

海風環境下における天然生樹木の生態と砂防的応用

薄 井 五 郎*

An environmental study on the coastal natural stands to establish the disaster prevention forests in north west Hokkaido

Goro USUI*

抄 録

我が国は人口密度が高い上に平野面積が少なく、海岸地域まで土地利用が進んでいる。このため海岸林の造成・保全の必要性はますます高まっており、これを支援する研究が望まれる。

本道における海岸林造成に適する樹種の導入試験には、多大な努力が払われたが決定的な樹種は見いださず、結局郷土樹種を長期的に保育してゆく方向がとられている。そこで本道の海岸林の主要樹種であるカシワ・ミズナラ・イタヤカエデを研究対象として、海風環境下におけるこれらの生育を調べ、造成・保全に応用できる方法を見いだすことを研究目的とした。まず、カシワ・イタヤカエデのすみわけの実態とその理由、また越冬期の枝条の枯死の進行およびその原因を調べた。その結果、飛来塩分の関与が明らかにされたため、飛来塩分の運動の法則性とその応用を検討し、また距離的・地形的分布図を作成して塩風環境と生育の関係づけを行った。次に海風の影響によって形成される風衝形について検討し、その形成過程を推測するモデルを提示して、海岸林の保全および造成目標を具体化するための根拠を示した。

目 次

| | |
|----------------------------|----|
| 緒 言 | 2 |
| 第 I 章 研究の方法 | 3 |
| 1 研究史 | 3 |
| 2 研究の目的 | 4 |
| 3 調査地と飛来塩分の測定方法 | 5 |
| 第 II 章 塩風環境下の自生前緑樹種の分布 | 7 |
| 1 内陸部におけるミズナラとイタヤカエデの分布特徴 | 7 |
| 2 海岸におけるカシワおよびイタヤカエデの分布 | 8 |
| 第 III 章 海岸自生樹種の成長と越冬中の枝の枯死 | 14 |
| 1 カシワ・ミズナラ海岸林の芽吹き様式 | 14 |
| 2 越冬期におけるカシワ・ミズナラの枝条枯死 | 15 |
| 3 越冬期におけるイタヤカエデ枝条の枯死 | 16 |

* 北海道立林業試験場 Hokkaido Forestry Research Institute, Bibai, Hokkaido 079-01

[北海道林業試験場研究報告 第 28 号 平成 2 年 11 月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No. 28. November, 1990]

| | |
|------------------------|----|
| 第IV章 飛来塩分の分布 | 19 |
| 1 平坦地形上の飛来塩分 | 20 |
| 2 海岸段丘付近の風および飛来塩分 | 25 |
| 第V章 海風環境下の林冠形 | 30 |
| 1 風衝形の形成 | 30 |
| (1) カシワ枝の伸長と枯下がり | 30 |
| (2) 飛来塩分環境とカシワの偏樹形との関係 | 33 |
| 2 海岸風衝林形のシミュレーション | 36 |
| 第VI章 海岸林の保全および造成への展開 | 41 |
| 1 海風環境判定の指標 | 41 |
| 2 現存海岸林の保全 | 41 |
| 3 海岸林造成 | 44 |
| 結言 | 46 |
| 摘要 | 47 |
| 文献 | 48 |
| 附表 | 52 |

緒 言

我が国の国土は面積 37 万 K m²、人口 1 億 1 千万人であり、世界各国のうちでも人口密度は高い方に属している。しかも国土の 7 割は山地であり、平野は海岸部に限られている場合が多く、本来自然のままにおかれてもよい海岸近くまで生活および生産の場として利用せざるを得ない。我が国の海岸林問題の根本はここに発生している。

一方、気象環境は冬期の季節風が強く、海岸地域における環境緩和のために防風・防雪施設を要する場合が少なくない。防風施設のなかでも、経済性、恒久性に優れ、かつ視覚的に違和感がなく、また生態系保護のための貴重な空間を与えるものとして、海岸林の保全および造成はますます重要視されなければならない。

我が国は南北に 3, 000km と長い島国であり、海岸林を造成する樹種も地域によって大きく異なる。沖縄方面では、ヒルギ、リュウキュウマツなどがあり（幸喜, 1985）、とくにヒルギは海中にも植栽されている（佐藤, 1985）。本州では、海風に対する抵抗性が非常に大きいクロマツがある。

道内において 1948 年に始まった民有林治山事業ではクロマツ植栽が主流であった。その結果、道南地方および日高・胆振地方においてクロマツ林が成立している（北海道治協 1978）。造成対象地が北上するにつれて外国樹種が導入されたが、モンタナマツを除いてほとんどが消滅した（伊藤 1985）。本道の気象条件下では、海岸造成に広く適合する決定的な樹種は見いだされず、郷土樹種を十分な保護・保育によって長期的に成林させる方向にある（東 1964, 1975, 伊藤 1974, 中西 1949, 斎藤 1984）。これは今まで行われて来た莫大な造成事業の結果判明したことである（北海道治協 1978）。この経過から道内の代表的海岸林樹種であるカシワ・ミズナラ・イタヤカエデについて一層の研究が期待される。

海岸林の生存を規制する最も大きな因子は、風そのものではなく飛来塩分であることが明らかにされてきた。越冬期の季節風が強く、防風林の設置が必要な所は飛来塩分が多く、人間生活のみでなく林木にとっても環境が厳しい。さらに昨今は、海岸地域の利用・開発、道路建設、土砂採取などが進み、海岸林の破壊をまねく事例が増加している（河合ほか 1985b, 農林水産技会 1987）。海岸林および人間生活の双方にとって

この厳しい現実には、塩風に対して一層合理的な対策を得る必要性を示している。すなわち、塩風環境下における植生の生育、すみわけとの関係を応用した植生の利用方法の改善と、より詳細な塩風の分布の規則性を応用した工作物による塩風対策の検討であると考えられる。この考えにそって、飛来塩分の分布の規則性、海風環境下における林木の対応、およびそれらの応用を検討した。

本研究を取りまとめるに当たり、始終懇切な御指導を賜った北海道大学農学部教授 藤原滉一郎博士をはじめ、論文の御校閲を賜った同大学農学部教授 新谷 融博士、同大学農学部教授 五十嵐恒夫博士に対して深甚な感謝を申しあげる。さらに、本研究の取りまとめに際し、平素から御指導を下された北海道立林業試験場 伊藤重右衛門博士に心から御礼を申し上げる。一方、本研究の遂行に当たって常に御協力をいただいた北海道立林業試験場 清水 一氏、同 浅井達弘博士、島根大学農学部 新村義昭博士には心から感謝申し上げます。

これら各位のほか外業、および内業で協力を頂いた北海道立林業試験場道北支場の方々に御礼を申し上げます。

本論文は「北海道大学審査学位論文」であるが、新たな資料をⅡ章に追加し、またⅢ章-1, 4を略記した。また紙面の都合により全体に縮小した。

第Ⅰ章 研究の方法

1 研究史

海岸林の環境の特徴は、塩分を含んだ強風にある。北海道においては強い海風は主に秋～冬期の季節風によってもたらされる(浅井ほか 1986, 坂本 1986, 新村 1988)。海岸地帯における海風による植生の枯死についての最初の報告は、1805年に Salisbury によってなされた。この中で英国の salt storm について記されており、海岸地帯において雨を伴わない強い海風が葉に強い害をもたらすと述べている。海から塩分が飛来する事実は、Bohm によって 1989年に初めて確認されている。以来 1930年代に至るまで強風下の海岸植生の枯死あるいは偏樹形の原因については、強風による蒸散過多説、塩害説、飛砂傷害+過大蒸散説、土壌から吸収される塩分説などが論議され、1940年代に飛来塩分説が支持されるに至った(Boyce 1957)。Boyce (1957) によって北米の塩風環境下における植生の成長、すみわけについて体系的にまとめられ、現在も多く引用されている。

我が国においては、塩風環境そのものについての研究は気象(船津 1964)、防災(島羽 1969)、及び送電技術分野(千秋 1973, 塩害対策専委)から研究が行われ、飛来塩分の発生、移送、分布、さらに飛砂の運動などが理論的に検討された。農業においては水稻(大後 1937)・茶(青野ほか 1974)・果樹(小笠原 1971)などの収量や生葉に対する被害について研究された。

海岸林に対する飛来塩分の害は、クロマツを主とする常緑針葉樹(浅野 1963, 門田 1962, 河合ほか 1985, 宮内 1987)、常緑広葉樹(倉内 1956, 沖中ほか 1989)、着葉期(薄井ほか 1983)と越冬期(浅井ほか 1983, 1984, 1986, 工藤ほか 1972, 坂本ほか 1984, 1985, 1986, 新村ほか 1982)の落葉広葉樹について行われた。これらは主に被害のメカニズムの解明および被害実態研究に分けられる。工藤ほか(1972)は天然生カシワ海岸林の冬期間における枝枯れが、飛来塩分によって起こることを確認した。また浅井ほか(1986)は飛来塩分がカシワの葉痕部に侵入して枯死を起こすことを報告した。新村(1988)は食塩および蔗糖液をカシワ葉痕部に塗布し、葉痕部の壊死が浸透圧によるのではなく、塩素イオンによっていることを示唆した。

林帯の機能については、林帯による塩分捕集機能(飯塚ほか 1950, 門田 1949, 河合 1985, 工藤ほか 1982,

1984a, 1984b, 玉手ほか 1957) が調査された。塩風環境下の林木の生育については、成長量の解析 (松井 1952, 坂本ほか 1984, 新村 1986), 樹種特性 (浅野 1963, 伊藤ほか 1970, 1982), 植栽試験 (伊藤ほか 1980, 1982, 農林水技会 1987) などが行われた。また偏樹形の成因および風衝林形の記述 (Boyce 1957, 工藤ほか 1972, 1977, 松岡ほか 1982) が行われたが、環境との量的関係および普遍化についてはまだ十分に解明されていない。

一方、加害因子である飛来塩分については、一定高度における距離方向の分布について門田 (1949) 以来、平坦地形 (千葉ほか 1976, 門田 1962, 幸喜ほか 1969, 幸喜 1978, 1985, 工藤 1975, 工藤ほか 1972, 1974, 小川ほか 1976, 内田 1950) で多く研究され、汀線からの距離によって指数関数的に減少することが明らかにされた。段丘地形 (藤原ほか 1962, 平野ほか 1974) では研究例が少ないが、風速が収束する地形では飛来塩分が増大することが示された。

一方、防風垣の効果と改善 (藤原 1987, 東ほか 1985, 1986, 工藤ほか 1989, 松岡ほか 1989) については、間伐材の利用促進の面から材料の検討がなされてきたが、飛来塩分の効率良い除去については未解明の点が多い。

海岸林のその他の環境因子に関する研究としては、飛砂と林木の生育 (金内 1979, 鈴木 1981), 土壌条件 (伊藤 1985, 農林水産術会 1987), 病虫害 (農林水技会 1987), 環境の変化による被害の増大 (坂本ほか 1987, 1988) などが検討された。

北海道の海岸地帯における天然植生の生態・分布実態については、そのほとんどが調査されている。伊藤 (1985) は全道の調査をまとめ、気候および天然生林の現況調査から北海道の海岸林環境を 4 区分し、区分別に林帯造成方法、使用樹種と目標樹高および限界樹高を示した。また斎藤 (1984) は屋敷林・社寺林などの植栽成績を検討し、また天然生海岸林の生育実態から、郷土樹種の有効性を強調し造成方法を示した。

2 研究の目的

現在までに蓄積された海岸林に関する資料から、海岸付近の林木の生育・生存に対して最も重要な制限因子は飛来塩分の量である。従って、飛来塩分を指標として立地環境区分を行うことにより、海岸林の保全および造成の計画を明確にすることができる。すなわち、

