており、試験地 (環境) と家系の交互作用についても検討が可能である。種苗配布のあり方や、育種区のあり方をより詳細に検討するためには、環境応答性に関する遺伝変異や地理的変異について詳細に明らかにしていくことが求められ、これは今後の取り組むべき課題である。

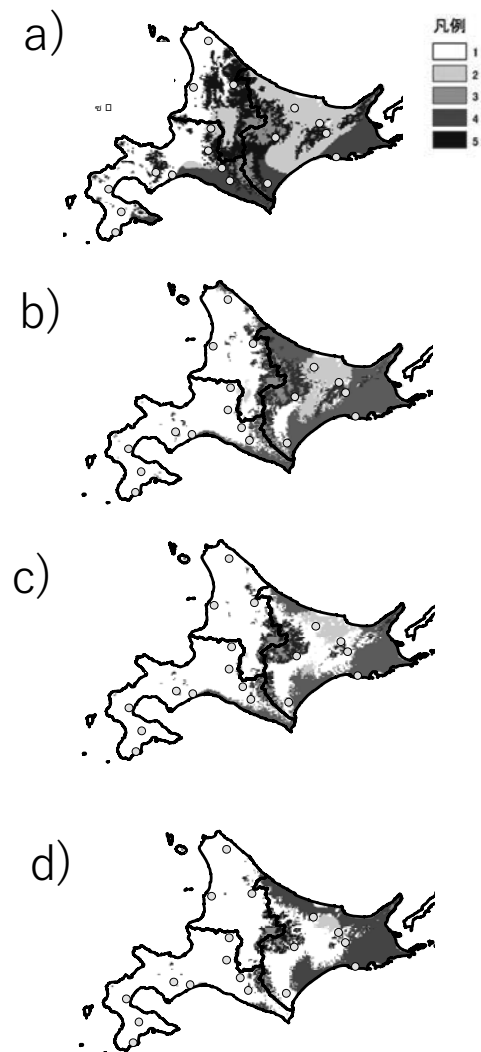


図 5: 現行の気象値から推定した気候区分 a)と、シナリオごとの気候変動後の気候区分(b: rcp2.6, c: rcp6.0, d: rcp8.5)。太い線は現行の育種区の境界線。

謝辞

本稿執筆にあたり、森林総合研究所林木育種センター 関西育種場の久保田正裕氏、三浦真弘氏には多くの助言をいただいた。また、本研究では、森林総合研究所林木育種センター北海道育種場が所有する検定林データを利用した。貴重な試験地を設定し、データを積み上げてきてくださった全職員に感謝する。

引用文献

- (1)林英司, 生方正俊, 飯塚和也, 板鼻直榮 (2002) 北海道におけるトドマツのオルガネラ DNA 多型の遺伝的分化. 林木育種センター研究報告 18: 13-23
- (2)Ishizuka W, Ono K, Hara T, Goto S (2015) Influence of low- and high-elevation plant genomes on the regulation of autumn cold acclimation in *Abies sachalinensis*. *frontiers in Plant Science* 6: doi: 10.3389/fpls.2015.00890
- (3)石塚航, 小野清美, 原登志彦, 後藤晋 (2015) 北方針葉樹 トドマツの低温への適応: 耐凍性獲得のタイミングと遺伝的変異. *低温科学* 73: 81-92
- (4)久保田正裕 (2015) 育種区と種苗配布区域について. *森林遺伝育種学会* 4: 12-15
- (5)滝谷美香 (2014) トドマツ人工林の地位指数曲線の改定. *北海道林業試験場報告* 51: 7-11
- (6) Tibshirani R, Walther G, Hastie T (2001) Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic. *Journal of Royal Statistical Society* 63: 411-423
- (7) 戸田良吉(1978) 新林木育種講座-育種区-. *林木の育種* 106: 37-40
- (8) Tsumura Y, Suyama Y (1998) Differentiation of mitochondrial DNA polymorphisms in population of five Japanese *Abies*. *Evolution* 52: 1031-1042
- (9) 津山幾太郎, 石橋聡 (2017) トドマツ人工林の造林適地をマップ化する. *森林総合研究所成果選集 2017 年版*: 20-21
- (10) 山根玄一 (1983) 立地条件からみたトドマツ人工林の生長の地域性. *光珠内季報* 55: 1-6