- 1) 海岸林の樹種分布は全道的に調査され、前線ではカシワ・ミズナラが全道的に優占し、道南や知床など一部にイタヤカエデが優占することがわかった。しかしこれら主要樹種の分布と飛来塩分環境との関係は不明確であり、樹種特性を明らかにする必要がある。
- 2) 飛来塩分の分布については、汀線からの距離、地形などとの関係が研究されてきた。しかし、そのほとんどが一高度の測定であり、森林と関係する飛来塩分の分布の法則性から飛来塩分対策を構築するためには情報が不十分である。このため、海岸林の環境解析に必要なスケールで、汀線からの距離・地形と飛来塩分量の高度分布との関係の規則性を明らかにして、その規則性を応用した飛来塩分対策を考案し、あるいはまた、それら立地における林木生育との関係を明らかにする必要がある。
- 3) 海岸林を造成する場合、経過年次による樹高成長の推定は、森林による保護効果の範囲を知るための基本情報となるが、塩風環境のために林冠が変形してその推定は困難である。そのため目標樹高に達する所要年数あるいは必要林帯幅の算定方法を開発する必要がある。また現存する林帯の一部を伐採する場合、残存林分が受ける林冠形の変化の程度、影響の範囲、速度を予測することは、林帯の保全にとり必須な情報であり、林冠形形成の年次的推測モデルを開発する必要がある。

著者はこれらについて、越冬期における北～西方向の季節風の影響を最も強く受ける日本海側海岸を中心

に調査を行い、その結果が全道的に適用できるように考慮し、以下の検討を行った。

対象樹種を北海道の主要な海岸林樹種であるカシワ (*Quercus dentata* THUNB.)・ミズナラ (*Q. mongolica* var. *grosseserrata* REHD. et WILS)・イタヤカエデ (*Acer mono* MAXIM.)とした。これらの天然生海岸林において、すみわけの実態、内陸部との共通性、すみわけの原因などを調べた。また冬芽の枯死経過の観察を行い、圃場試験を併用して飛来塩分が海岸林の樹木の枝条を枯死させる過程を明らかにした。次に、平坦地および段丘地形において汀線からの距離に応じた飛来塩分の高度分布の推移とその規則性を検討した。

これらを受けて、カシワ・ミズナラ・イタヤカエデの天然生海岸林において、風衝樹形、風衝林形、枝の伸長および枯死量、樹種分布などと飛来塩分との関連を調査して、塩風環境に対する林木の対応を検討した。その結果、塩風環境下における林木生育予測の方法を示した。以上の検討から海岸林の造成および保全方法についていくつかの改善点を示した。

3 調査地と飛来塩分の測定方法

調査地

植生地理学によれば本道は次のように区分される。渡島半島部分はブナに代表される温帯北部林に属す。主要部分はトドマツ・エゾマツに代表される亜寒帯要素と、シナノキ、イタヤカエデ、ミズナラに代表される温帯要素が混在する汎針広混交林に区分されている (館脇 1955)。

道北地方海岸部の気候： 植生の生存に関連する因子である寒さの指数でみると、日本海側北部とオホーツク海側北部は最も寒冷で (伊藤 1985) ある。また越冬期の塩風環境からみると、全道的にみても日本海側が厳しいことがわかる (図-1)。

海岸林の構成樹種： 長谷川 (1984), 伊藤 (1985) によれば、海岸林の最前線にはカシワが最も普通にみられ純林状を呈する。ついでミズナラ、イタヤカエデが出現する。天塩以北ではカシワは天然分布せず、ミズナラが替わって分布する。イタヤカエデは道南中西部の海岸風衝崖地に純林状をなしている。

海岸地形： 山口ほか (1953) は山地、火山、扇状地・段丘、沖積低地の4地形の出現特徴から、本道を14区分している。これによれば、日高・東部太平洋岸・オホーツク海側・留萌の海岸は段丘状を呈し、留萌西部・知床・渡島半島部の海岸は山地・火山の長大斜面が分布する。低平な海岸は、黒松内低地、石狩低地、天北、網走、根釧などに分布する。

以上に示したように、寒冷でかつ冬期の季節風による塩風環境が厳しく、さらに風速が減衰しにくい低平な地



図-1 寒候期 (10~3月) における日最大風速 > 10m/sec の海風の月平均日数



図-2 本文に現れる地名と位置

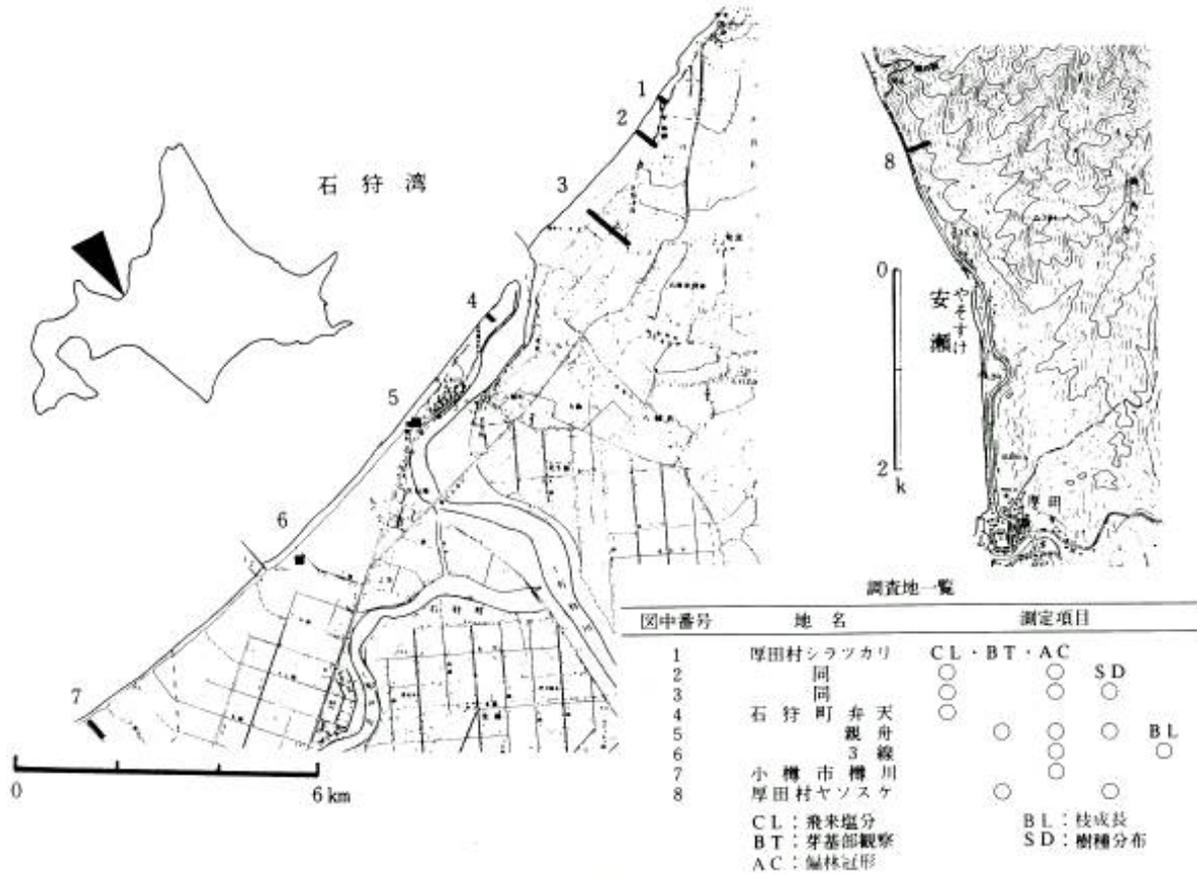


図-3 調査地の位置 石狩地域

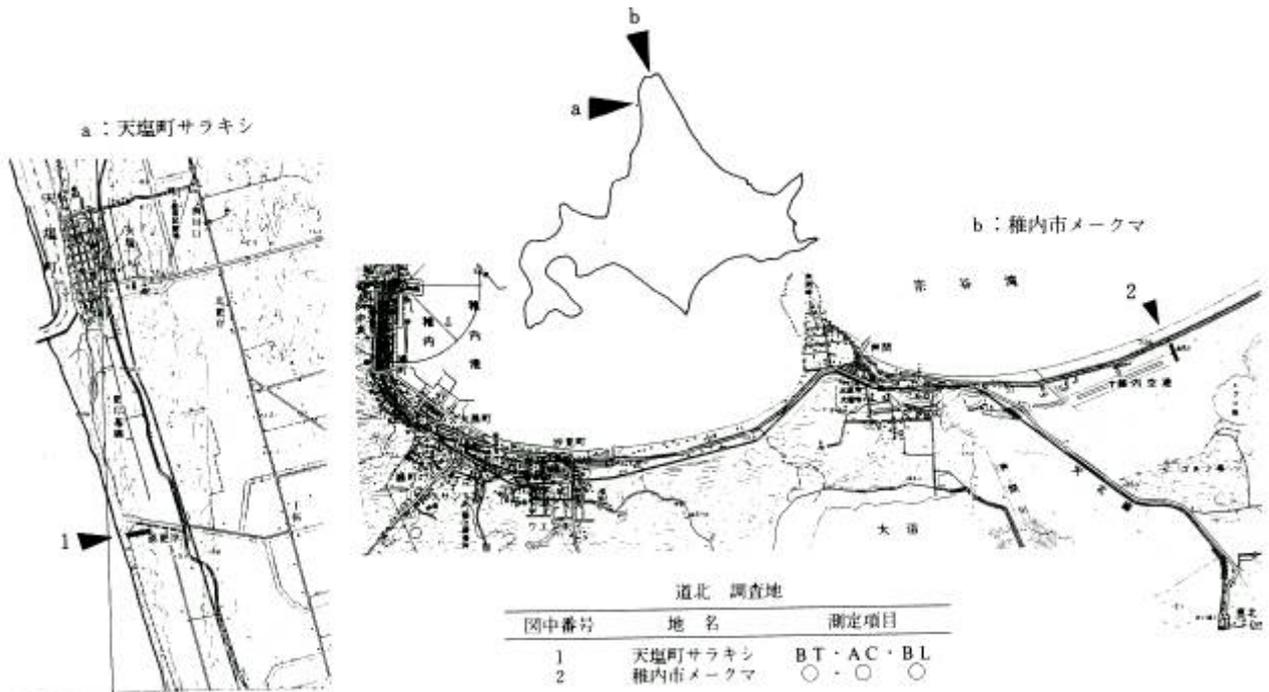


図-4 調査地の位置 道北地域

形など、林木の生育に不利な条件を併せもつ日本海側沿岸の石狩以北すなわち石狩・厚田地区、天塩・稚内地区、および道北のオホーツク海側を研究の対象地とした。さらに項目によっては内陸部の中川、美唄・三笠地区において調査を行った(図-2)。このうち、調査を重点的に行った石狩、天塩および稚内地区を実施項目とともに図-3、4に示す。

飛来塩分の測定方法

飛来塩分の捕捉は、常法ではガーゼが吸着面として使われる。しかしこのトラップは指向性が強いので、気流の方向が一定でない所では飛来塩分を正確には捕捉できない。またこのトラップは大きいために微小区間の測定ができない。そこで糸トラップを考案した。すなわちトラップの部分は長さ50cmの綿糸(水糸10#)で、弓状の針金のバネを利用して絞状に張り、季節風が直角に当たる方向に、かつ地面に平行に設定する。これにより垂直方向の渦流に対応でき、微地形変化がある箇所における測定が可能である。またこのトラップは軽いので、丈夫な支柱を要さず、高い箇所の設置にも適している。

糸トラップは一つずつポリエチレン袋に回収し、実験室でビーカにとりだし純水に溶出させた後、モール法で滴定した。

第II章 海風環境下の自生前緑樹種の分布

1 内陸部におけるミズナラとイタヤカエデの分布特性

海岸部におけるすみわけが、内陸部と比べて共通点があるか否かを確認するため、北海道有林岩見沢経営区14・21林班において尾根をはさんだ傾斜度25~38度の北向き斜面と南向き斜面に調査地をとり、直径6cm以上の出現樹種の本数を調べてすみわけに与える環境の影響を検討した。

北海道の海岸林の主要樹種であるカシワ、ミズナラ、イタヤカエデの分布の概要は次のようである。カシワは海岸地帯で最も普通に認められ(長谷川1984)、内陸では十勝平野、石狩低地帯、旭川付近の蛇紋岩地域など限られた地域で生育する。ミズナラは道北部の海岸林の前線ではほぼ純林を形成するが、他の海岸林ではカシワの後方に生育している(伊藤1985、農林水産技術会議1987)。またミズナラは内陸では尾根型の地形上に出現しやすいことが知られている(寺沢ほか1989)。イタヤカエデは亜高山帯から海岸地帯まで広く分布する。内陸山地では純林を形成しにくい(伊藤浩司1970)が海岸地帯では道南地方西部および知床その他では純林状(長谷川1984)を示す。

一般の山地においては、カシワの分布はまれであるので、カシワと同属で北海道北部では天然生海岸林の主要樹種であり、かつカシワとともに深根性のミズナラの地形的分布を、イタヤカエデと比較する。

表-1は三笠市に所在する道有林の70年生山火再生林における樹種分布である。14・21両林班のプロットにおいて、ミズナラとイタヤカエデについて、ヘクタール当たり本数および本数比を示している。14林班をみると南斜面では北向き斜面より明らかにミズナラが多く、同じ傾向が21林班においても認められる。14林班の南斜面を上部と下部に区分すると、尾根を含む斜面上部においてミズナラがイタヤカエデと比べて多く出現している。図-5は21林班の調査地における北斜面と南西斜面におけるミズナラとイタヤカエデの分布を示す。両斜面ともイタヤカエデが凹形地形に多く認められ、ミズナラは凸型地形に多く分布しているとみられる。尾根地形あるいは南向き斜面は、乾燥しやすい地形であると同時に、明るい環境であることが推測され、これらが両樹種の分布の差をもたらすと考えられる。

ミズナラが凸地形、南斜面など土壌が乾きやすい所に分布する傾向は、寺沢ほか(1989)、大角(1986)なども認めている。また両樹種のこの分布傾向は相場ほか(1984)、浅井ほか(1980)も観察している。これらのことから、ミズナラとイタヤカエデが微地形上に背反的にすみわけの現象は、内陸では一般的である

表-1 内陸山地におけるミズナラおよびイタヤカエデの出現本数 (三笠市)

| 位置 樹種 | 14 林 班 | | | | 21 林 班 | | | | | |
|----------|--------|-------|---------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | 北斜面 * | | 南斜面上部 * | | 南斜面 * | | 北斜面 * | | 南斜面 * | |
| | 本/ha | Qm/Am | 本/ha | Qm/Am | 本/ha | Qm/Am | 本/ha | Qm/Am | 本/ha | Qm/Am |
| ミズナラ | 579 | 2.2 | 1, 229 | 6.7 | 686 | 4.6 | 460 | 1.6 | 709 | 2.7 |
| イタヤカエデ | 266 | | 171 | | 143 | | 284 | | 262 | |
| その他** | 1, 223 | | 1, 230 | | 1, 029 | | 1, 495 | | 1, 642 | |
| 計 | 2, 068 | | 2, 630 | | 1, 858 | | 2, 239 | | 2, 613 | |

* : ミズナラとイタヤカエデの比

** : シナノキ, アズキナシ, ハウチワカエデ, ホウノキなどを含む

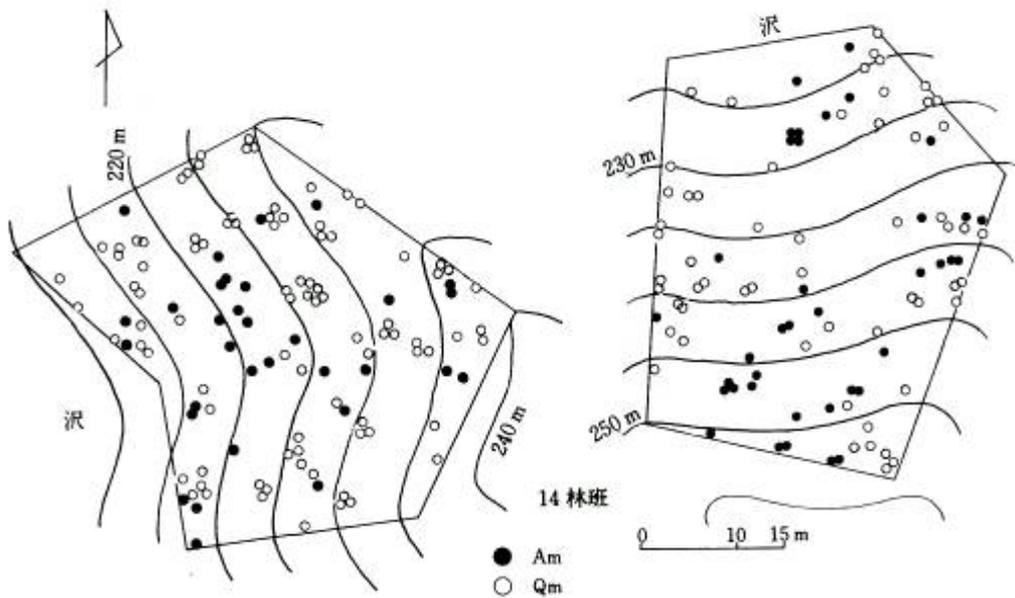


図-5 内陸山地におけるミズナラとイタヤカエデの分布 (三笠市)

とみられる。

カシワはミズナラに比べて、より裸地的な環境を好む (広木 1982, 新島 1940) といわれており、ここで検討したミズナラとイタヤカエデの比較は、カシワとイタヤカエデの生態的差異を考える上で有効である。

2 海岸におけるカシワおよびイタヤカエデの分布

石狩の砂丘地帯ではカシワおよびイタヤカエデが汀線からの距離によって (長谷川 1984, 伊藤 1985, 農林水技会 1987) すみわけている。前線部の主要樹種はカシワであり、イタヤカエデの出現は稀である。逆に内陸側ではイタヤカエデが多く、カシワは減少することが観察されている。一方、段丘斜面においては、斜面の位置によってこれらのすみわけがなされると観察される。ここでは、厚田地域において海岸から異なる距離にある段丘斜面を選び、距離および斜面上の位置による樹種分布の特徴を調査した。

厚田郡厚田村のシラツカリ, ヤソスケの海岸に面した 45 度の傾斜面において 3 プロットを, また石狩町 3 線の砂丘において 1 プロットをとり, ベルト法により胸高以上の樹高をもつ樹木の樹種, 樹高および胸高直径を調査した。各プロットとも天然生林である。

まず, シラツカリの海岸から 500m 離れた段丘斜面に Ab 6 ~ Ab 9 に沿って 2 本のラインをとり, また汀線から 900m 離れた段丘斜面の Ac 3 ~ Ac 4 に沿っても 2 本を設定し, 出現した樹種を図-6 および表-2

に示す。段丘肩部ではカシワが優占するが、斜面中腹以下ではほとんど出現しない。逆にイタヤカエデは段丘肩部では出現しないが、斜面中腹以下では多く出現している。

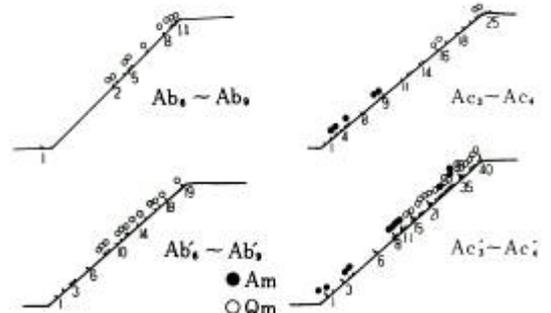


図-6 海岸段丘斜面上の森林植生 (シラツカリ)

表-2 海岸段丘斜面上の森林植生 (シラツカリ)

| Ab ライン植生 10m幅 | | | |
|---------------|----|-----|---------|
| 図中番号 | 樹種 | 樹長m | 胸高直径 cm |
| 1 | Mo | 6 | 10.8 |
| 2 | Qd | 8 | 16 |
| 3 | " | 6 | 8 |
| 4 | Kp | 6 | 8 |
| 5 | Qd | 5 | 8 |
| 6 | " | 6.5 | 12 |
| 7 | " | 4 | 7 |
| 8 | " | 4.2 | 12 |
| 9 | " | 5.8 | 10 |
| 10 | " | 4 | 8 |
| 11 | " | 3.5 | 10 |

| Ab' ライン植生 4m幅 | | | |
|---------------|----|-----|------|
| 図中番号 | 樹種 | 樹高 | 胸高直径 |
| 1 | Mo | 3.4 | 4 |
| 2 | Mo | 4.7 | 4 |
| 3 | Ae | 5 | 10 |
| 4 | Ae | 4.5 | 8 |
| 5 | Ae | 5 | 8 |
| 6 | Kp | 7.5 | 18 |
| 7 | Qd | 5 | 11 |
| 8 | Qd | 5 | 11 |
| 9 | Qd | 4 | 6 |
| 10 | Lm | 2 | 2.5 |
| 11 | Qd | 3.5 | 6 |
| 12 | Qd | 3.8 | 9 |
| 13 | Qd | 5 | 14 |
| 14 | Qd | 5 | 9 |
| 15 | Qd | 4 | 9 |
| 16 | Qd | 5 | 9 |
| 17 | Qd | 6 | 14 |
| 18 | Qd | 5.5 | 13 |
| 19 | Qd | 5 | 12 |

| Ac ライン植生 4m幅 | | | |
|--------------|----|------|------|
| 図中番号 | 樹種 | 樹高 | 胸高直径 |
| 1 | Fm | 5 | 10 |
| 2 | Ud | 16 | 30 |
| 3 | Am | 14 | 30 |
| 4 | Am | 12 | 16 |
| 5 | Tj | 12 | 18 |
| 6 | Ud | 11.5 | 20 |
| 7 | Am | 11.5 | 35 |
| 8 | Ud | 12.5 | 25 |
| 9 | Am | 9 | 20 |
| 10 | Am | 12 | 28 |
| 11 | Ud | 14 | 24 |
| 12 | Ud | 14 | 32 |
| 13 | Ud | 14 | 36 |
| 14 | Tj | 10 | 17 |
| 15 | Tj | 8 | 13 |
| 16 | Qd | 7.5 | 15 |
| 17 | Qd | 10 | 30 |
| 18 | Ud | 11 | 26 |
| 19 | Ud | 11 | 224 |
| 20 | Ud | 12 | 20 |
| 21 | Qm | 10 | 20 |
| 22 | Qd | 12 | 34 |
| 23 | Qd | 12 | 28 |
| 24 | Qd | 11 | 26 |
| 25 | Qd | 11 | 30 |

| Ac' ライン植生 8m幅 | | | |
|---------------|----|----|------|
| 図中番号 | 樹種 | 樹高 | 胸高直径 |
| 1 | Am | 12 | 26 |
| 2 | Am | 12 | 20 |
| 3 | Ss | 6 | 10 |
| 4 | Am | 9 | 20 |
| 5 | Am | 9 | 18 |
| 6 | Ma | 8 | 10 |
| 7 | Tj | 4 | 8 |
| 8 | Am | 9 | 22 |
| 9 | Am | 9 | 28 |
| 10 | Am | 9 | 26 |
| 11 | Am | 10 | 16 |
| 12 | Tj | 7 | 10 |
| 13 | Tj | 6 | 10 |
| 14 | Tj | 10 | 20 |
| 15 | Qm | 7 | 18 |
| 16 | Qm | 7 | 8 |
| 17 | Ps | 6 | 8 |
| 18 | Ma | 6 | 6 |
| 19 | Tj | 9 | 12 |
| 20 | Qm | 5 | 8 |
| 21 | Qd | 10 | 22 |
| 22 | Qd | 10 | 16 |
| 23 | Qd | 10 | 20 |
| 24 | Tj | 10 | 12 |
| 25 | Qd | 9 | 20 |
| 26 | Tj | 8 | 10 |
| 27 | Am | 5 | 4.6 |
| 28 | Qd | 10 | 22 |
| 29 | Qd | 10 | 20 |
| 30 | Ud | 4 | 8 |
| 31 | Qm | 8 | 10 |
| 32 | Ud | 3 | 4 |
| 33 | Am | 9 | 24 |
| 34 | Am | 5 | 6.4 |
| 35 | Qd | 8 | 20 |
| 36 | Qd | 9 | 20 |
| 37 | Qd | 5 | 10 |
| 38 | Qd | 5 | 12 |
| 39 | Qd | 6 | 20 |
| 40 | Qd | 6 | 22 |
| 41 | Qd | 7 | 26 |
| 42 | Qd | 7 | 26 |