付表 1. 解析に用いた気象因子と主成分分析の固有ベクトル

属性名	変数名	PC1	PC2	PC3
G02.001	meshコード			
G02.002	1月降水量	-0.006	-0.154	-0.140
G02.003	2月降水量	-0.022	-0.152	-0.153
G02.004	3月降水量	-0.048	-0.066	-0.209
G02.005	4月降水量	-0.039	0.018	-0.252
G02.006	5月降水量	-0.023	0.074	-0.233
G02.007	6月降水量	-0.019	0.109	-0.206
G02.008	7月降水量	-0.018	0.051	-0.205
G02.009	8月降水量	-0.042	0.014	-0.211
G02.010	9月降水量	-0.039	0.027	-0.240
G02.011	10月降水量	-0.067	-0.098	-0.197
G02.012	11月降水量	-0.045	-0.148	-0.157
G02.013	12月降水量	-0.019	-0.158	-0.133
G02.014	年降水量	-0.042	-0.069	-0.245
G02.015	1月最高気温	0.161	0.040	-0.072
G02.016	1月最低気温	0.125	-0.067	-0.132
G02.017	1月平均気温	0.148	-0.034	-0.120
G02.018	2月最高気温	0.165	0.035	-0.043
G02.019	2月最低気温	0.116	-0.062	-0.150
G02.020	2月平均気温	0.155	-0.025	-0.111
G02.021	3月最高気温	0.165	0.036	0.000
G02.022	3月最低気温	0.148	-0.036	-0.112
G02.023	3月平均気温	0.169	-0.004	-0.066
G02.024	4月最高気温	0.155	0.031	0.072
G02.025	4月最低気温	0.161	-0.039	-0.044
G02.026	4月平均気温	0.170	-0.006	0.020
G02.027	5月最高気温	0.113	-0.008	0.149
G02.028	5月最低気温	0.167	-0.039	-0.002
G02.029	5月平均気温	0.154	-0.035	0.081
G02.030	6月最高気温	0.084	-0.062	0.155
G02.031	6月最低気温	0.161	-0.050	0.012
G02.032	6月平均気温	0.127	-0.079	0.093
G02.033	7月最高気温	0.090	-0.084	0.151
G02.034	7月最低気温	0.153	-0.070	0.003
G02.035	7月平均気温	0.126	-0.096	0.085
G02.036	8月最高気温	0.135	-0.050	0.118
G02.037	8月最低気温	0.167	-0.044	-0.022
G02.038	8月平均気温	0.159	-0.062	0.047
G02.039	9月最高気温	0.165	-0.009	0.043
G02.040	9月最低気温	0.162	0.002	-0.069
G02.041	9月平均気温	0.172	-0.007	-0.021
G02.042	10月最高気温	0.165	0.039	0.013
G02.043	10月最低気温	0.153	-0.031	-0.077
G02.044	10月平均気温	0.167	0.002	-0.048
G02.045	11月最高気温	0.159	0.067	-0.032
G02.046	11月最低気温	0.151	-0.055	-0.081
G02.047	11月平均気温	0.165	0.007	-0.069
G02.048	12月最高気温	0.160	0.055	-0.057
G02.049	12月最低気温	0.132	-0.072	-0.123
G02.050	12月平均気温	0.155	-0.018	-0.102
G02.051	最高気温	0.164	0.011	0.042
G02.052	最低気温	0.156	-0.052	-0.084
G02.053	平均気温	0.171	-0.030	-0.032
G02.054	1月積雪	-0.042	-0.142	-0.068
G02.055	2月積雪	-0.038	-0.142	-0.086
G02.056	3月積雪	-0.048	-0.133	-0.083
G02.057	12月積雪	-0.065	-0.153	-0.029
G02.058	最大積雪	-0.040	-0.137	-0.088
G02.059	1月日照時間	0.020	0.205	0.013
G02.060	2月日照時間	0.015	0.203	0.036
G02.061	3月日照時間	0.055	0.183	0.046
G02.062	4月日照時間	0.086	0.099	-0.004
G02.063	5月日照時間	0.081	-0.081	0.100
G02.064	6月日照時間	0.015	-0.160	0.149
G02.065	7月日照時間	0.005	-0.137	0.180
G02.066	8月日照時間	0.039	-0.138	0.139
G02.067	9月日照時間	0.120	-0.071	0.082
G02.068	10月日照時間	0.085	0.164	0.004
G02.069	11月日照時間	0.027	0.203	-0.002
G02.070	12月日照時間	0.017	0.206	0.002
G02.071	年合計日照時間	0.058	0.176	0.075
G02.072	1月日射量	0.005	0.205	-0.014
G02.073	2月日射量	-0.006	0.206	0.016
G02.074	3月日射量	0.019	0.195	0.032
G02.075	4月日射量	-0.029	0.087	-0.049
G02.076	5月日射量	-0.070	-0.093	0.052
G02.077	6月日射量	-0.067	-0.151	0.123
G02.078	7月日射量	-0.057	-0.136	0.157
G02.079	8月日射量	-0.040	-0.134	0.096
G02.080	9月日射量	0.081	-0.095	0.049
G02.081	10月日射量	0.039	0.165	-0.053
G02.082	11月日射量	0.009	0.200	-0.034
G02.083	12月日射量	0.004	0.204	-0.027
G02.084	年平均日射	-0.021	0.150	0.067