凡例

| 記号 | 樹種 | 図中記号 |
|----|---------|------|
| Ae | タラノキ | |
| Am | イタヤカエデ | ● |
| Fm | ヤチダモ | |
| Kp | センノキ | |
| Lm | キンギンボク | |
| Ma | イヌエンジュ | |
| Mo | ヤマグラフ | |
| Pr | エゾヤマザクラ | |
| Qd | カシワ | ○ |
| Qm | ミズナラ | ○ |
| Ss | エゾニワトコ | |
| Tj | シナノキ | |
| Ud | ハルニレ | |

図-7および表-3にヤソスケの海蝕崖上の樹種分布を示す。図に示すように、カシワは出現しないが、Ay2ラインの標高60m以上の斜面には同属のミズナラが出現する。イタヤカエデはAy1, Ay2両斜面において下部から上部にかけて出現しており、下部では汀線からわずかに20mの位置に単木的に出現している。

以上の検討から海岸部における両樹種のすみわけは基本的には内陸部と同一傾向にあり、カシワ・ミズナラは凸型斜面に多く、イタヤカエデは凹型斜面に多く分布するとみてよい。

石狩砂丘地帯の天然生海岸林は、前述したように前線側にカシワが優占しイタヤカエデは後方で出現する。厚田の段丘斜面においても段丘肩部でカシワ

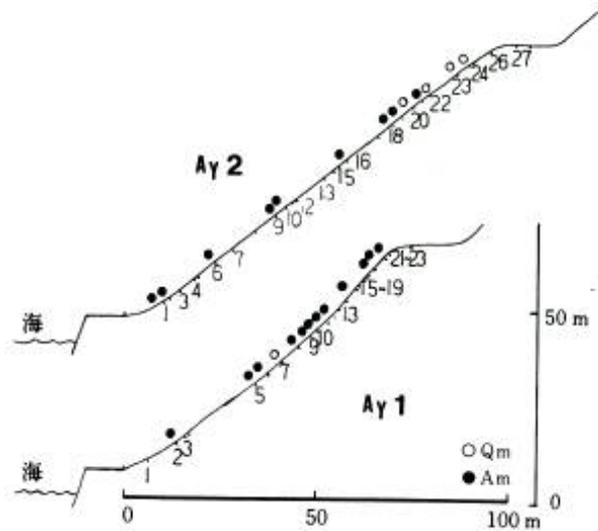


図-7 海蝕崖上の森林植生 (ヤソスケ)

表-3 海蝕崖上の森林植生 (ヤソスケ)

| 図中 No. | Ay1 | | | Ay2 | | |
|--------|-----|------------|------------|-----|---------|------------|
| | 樹種 | 樹高 | 胸高直径 | 樹種 | 樹高 | 胸高直径 |
| 1 | Mo | 6 | 9 | Am | 5 | 5, 4, 4 |
| 2 | Am | 6 | 6, 6 | Am | 4 | 6 |
| 3 | Mo | 6, 6, 5 | 20, 17, 12 | Mo | 6 | 10 |
| 4 | Mo | 5, 5, 5 | 18, 18, 21 | Mo | 5 | 8 |
| 5 | Am | 7 | 20 | Mo | 8, 8, 8 | 26, 22, 20 |
| 6 | Am | 5 | 7 | Am | 6 | 10 |
| 7 | Qm | 4 | 4 | Mo | 5 | 14 |
| 8 | Am | 12 | 27 | Mo | 5 | 9 |
| 9 | Am | 11, 11 | 29, 25 | Am | 8, 8 | 21, 21 |
| 10 | Am | 12, 12, 12 | 23, 22, 18 | Am | 8 | 12 |
| 11 | Am | 10 | 20 | Mo | 7 | 6 |
| 12 | Am | 12 | 30 | Mo | 6 | 16 |
| 13 | Kp | 13 | 33 | Mo | 8, 5 | 14, 14 |
| 14 | Am | 12 | 22 | Ph | 12 | 21 |
| 15 | Pr | 9 | 18 | Mo | 6, 6 | 16, 14 |
| 16 | Tj | 13 | 33 | Am | 8, 8 | 20, 12 |
| 17 | Pr | 9 | 18 | Tj | 11 | 25 |
| 18 | Tj | 12 | 28 | Am | 9 | 23 |
| 19 | Am | 11 | 18 | Am | 11, 5 | 30, 16 |
| 20 | Am | 12 | 40 | Qm | 7, 6 | 8, 6 |
| 21 | Am | 10, 10 | 11, 11 | Am | 8, 8 | 16, 12 |
| 22 | Kp | 10 | 14 | Qm | 10 | 33 |
| 23 | Tj | 15 | 90 | Qm | 8 | 30 |
| 24 | | | | Qm | 10 | 25 |
| 25 | | | | Tj | 9 | 20 |
| 26 | | | | Tj | 12 | 24 |

Am: イタヤカエデ, Kp: ハリギリ, Mo: ヤマグワ, Ph: キハダ
Pr: エゾヤマザクラ, Qm: ミズナラ, Tj: シナノキ

が優占し、中腹以下でイタヤカエデが多く出現する。これらイタヤカエデが出現する地形は、IV章で示すが飛来塩分が少ない所に当たる。逆にカシワが優占する地形は飛来塩分が多い所に当たる。

道内のイタヤカエデの天然分布について、伊藤浩司(1970)は海岸砂丘や風衝断崖では内陸とは異なり単独で優占する樹種であると述べている。長谷川(1984)は知床、道南の西海岸急斜面上の分布を観察し、必ずしも風衝地ではない所にも成立すると述べ、海蝕崖など不安定な斜面という立地条件に原因を求めている。

カシワとイタヤカエデの現在の母樹分布密度の差異は、種子の量・質や萌芽の数などに影響して、次に更新される樹種の違いをもたらすと考えられるが、そのこと以外に両樹種のすみわけの要因として次のことが考えられる。

1) 開花枝の特性の差異

イタヤカエデは空知地方では5月10日ころ開花する。表-4はイタヤカエデの1年生枝が何本の当年生枝を持つかを示したものである。表から、1年生枝の側芽から展開する例は少なく、頂生枝のみを展開した1年生枝が全体の3/4を占めている。またイタヤカエデの花穂が着生する枝は、前年生枝のどの芽から展開するかを調べ、表-5に示す。内陸部および海岸部において、花穂が着生する枝は1年生枝の頂芽から伸長した枝に限られるのはイタヤカエデの特性であるとみなすことができる。一方、表-6に示すように、海岸部のカシワの花が着生する当年生枝を展開させた1年生枝は、イタヤカエデとは異なり頂芽・頂生側芽ならびに側芽と全ての芽から展開した枝である。また、III章で示すが、海岸付近ではイタヤカエデの頂芽は越冬期に枯死しやすい。このことから、イタヤカエデは飛来塩分環境の厳しい海岸付近では、カシワと比べて開花・結実が困難であり、このことは海岸林の前線や段丘肩部においてイタヤカエデの分布が少ない原因の1つであると考えられる。

2) 稚苗の根系および主軸の発生時期の違い

図-8は石狩町3線の天然生海岸林の最前線の砂丘および美唄市光珠内において、1989年10月上旬に播種した天塩産カシワ、イタヤカエデの根長および主軸長の伸長経過を掘取り法によって示したものである。母樹数は両者とも5本である。カシワの堅果は落下後まもなく発根する(小川1981)。図から、12月上旬においてすでに根長が10cmを超えるものがあり4月11日の根の状態と同程度である。一方、イタヤカエデの根の伸長は遅く、2月以後に始まると考えられる。4月11・12日においてもカシワと比べて遅い。またイタヤカエデは4月に主軸長と根が近い時期に展開しているがカシワは主軸が全く伸長していない。カシワの地上部は美唄では5月2日に展開していなかったが5月7日に認められた。石狩では4月27日に地上部は展開していなかったが5月6日に認められた。これから、両樹種の地上部展開に約1月の差がある。またカシワの主軸の発達は根系と比べて6箇月も遅れることがわかる。

石狩ではイタヤカエデの主軸は美唄と異なり、4月12日以後の平均伸長はほとんどみられず、本葉の褐変・萎縮が認められた。5月6・7日、6月6日において両樹種の根長は4月11・12日より両地点とも明らかに増加したが、カシワがイタヤカエデよりも長い。

イタヤカエデは主軸を融雪後間もなく展開しており、しかも主軸長のバラツキが小で、発芽時期がそろっ

表-4 イタヤカエデの1本の1年生枝が持つ当年生枝の数(美唄)

| 樹 No. | 頂生枝のみ | 頂生枝以外に持つ当年生側枝の数 | | | | 合計 |
|-------|-------|-----------------|------|-----|-----|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 1 | 15 | 20 | 11 | | 1 | |
| 2 | 42 | 3 | 1 | | | |
| 3 | 35 | 11 | 12 | | | |
| 4 | 26 | 5 | 6 | | | |
| 5 | 41 | 5 | 3 | | | |
| 6 | 44 | 6 | 4 | | | |
| 7 | 27 | 8 | 3 | | 1 | |
| 8 | 38 | 6 | 8 | 1 | 1 | |
| 9 | 47 | 3 | | | | |
| 10 | 41 | 8 | 7 | 2 | | |
| 計 | 356 | 75 | 55 | 3 | 3 | 462本 |
| (%) | 72.4 | 15.3 | 11.1 | 0.6 | 0.6 | |

表-5 イタヤカエデの花穂を持つ当年生枝が展開した芽の区分

| 調査地 | 1年生枝の頂芽 | 1年生枝の側芽 |
|-------|---------|---------|
| 美唄市 | 261 | 0 |
| 石狩町3線 | 255 | 0 |

表-6 カシワの花を着生する当年生枝が展開した芽の区分

| 調査地 | 1年生枝の頂芽 | 1年生枝の頂生側芽 | 1年生枝の側芽 |
|-------|---------|-----------|---------|
| 石狩町3線 | 54 | 40 | 115 |

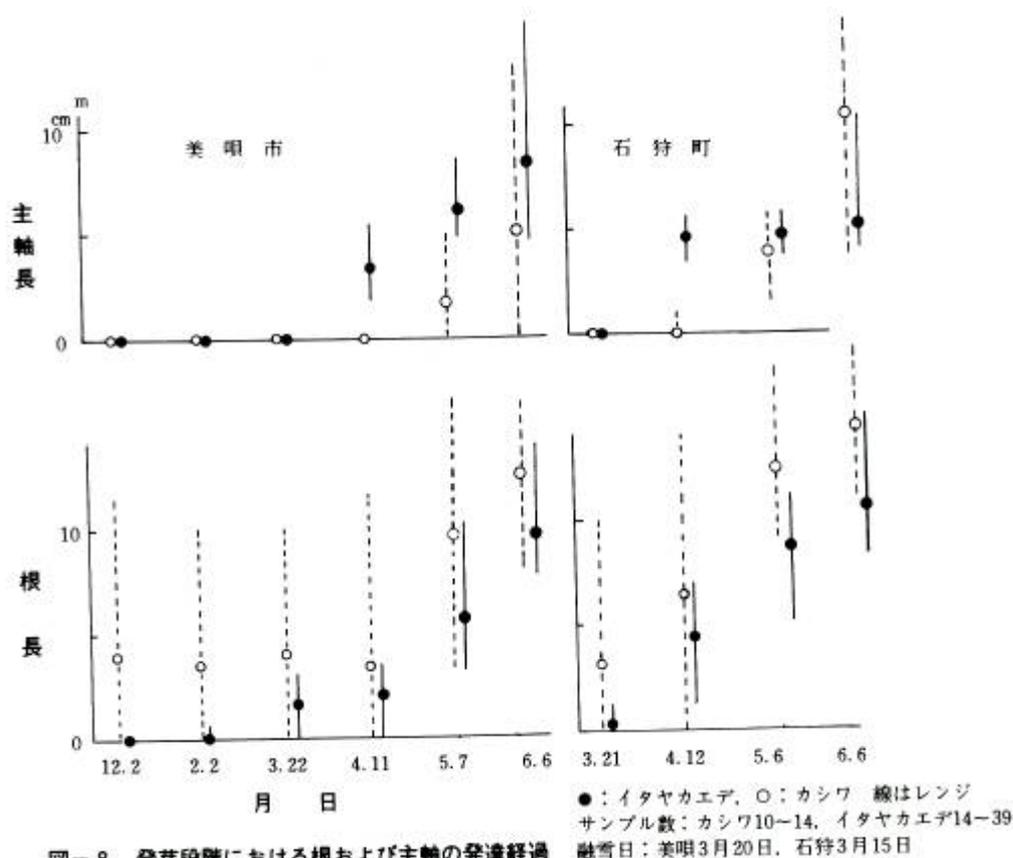


図-8 発芽段階における根および主軸の発達経過

●：イタヤカエデ、○：カシワ 線はレンジ
 サンプル数：カシワ10-14、イタヤカエデ14-39
 融雪日：美唄3月20日、石狩3月15日

ている。季節風の後期ではあるが強い海風や陸風による影響を受ける危険性がある。また、上木の少ない海岸林前縁部ではイタヤカエデは霜害の危険性も高い。さらに、乾燥害の機会も多くなる。一方、カシワは主軸発生が遅いうえに、美唄の例のように早い個体と遅いものの差が1ヵ月におよんでおり、小川(1981)の観察と一致した。カシワは主軸展開の不一致性により危険分散をはかっているとも解釈できる。

このように、稚苗の根系および主軸の発生時期と期間の違いは、裸地的環境下にある海岸林前縁部においてカシワとイタヤカエデのすみわけに関与すると考えられる。

3) 稚樹の根系深さの差異

イタヤカエデの根系は、カシワのそれと比較して明らかな差異がある。イタヤカエデの稚樹の根系は細根型で広がりがあるが、やや浅い(新村ほか1976)。カシワの根系はいわゆるゴボウ根型で、広がりはやや狭いが深くまで根系が発達する(新村ほか1976)。とくに10年未満の段階ではこの特徴が著しい(新島1940)。美唄の苗畑条件における1-1苗の根の広がり水平方向では、カシワ20cm、イタヤカエデ26cmであり、深さ方向ではカシワ38cm、イタヤカエデ26cmである(新村ほか1976)。山地において土壌表層の乾燥が稚苗の消失と関わる事例が知られており(道上ほか1989, 清和1989)、両樹種の根系の差は凸地形や砂丘など、表層土壌が乾燥しやすい所では、稚苗の生存を左右する可能性がある。

4) 海岸部における更新方法の差異

長谷川(1984)は石狩海岸林においては、イタヤカエデは萌芽によらず実生更新を行うことを観察した。また同海岸林においては、林床にササが多い場合はカシワ、ミズナラの稚樹がみられないが、ササを刈払うと堅果の残存率が増加すること、および林床にササがない所ではミズナラの稚苗がみられること、小動物に

よる堅果の消失が著しいことなどを観察し、ササの密度が高い所では堅果が発芽しても被圧によって生存できないと述べている。これらがササ林床の海岸林においてカシワの更新が行われず、イタヤカエデが主林木になってゆく原因の一部であると考察している。

一方、宮木(1985)は厚田村の天然生カシワ林において、ササ林床の所はエゾヤチネズミが多く、かつ速やかに堅果が消失するが、ササを刈払うとアカネズミが主に出現し、堅果が消失しにくいことを観察した。またアカネズミは堅果を分散貯蔵するので実生が発生する機会があるのに対して、エゾヤチネズミは巢穴貯蔵のみを行い、実生の発生が極めてまれである(宮木ほか1988)。これらのことから、飛砂によって地床が裸出しているかあるいは草丈が低い前線側では、カシワ堅果が食害を免れて、または分散貯蔵の食残堅果から実生が発生し、成長してゆく機会があるものと考えられる。長谷川はカシワの更新は短期的には根株の潜伏芽からの萌芽によるが、長期的には実生によっても行われる可能性も認めている。これらのことからカシワが前線に進出している理由の一部が説明されよう。

5) 耐陰性の違い

新島(1940)はカシワの稚樹が多量の陽光を要求すると述べている。長谷川(1984)と伊藤ほか(1982)は、それぞれ石狩町と共和町の海岸林の観察からイタヤカエデは耐陰性が大であるが、カシワは小であると述べている。とくに後者はニセアカシア林下に植栽した両樹種のうち成長が良好な地点の相対日射量を測定し、カシワが67%、イタヤカエデが32%であると報告した。また高橋ほか(1989)も同じ傾向を苗木でみている。またイタヤカエデと近縁のサトウカエデ(*Acer saccharum* MARSH.)も耐陰性が大であることが知られている(King 1986)。カシワとイタヤカエデの耐陰性の差は、大型草木が繁茂しやすい斜面脚部においては、特にカシワ稚苗が不利であると考えられる。表-7に厚田の段丘斜面上の6月10日における地床植生と相対照度を示した。斜面中部や下部では蔓類、大型の草本およびクマイザサが占めていて地床は暗い。斜面上部では越冬期にクマイササの葉が枯れるために地床は比較的明るい。

表-7 段丘斜面の無立木の植生と地床20cm高の相対照度

| 位置 | 植生(被度, 植生高) | 相対照度(%) |
|----|--|---------|
| 上部 | クマイササ(4, 70cm), エゾカンゾウ(2, 60cm), | 13 |
| 中部 | クマイササ(5, 50cm), ツタウルシ(4, 40cm) | 3 |
| 下部 | クマイササ(5, 180cm), イタドリ(3, 200cm) エゾヨモギ(2, 150cm), ヨブスマソウ(2, 150cm) | 2 |

なお、2)で示したように、イタヤカエデ稚苗の早い主軸展開は、上木の葉や競合草本の葉が展開する以前の光を利用できるので、広義の耐陰性とみなすことができ、この点でもカシワより有利である。

6) 上長成長の差異

イタヤカエデ稚苗の上長成長はカシワより大で(今ほか1974, 新村ほか1976), 美唄の苗畑における1年生のイタヤカエデ3区とカシワ5区の各々の苗高平均は19~40cm, 9~13cmであった。また1-1苗の3区ずつの平均苗長は各々75~85cm, 16~28cmであり(新村ほか, 1976), 明らかな違いがある。この差は耐陰性の差とあいまって下層植生の被圧による影響を増大させ、イタヤカエデとカシワの生存の機会に大きな差を与えるものと考えられる。

7) 葉の厚みおよび裏面の細毛の差異

1990年7月14日石狩砂丘上の天然生林前縁部から、日当りのよい両樹種各10個体から2枚ずつ葉を採種し、400倍にした光学顕微鏡で葉の中央付近で葉脈からはずれた部分の切片から葉の厚みを測り、また、

裏面の細毛群が着生する基の数を 100 倍の視野 (2.54mm²) 中の全数で数えた (表-8)。葉の厚さは両樹種ほぼ同じである。イタヤカエデは内陸では薄い (小池 1986) 海岸付近の林冠形成葉では厚くなっており、環境による形態変化とみられる。

カシワの葉の裏面には細毛が発達し、さまざまな太さの葉脈上から発生している。1つの基部から放射状にふつう 4~6本、長さ 0.13~0.28mmの細毛が着生し、細毛が占める層の厚さは 0.20~0.23mmである。カシワの葉が厚く感じられるのはこの毛層の存在も関与するのであろう。細毛の基の密度は 1c m²当たり 470~1,410個とばらつくが 800 くらいのもが多い。一方、イタヤカエデは毛を着生していない。細毛の着生は葉面が風に曝されるのを防ぎ蒸散を低く保つのに役立つ (猪野 1964) とされ、カシワがイタヤカエデと比べて乾燥に対応した構造をもっていると考えられる。

表-8 葉の厚さおよび裏面の細毛の特徴

| 樹種 | 葉の厚さ mm | 細毛基部の数/c m ² | 細毛の長さ mm | 細毛層の厚さ mm |
|--------|------------------|-------------------------|------------------|-----------|
| カシワ | 0.22 (0.19~0.25) | 795 (470~1410) | 0.18 (0.13~0.28) | 0.2~0.23 |
| イタヤカエデ | 0.21 (0.18~0.22) | なし | | |

以上いくつかの点について両樹種の特徴をみた。このほかについても検討を要するが、この段階で次のように両樹種の特徴を類型化できる。カシワは海風に曝される厳しい孤立木の条件にも耐える陽樹である。一方、イタヤカエデは林分的環境に適応しており、競合しつつ生存する陰樹的性格が強い。

カシワとイタヤカエデのすみわけは、海岸部と内陸部で地形的に共通点が多いことがわかった。カシワの分布が多い凸型地形は、土壌が乾燥しやすい、競合種が少ない、林床が明るいという特徴があり、そのような場所は海岸では飛来塩分が多いことが予測される。そこで、すみわけと耐塩性の関係、枝条の生存と飛来塩分との関係あるいは樹種による差異、飛来塩分の分布の規則性などについてⅢ、Ⅳ章で明らかにしてゆく。

第三章 海岸自生樹種の成長と越冬中の枝の枯死

1 カシワ・ミズナラ海岸林の芽吹き様式

著者ら (浅井ほか, 1984) は、海風と枝条枯死との関係を明らかにするためにオホーツク海側および日本海側海岸林の最前線における芽吹き率 (枝の展開率) の調査をおこない、また同一地点における海風の年次差と頂芽の芽吹き率の関係を調べた。その結果、1) オホーツク海側では頂芽から芽吹く例がみられるが、日本海側ではみられない。2) 12~3月の海風について日平均風速 7 m/sec 以上の加算値 (U) と、頂芽の芽吹き率の対数値との間に最も強い関係がみられ、相関係数は 0.972 を示した。両者の関係は次のように表される。

$$Y = 3.96 \cdot e^{-0.0130 \cdot U} \dots \dots \dots (6)$$

なお、7 m/sec 以上の風速、および 12~3月と強い関係がみられたことは、風速 6~7.5m/sec で飛来塩分が急速に増加する (Boyce1957)、および 12~3月に芽の壊死が増加する (浅井ほか 1983) ことと対応する。

これらのことから、海岸林の芽吹きすなわち成長は、越冬期の海風によって決定されるという状況証拠が得られたことになる。

また他の地点においても、芽吹き数と気象データの対比から関係式を得ることにより、海岸林前線における頂部からの芽吹きの概略を年度別に推測することができる。

2 越冬期におけるカシワ・ミズナラの枝条枯死

前節により越冬期の海風がカシワ・ミズナラの芽吹きおよび枝条の枯死と密接な関係にあることが示された。本節では越冬期に枝条の経時的観察を行い、枯死が葉痕部から発生することを示す。調査は天塩町サラキシの天然生のカシワ林で以下のように行った。カシワ・ミズナラの冬芽の生死を外見から判断することは困難であるので、芽部をナイフで縦断して確認した。サンプリングは1981年11月、1982年1月および同3月に1981年伸長枝を採取した。枝の採取は前方林縁から3m (P1)、20m (P2) および40m (P3) 地点である。芽の縦断観察から、芽の枯死および葉痕部の褐変の有無について記録した。1982年2月に道北地方の18林分とオホーツク海側13林分から、また1982年3月に中川町、道東の新得町および道南の七飯町、函館市から1981年伸長枝を採取し同様の観察を行った。採取枝数は天塩では1調査区当たり1回30本、その他は1林分当たり15本である。

なお、梢端部枯死のしかたにカシワとミズナラの違いがみられないため、両者を同等に扱った。

結果は次のとおりである。

ア) 葉痕部の褐変：カシワやミズナラの頂生側芽、側芽にはその基部に必ず1個の葉痕があるが、頂芽では対応する葉痕を特定できない。そこで以下述べる芽はとくに断わらない限り、頂芽を除いた頂生側芽と側芽である。

まず、芽が枯死している場合には例外なく葉痕部の褐変が観察された。

一方、芽が生存している場合にも、海岸部では葉痕部が褐変している例が多くみられた。この場合、図-9に示すように離層にごく近い部分だけ変色しているもの(a)から、芽の先端部を除いて葉痕部から芽の基部全体を覆うように変色しているもの(b)まで、各段階の褐変が観察された。この「芽は生存・葉痕部は褐変」は海岸部では全ての林分で認められたが、内陸部では全く認められなかった。

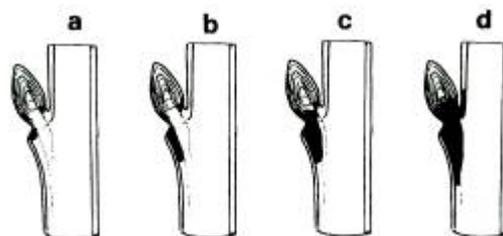


図-9 カシワの芽基部褐変の進行模式

褐変の経時変化：天塩における芽と葉痕部の褐変の観察結果を、

- A. 芽・葉痕部の両者が生存
- B. 芽は生存・葉痕部は褐変
- C. 両者とも褐変

に区分し、この3者の占める比率の経時変化を調査地点別に図-10に示す。図から、葉の褐変(C)は1981年11月のP1を除くと、この観察時点においても汀線に近いほど多いことがわかる。また芽の褐変はどの地点でも1981年11月より1982年1月、1月より3月と経時的に増加していることがわかる。さらに「芽は生存・葉痕部は褐変」(B)はP1, 2の1981年11月や1982年1月では比較的多く認められるが、1982年3月ではごくわずかしき認められず、当初の「芽は生存・葉痕部は褐変」(B)の大部分は芽の枯死(C)に移行したと思われる。すなわち、葉痕部が褐変している芽は、その

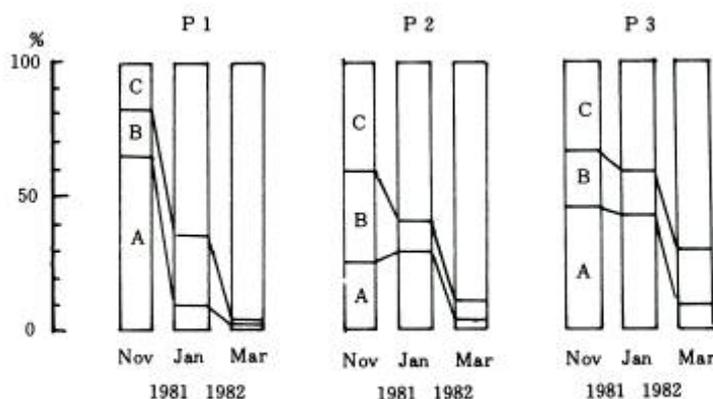


図-10 芽と葉痕部の褐変率の経時変化(天塩町サラキシ)

時点で芽が生存していても、近い将来に大半が褐変すると考えられる。なお、図-10 では観察開始時点の1981年11月ですでに芽の褐変がみられたが、それ以前の芽の異常は、まず「芽は生存・葉痕部は褐変」が林分内に極く少数出現することを1982年秋に確認している。これらのことは、健全な芽の葉痕部に生じた褐変が図-9のa~bの順に進行して、ついには芽部の褐変枯死に至ると考えられる。

イ) 冬芽の枯死原因： 葉痕部の褐変が芽の褐変枯死へと進むことから、葉痕部の褐変原因を冬芽の枯死原因と考えてよいであろう。芽に先行して葉痕部が褐変するのは海岸部ではすべての林分でみられたが内陸部では皆無であったこと、また圃場での海水噴霧試験(浅井ほか1986)でロウを塗布しない枝の葉痕部に類似の褐変がみられたことなどから、葉痕部の褐変の原因は海風で運ばれる塩分であると考えられた。さらに、芽より先に葉痕部が褐変することから、その塩分は葉痕部から侵入するものと推測した。

このことは本章1節で示したように、道北地方の天塩と枝幸の海岸の1980~1983年の各年度の頂芽と頂生側芽からの芽吹き数は、ともに海風の積算値と密接な関係にあることを矛盾なく説明している。

3 越冬期におけるイタヤカエデ枝条の枯死

次の3ヵ所の海岸林において経時観察を行った。

a) 石狩郡石狩町親船の海岸から300m離れた地点である。前方に砂丘を欠き、風当たりの強い天然生カシワ林帯の前縁から20m地点にあるカシワとイタヤカエデ(各樹高3m)、およびやや凹地で風当たりの弱い箇所ので両樹種が並んで成立している箇所からサンプリングした。これらのイタヤカエデは、この林帯で最も海岸側に生育する個体である。なお両林冠形は風衝形を呈している。

b) 厚田郡厚田村シラツカリの海岸から50m離れた標高37mの海岸砂丘肩部に成立する天然生カシワ林、およびそこから50m側方の、ほぼ同一地形上にある天然生イタヤカエデ林からサンプリングした。両林分とも、肩部では著しく樹冠形が偏っている。このプロットは、3ヵ所中最も塩風の影響が強いとみられる。イタヤカエデについて、枝部の傷の影響をみるために、1988年12月30日に1988年伸長枝の中央~基部に長さ1cm、幅2mmの大きさで表皮を薄く剥ぐ程度にナイフで傷つけ、3月15日に採取し、観察した。

c) 厚田郡厚田村ヤソスケの海岸から20m離れた海食崖の脚部に当たり、標高8mの位置に孤立状に自生した樹高4mのイタヤカエデからサンプリングした。海食崖は傾斜45度、標高差は200m以上の長大斜面をもつ。海岸に最も近いプロットであるが、樹木は風衝形を呈していない。

以上のプロットにおいて、林冠を形成している生存枝を1988年12月30日にテープでマーキングしておき、これらを15本ずつ採取した。サンプリング日は1988年12月30日、1989年2月3日および3月15日の3回である。1988~1989年の冬期は季節風が弱く(気象協会1989)、例年と比べて海岸林の生存にとって良好であったとみられる。

カシワもイタヤカエデも頂芽部から褐変が始まる例が多いが、それに限らず側芽の基部も独立に褐変した。各地点における枝条の褐変の進行を、1988年に伸長した枝ごとに全芽基部数に対する褐変数を尺度として示し、その季節変化を表-9に示す。12月30日にはすでに褐変がみられ、とくに枝の先端部で顕著である。その後、季節とともに他の部分にも発生し、増加してゆく傾向がある。イタヤカエデはカシワと比べると、頂芽部の褐変比率が高く、反対に側芽部では低い傾向がある。しかし、塩風の強い所では壊死が増加して、樹種間の差は季節とともに減少する。

芽基部における壊死の進行のモードは次のとおりである。カシワについては前節の図-9に示した季節推移

表-9 イタヤカエデ・カシワ芽基部カッペンの経時観察

| | イタヤカエデ | | | | | カシワ | | | | |
|-------------------|-----------|-------|------|--------|-----|-----------|-------|-----|--------|-----|
| | 観察日 | 頂芽部 | 比率 | 側芽部 | 比率 | 観察日 | 頂芽部 | 比率 | 側芽部 | 比率 |
| 厚田シラツカリ (段丘肩部) | '88.12.30 | 28/41 | .68 | 64/316 | .20 | '88.12.30 | 21/78 | .27 | 22/142 | .16 |
| | '89.2.3 | 27/41 | .90 | 81/357 | .23 | '89.2.3 | 48/69 | .70 | 48/145 | .33 |
| | '89.3.15 | 45/45 | 1.00 | 85/263 | .32 | '89.3.15 | 60/63 | .95 | 49/119 | .44 |
| 石狩町親舟 (風衝) | '88.12.30 | 21/45 | .47 | 10/240 | .04 | '88.12.30 | 5/33 | .08 | 2/95 | .02 |
| | '89.2.3 | 24/44 | .55 | 24/201 | .12 | '89.2.3 | 20/68 | .29 | 9/93 | .10 |
| | '89.3.15 | 36/42 | .86 | 50/226 | .22 | '89.3.15 | 40/73 | .55 | 27/97 | .28 |
| 同上 (凹地) | '88.12.30 | 18/42 | .43 | 6/289 | .02 | '88.12.30 | 6/59 | .10 | 5/109 | .05 |
| | '89.2.3 | 24/45 | .53 | 14/254 | .05 | '89.2.3 | 9/81 | .11 | 8/110 | .07 |
| | '89.3.15 | 27/45 | .60 | 14/222 | .06 | '89.3.15 | 11/66 | .17 | 12/95 | .13 |
| 厚田町ヤソスケ 海食崖脚部 | '88.12.30 | 3/42 | .07 | 0/189 | .00 | '88.12.30 | | | | |
| | '89.2.3 | 23/45 | .51 | 17/242 | .07 | '89.2.3 | | | | |
| | '89.3.15 | 25/43 | .58 | 29/256 | .11 | '89.3.15 | | | | |

分子：褐変基部数 分母：着生芽数

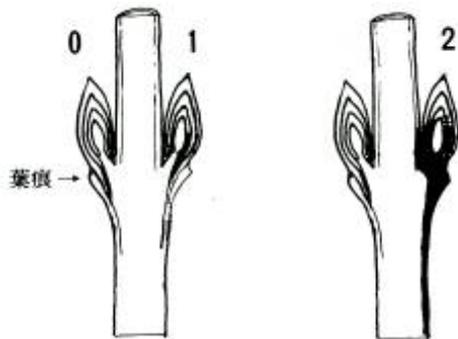


図-11 イタヤカエデの芽基部褐変の進行模式

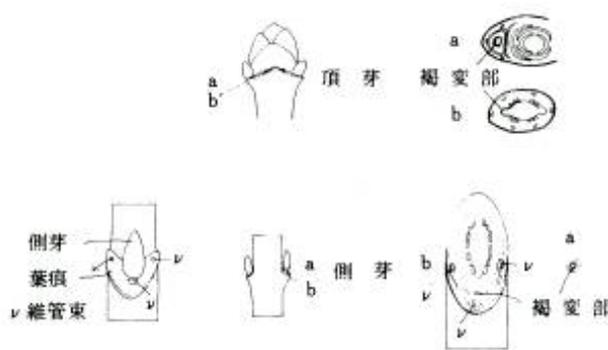


図-12 イタヤカエデ芽基部の褐変初期段階

と同様であった。図-11に海岸林においてイタヤカエデの枝条の一部が褐変し、それが季節とともに進行する状況を模式的に示す。イタヤカエデの場合は芽部が小さく、ルーペを用い観察する必要がある。イタヤカエデもカシワと同様に芽基部から褐変が始まっており、これが芽基部全体の壊死に拡大する。イタヤカエデの場合はさらに小枝全周の内皮部の壊死を起こすことが時期別調査から観察された。このことから、イタヤカエデにおいてもカシワと同様に飛来塩分によって枝条の枯死が起こされると考えられる。カシワは図-9に示すように葉痕部の褐変が明らかであるが、イタヤカエデの場合は図-12のように初期段階の褐変は芽基部の髄周辺部にみられ、葉痕部および葉痕の維管束は正常であり、壊死が葉痕部から進行するとは断定できない。褐変の後期(図-11-2)の芽基部の状態は多く観察された。初期段階(図-11-1)が少なかった理由として、イタヤカエデの芽基部の褐変は進行が速いと推測される。なお、イタヤカエデは同図-2の段階においても、芽は緑色を帯びている例が多くみられた。この傾向は図-9のカシワと同様である。

表-10にシラツカリにおいて自然に傷を受けたイタヤカエデの1988年伸長枝の褐変と、人工傷による結果を示す。ともに、傷部より先端側の内皮部が褐変し、芽基部では褐変が進んでいた。枝の自然傷は採取時に気がついたものであり、塩風にさらされていた期間は不明である。これから、イタヤカエデの場合は芽基部の壊死の他に、枝の傷から内皮部に褐変が起こり、傷から先端側の枝を枯死させることがわかった。

調査地間の比較では、海岸に最も近いヤソスケの

表-10 イタヤカエデ枝の傷から先端側の芽の枯死状況(厚田村シラツカリ)

| 処理 | 3月15日における結果 | | | | |
|-----------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 人工傷つけ ('88.12.30) | 11/11 | 23/23 | 13/13 | 18/18 | 13/13 |
| 自然の傷 | 5/5 | 17/17 | 4/4 | 16/16 | 22/22 |

サンプル：5本ずつ。 分子：各枝の枯死した芽基部数。
分母：同全芽基部数。

海食崖脚部は、イタヤカエデの褐変率でみると、海から 300m離れた平坦地形の石狩町親舟の 2 地点の平均に近い値であった。ヤソスケに次いで海に近い、シラツカリの段丘肩部では、両樹種の褐変が最も著しかった。枝条の褐変は海からの距離のみでなく地形による影響を強く受けると考えられた。

次に内陸部におけるイタヤカエデ枝への塩水添加試験を行った。

石狩海岸から、30km 離れた札幌市白石区の市街地においてイタヤカエデ枝の塩水処理試験を行った。萌芽により叢生した樹高 3m のイタヤカエデの枝を用い、頂芽部と小枝の幹部を別々に直径 1cm の球形の大きさに脱脂綿で覆い、飽和食塩水をスポイトで添加した。枝の幹部への処理はシラツカリと同様に行い、薄くナイフで表皮部に傷をつけた区と、傷をつけない区を設定した。食塩水の添加は 1988 年 12 月 11 日から 1989 年 3 月 15 日まで毎週 2 回行った。対照区は純水を用いた。

脱脂綿を介して行ったイタヤカエデへの塩水添加試験の結果を表-11 に示す。この結果、純水区は芽基部、枝幹部ともに健全であるが、塩水添加区では褐変が顕著であり、塩水の影響は明らかであった。すなわち、塩水添加によって、芽および芽基部の幹の内皮に褐変が観察され、さらに褐変は枝の全周に及んでいた。この状態は海岸林で観察されたものと同じとみられた。また、枝は傷がなければ、塩水の影響を受けないが、傷をつけることによって塩水の影響を受けることが明らかであり、海岸林におけるイタヤカエデの枝相互の接触による傷からの枯死、およびシラツカリにおける枝への傷つけ処理の結果と一致することがわかった。

イタヤカエデについては越冬期に若い枝が枯死することが坂本ほか (1983) により報告されており、その進行過程を明らかにする必要がある。筆者はイタヤカエデをカシワと比較しながら枝条の観察と塩水処理実験を行った。その結果、ア) 海岸林において、両樹種とも越冬期に頂芽基部の褐変から始まる枝の枯死が進行する。

イ) 内陸部における飽和塩水処理により、ア) の最終的な枯死と同様な芽基部および枝の内皮部の褐変が両樹種で多く発生する。

これらのことから、イタヤカエデの海岸付近における枯死は、カシワと同様に飛来塩分によって起こされると結論できる。

また、イタヤカエデは枝幹部に傷があれば塩水処理によって傷より先端側の枝が枯死するが、これは海岸林において枝に傷があればイタヤカエデの枝は枯死しやすい現象と一致することなどがわかった。次に、イタヤカエデとカシワの越冬期における塩分に対する抵抗力を比較検討する。カシワとイタヤカエデは枝の張り方、葉痕の大きさなどが異なるので、塩風に対する抵抗力を厳密に比較するのは難しいが、ここでは芽の生存が樹冠の形成に寄与すると考えて、芽基部の生存率で比較した。この結果、海岸林ではイタヤカエデの頂芽部は観察の当初から褐変が進み、後期になってもカシワよりも褐変率が高い。側芽については、カシワよりもイタヤカエデの生存率が高かった。イタヤカエデは枝の長さがカシワと比べて長いので、頂芽部の枯死率が高くても、側芽から展開する枝によってその影響は緩和されると考えられる。

石狩における海岸砂丘の植生分布結果 (長谷川 1984, 伊藤 1985, 農林水産技術会議 1987) から、前線側にカシワが優占して、後方ではイタヤカエデが優占することが明らかである。このことから、カシワがイタヤカエデよりも耐塩性があるように推測されるが、ここで示した越冬期の耐塩性からみると、頂芽を除いて

表-11 内陸部のイタヤカエデ枝への飽和食塩水処理結果

| 近理部位 | 処 理 | | | 結 果 | |
|------|-----|----|----------|-----|----|
| | 脱脂綿 | 純水 | 傷付け 塩水処理 | 健全 | 褐変 |
| 頂芽部 | ○ | ○ | | 9 | 1 |
| | ○ | | ○ | 1 | 10 |
| 幹 部 | ○ | | ○ | 10 | 0 |
| | | | ○ | 0 | 10 |
| | ○ | | ○ | 0 | 10 |
| | | ○ | ○ | 10 | 0 |
| | ○ | ○ | | 10 | 0 |

この推測と一致しない。

一方、図-13 に示す共和町リヤムナイの海岸から300m 離れた上木のない砂丘に植栽された両樹種の生育比較（北林試防災科 未発表）では、イタヤカエデがカシワよりも現存率および樹高成長は良好であり、上の結果と整合性がある。このことから、天然生海岸林における両樹種のすみわけは、越冬期の飛来塩分に対する耐性以外の生態的な条件によっていると推測される。

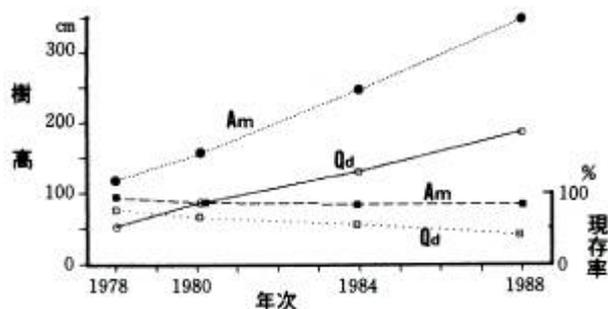


図-13 海岸林植栽成績（共和町リヤムナイ）

○-Qd 樹高, ●-Am 樹高, □-Qd 現存率, ■-Am 現存率

4 枝条の枯死原因

浅井ほか（1986）は、飛来塩分の影響が大きい天塩町サラキシの天然生カシワ林と、飛来塩分の影響を受けない内陸部の中川町において鉢植えしたカシワにロウ塗布試験を行い、次の結論を得た。

- ①ロウを葉痕部に塗布しないと、海岸林および海水を噴霧した内陸部のカシワ枝条の越冬期における枯死率が非常に高い。また枯死の症状は両者に差がみられない。
- ②ロウを葉痕部に塗布することにより芽吹きを有意に高めることができる。
- ③芽だけに塗布しても効果はない。

以上から、葉痕部から塩分が枝条に侵入して芽基部に壊死を起し、結果的に枝条を枯死させると結論した。

カシワは内陸部では、他の樹種と異なり着葉したまま越冬するが、このことがカシワが天然生海岸林の最前線を占めることに関係があると推測できる。

また、この知見から次の応用が考えられる。

圃場の海水噴霧試験および天塩において枯死葉を着けたままの枝に着生する芽基部の褐変率は、統計的には有意ではないが落葉した芽基部よりもかなり低かった（浅井ほか 1986）。これらは、葉が塩分の侵入口としての葉痕部を葉が塞いでいると考えれば説明がつく。また葉が飛来塩分の付着を促進して枝条に付着する塩分を減少させる効果も期待できる。これらのことは着葉したまま越冬することが芽の生存にいくらか有利であることを示し、脱葉の遅い個体を増殖することにより、海岸林造成の成功率を改善する可能性を示す。

以上、道北地方の天然生カシワ・ミズナラ海岸林の枯死原因は飛来塩分であり、その塩分の侵入口は葉痕部であると考えられる。イタヤカエデについても枝の傷あるいは芽の基部から壊死が起こることがわかった。

第IV章 飛来塩分の分布

北海道の海岸地帯における秋冬期の強い季節風による飛来塩分は、海岸林の生存に大きな影響を与えている。とくに樹冠上部の枯死は樹高成長を妨げて、海岸林の防塩効果の発揮を減退させている。飛来塩分の高度分布の測定およびその一般化は、海岸林の成長や林冠形の発達および防風施設の高さ、配置、形態などの改善にとり重要な資料となる。飛来塩分の高度分布に関する理論解析は大スケールではすでに報告されている（千秋ほか 1973, 塩害対策専委 1964, 鳥羽 1969）。しかし、海岸林の環境解析に必要なスケール、すな

わち汀線からの距離が数 100m、高度数メートルの規模における高度分布は幸喜（1978）の例以外報告されていない。まず平坦地形において、飛来塩分の高度分布を測定し、その実態を示し、またその法則性を飛来塩分粒子の落下現象および地表面における完全吸着を前提とした拡散モデルを用い、その有用性について検討する。次に、海岸に近い段丘地形が飛来塩分の高度分布に与える影響を平坦地との比較により検討し、斜面位置による植生環境の緩和あるいは激化の実態を示す。また平均飛来塩分分布による環境区分を行う。

1 平坦地形上の飛来塩分

調査地を北海道石狩郡石狩町の石狩川河口付近の平坦地（図-3中の4）にとり、汀線から距離 150m付近までの飛来塩分の垂直分布を約 35mおきに調査した。汀線には砂浜が発達し、海中に岩礁や消波ブロックなど波しぶきをとくに発生させるものはない。調査地はほとんど砂地で、倒伏したハマニシクノ枯葉と、一部に株高 10cm 程度のハマナスが点在する。汀線から約 25m までは約 3 度の傾斜で、そこに約 1 m の高度差がある。そこから内陸は平坦である（図-14）。

飛来塩分の捕集は図-14中の Is-0~4で行った。塩分を捕集するトラップは糸トラップを用い、支柱上の高さ 0.2, 0.5, 0.8, 1.1, 1.4, 2, 3, 6, 9m の位置にセットした。トラップは水平に張り、かつNWが直角に当るようにした。支柱には測高竿を用い、三方から細ひもで固定した。飛来塩分の捕集は 1984 年 11 月 28~29 日, 12 月 6~7 日, 17~19 日, 19~23 日の 4 回行った。各日における石狩町の風向、風速を表-12に示す。各日も海は大シケであったが、降雨・降雪はなかった。塩分はトラップの糸長 0.5m 当たり・暴露期間中の全 C?, mg で示した。風速の垂直分布は 1985 年 2 月 7 日に Is-0~4 において高度 0.2~5m の 5 点を携帯用三杯風速計で測定した。結果を次に示す。

石狩における汀線から 150m 付近までの飛来塩分の高度分布を図-15中の黒点で示す。Is-0 における C? の量は、低い高度で最も多く、高度とともに急激に減少する。Is-1 では、高度 1.5m 以下で減少するがそれ以上では Is-0 と類似ないしはやや多めの値を示す。Is-2 から後方では C? が減少してゆき、Is-3, Is-4 では高度による飛来塩分の差が小さくなる。分布形の距離的变化は低い高度で著しく、Is-0 における初めの分布形が内陸に向かうにつれて中ふくらみの形を示し、また、地表面に最小値をもつ分布形となる。この形は幸喜ほか（1969）が福岡県の海岸で得た結果と類似する。高度 6 m では距離による C? の差が小さくなり、高度 9 m では一定値に近い。

飛来塩分の高度分布の再現を次のように行った。Is-0 における飛来塩分の分布形から各地点の値を再現するために「ある微小区間の飛来塩分量の減少は、塩分粒子の拡散と落下によって起こる」とする次式（塩

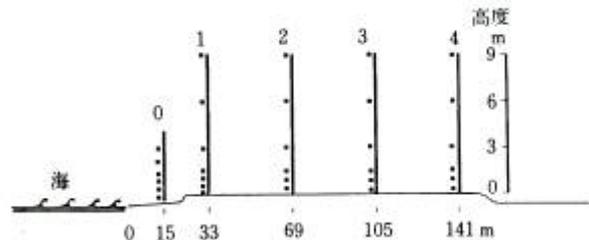


図-14 トラップ配置図（石狩 Is ライン）

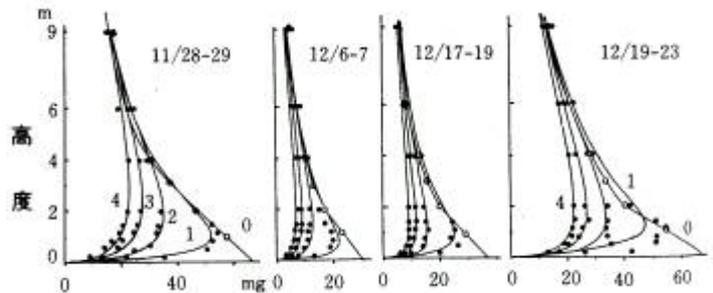


図-15 飛来塩分の分布（石狩 Is ライン）

害対策専委 1964) を用いた。

$$U \times \partial C? / \partial X = D \times \partial^2 C? / \partial Z^2 + W \times \partial C? / \partial Z \dots \dots \dots (1)$$

- ただし、U：平均風速 (cm/sec)
 C?：飛来塩分量 (mg/trap)
 X：Is-0 からの距離 (cm)
 D：塩分粒子の乱流拡散係数 (c m²/sec)
 Z：高度 (cm)
 W：塩分粒子の落下速度 (cm/sec)

上式は粒子の直径別に成り立つが、ここでは平均粒子を想定して一括した。また、再現のために、次の検討をした。

初期値： 初期値を Is-0 における飛来塩分の分布形にとった。Is-0 では、C? の捕集を 4 m の高度までしか行わなかったが、高度 9 m の値が各地点ともほぼ一定値を示したので Is-0 と Is-1 の 9 m の値を等しいとおき、各高度の C? 値に指数関数をあてはめた。12 月 6～7 日は 3 m 以上で、また、12 月 19～23 日は 2 m 以上の高度で同関数に当てはまった。他の測定日については、指数曲線から外れたが、3 m 以上の高度でべき乗式によい一致を示したので、同式を用いた。これら以下の高度については、C? 値を直線変化するとみなして初期値とした。

境界条件： 地表面において塩分粒子が完全に吸着されるとみなし、高度 0 における飛来塩分量=0 と置いた。

塩分粒子の拡散係数 D (c m²/sec)： D は粒子の直径、風速、高度等によって複雑に変化する。また前 2 者は汀線からの距離とともに変化する。飛来塩分の再現を行うとき、D をなんらかの方法によって簡略化して求める必要がある。そこで、気層が中立状態の時、D を風の運動量の乱流拡散係数 Km に等しいと仮定すれば、次式を得る (農業気象ハンドブック編委 1969)。

$$D = k^2 \cdot z \cdot (u_2 - u_1) / \ln (z_2/z_1) \dots (2)$$

ただし k はカルマン常数=0.4 である。

gr = (u₂ - u₁) / ln (z₂/z₁) とすれば、gr は風速と高度の対数分布図における勾配を示す。gr を次により求めた。

石狩海岸の測定において、高度 2 m の風速が 8.5-10.1 m/sec の時、図-16 に示す風

表-12 文献から再計算した gr

| 測定者 | gr | 風速* | 測定値 |
|-----------|-----|------|-----|
| 竹山 (1950) | 134 | 10.2 | 青森 |
| 〃 | 75 | 4.1 | 〃 |
| 〃 | 150 | 8.4 | 〃 |
| 〃 | 86 | 6.9 | 茨木 |
| 〃 | 53 | 3.5 | 〃 |
| 〃 | 60 | 5.9 | 〃 |
| 玉手 (1957) | 106 | 6.0 | 山形 |
| 幸喜 (1978) | 102 | 6.2 | 沖縄 |

*高度 2m の値

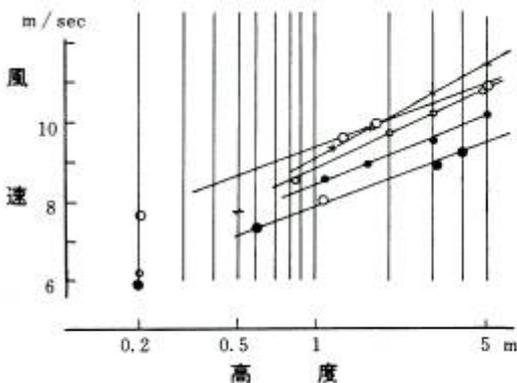


図-16 石狩浜における風速の高度分布
 符号は Is-1 付近の任意地点を表す

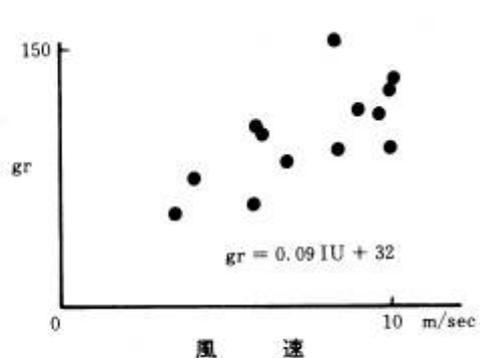


図-17 風速と gr の関係

速分布となり $gr=93\sim 114$ を得た。また竹山 (1950), 玉手 (1957) および幸喜 (1978) における測定例 (表-12) から, なだらかな汀線付近の地形における gr を再計算して求め, U と gr の関係を図-17 に示す。これにより,

$$gr=0.091U+32 \dots \dots \dots (3)$$

の関係をj得て, (2) 式に代入し

$$D=k^2 \cdot Z \cdot (0.091 \cdot U+32) \dots \dots \dots (4)$$

となる。この関係から風速が $7\sim 10m/sec$ の場合, D は $16Z\sim 20Z$ であり, これに近い値をいくつかj行して再現計算を行った。

なお飛来塩分の再現計算に当たり, D が 10, 850 以下において解が安定するので, その範囲において D が高さに比例すると置き, それ以高では最大値 10, 850 で一定とした。

塩分粒子の平均落下速度 W (cm/sec) : 飛来塩分粒子の平均直径観測例 (玉手 1957) では風速 $6.1m/sec$ の時 $20\sim 30\mu$ である。ここではさらに強い風が吹いたので, これより大きい水滴の落下速度をもつとみなして, W を $10\sim 20cm/sec$ 付近として与えた。この落下速度は直径 $55\sim 80\mu$ の水滴に相当する (塩害対策専委 1964)。石狩において風速 $8m$, 海岸から $70m$, 高度 $4m$ の飛来塩分粒子の最多衝突痕の直径は $10\sim 20\mu$ で, その大きさで飛来したとしても水球換算で $W \approx 1$ と小さい値を示し (千秋ほか 1973), 海岸から離れると高度数 m では W を無視できることがわかった (薄井・清水 1985)。

表-13 飛来塩分再現に用いた拡散係数および落下係数 (石狩)

| 捕集日 | 拡散係数 | | 落下係数 | |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| | 0-18m | 18m以後 | 0-18m | 18m以後 |
| 11/28-29 | 17Z | 29Z | 6.4 | 21 |
| 12/6-7 | 22Z | 54Z | 18 | 50 |
| 12/17-19 | 15Z | 25Z | 6.6 | 30 |
| 12/19-23 | 15Z | 19Z | 4.5 | 18 |

計算は付表-1 に示すプログラムによった。計算の刻みは距離方向に $5cm$, 高さ方向に $12.5cm$ の差分法で計算した。

これらの結果, 表-13 の値を与えることにより図-15 中の曲線で示す分布が再現できた。パラメータの比較的簡単な与え方で, 一応の再現がなされており拡散方程式の有効性が海岸林のスケールにおいても確認されたといえる。また, 飛来塩分粒子は地表や植生に触れると反射せず完全吸着するとみなせることがわかった。この高い吸着性は, $C?$ 分布が地表で最小値を示す理由であると考えられる (塩害対策専委 1964)。塩分粒子 D と風の運動量の乱流拡散係数 K_m を等しいと置くことにより, 最前部の D が推測されたが, それより後方の区域では, D を増加させることが必要であった。この理由として, 内陸側における風速の減少, D の変化などが考えられる。

次に, 汀線から距離 $500m$ 付近までの飛来塩分の垂直分布を, $100m$ おきに測定した。石狩の調査地とは河口をはさんだ対岸に当たる厚田郡厚田村シラツカリの平坦地形面 (図-3 中の 1, 2, 3) で行った。海岸線はほぼ NE-SW である。汀線は砂浜で, 海中に岩礁や消波ブロックなど波しぶきを特に発生させるものはない。汀線から $500m$ 離れて高さ $35m$ の海岸段丘がある b ラインにおいて, 主風の NW-SE 方向に沿って, 0, 100, 200, 300, 400m の 5 地点 (以下, Ab-0, Ab-1, Ab-2, Ab-3, Ab-4 という) を設定した。汀線から Ab-3 までは無立木地でススキが点在する。別に, 汀線から $900m$ 離れて高さ $25m$ の海岸段丘がある c ラインにおいて, 上と同じ方向に 400, 500m の 2 地点 (以下 Ac-1, Ac-2 とよぶ) を設定した。汀線から $100\sim 200m$ の位置に防風垣が設置されている。植栽木は垣高に達していない。塩分捕集トラップは石狩試験地と同じものを用い, 同様な方法により高さ 1, 2, 3, 4, 6m にセットした。トラップの設置, 回収には 6 時間を要するため, 設定・回収日は海風が吹かない日に行った。飛来塩分の表示は石狩試験地と同じく, 期間中の合計量 $C?$ mg/センサー長 $50cm$ で示す。

表-14 飛来塩分捕集期間の風向風速

「北海道の気候」による

| | | 風向および風速 (m/s) (石狩町) | | | 1984 | |
|-----|----|---------------------|------|------|------|------|
| | | 日 | 平均風速 | 最大風速 | 風向 | 最多風向 |
| 11月 | 28 | | 6.1 | 10 | NW | WNW |
| | 29 | | 2.8 | 8 | W | SSE |
| 12月 | 6 | | 6.5 | 12 | NW | WNW |
| | 7 | | 2.4 | 4 | WSW | SE |
| | 17 | | 3.7 | 6 | W | W |
| | 18 | | 1.9 | 5 | W | SE |
| | 19 | | 1.3 | 3 | SSE | NE |
| | 20 | | 2.5 | 5 | SE | SSE |
| | 21 | | 3.8 | 6 | WNW | WNW |
| | 22 | | 3.8 | 6 | WNW | WNW |
| | 23 | | 2.3 | 4 | W | W |

風向および風速 (m/s) 石狩町 1985

| | | 日 | 平均風速 | 最大風速 | 風向 | 最多風向 |
|-----|----|-----|------|------|-----|------|
| 11月 | 12 | | 3.4 | 7 | W | SE |
| | 13 | | 3 | 7 | W | W |
| | 14 | | 3.5 | 7 | W | WSW |
| | 15 | | 7.5 | 11 | WNW | W |
| | 16 | | 4 | 6 | WNW | W |
| | 17 | | 1.8 | 4 | NW | SE |
| | 24 | | 5.7 | 8 | WNW | W |
| 25 | | 6.5 | 11 | NW | W | |
| 26 | | 7.3 | 10 | WNW | W | |
| 27 | | 5.5 | 8 | W | W | |
| 12月 | 4 | | 6.6 | 9 | WNW | SE |
| | 5 | | 7.3 | 9 | W | W |
| | 6 | | 6.7 | 11 | WNW | WNW |
| | 7 | | 3 | 5 | WNW | WNW |
| | 8 | | 1.4 | 3 | SE | SE |

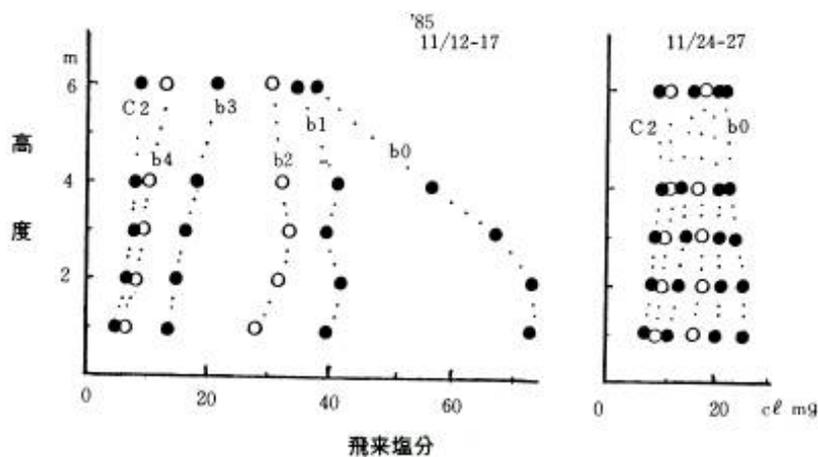


図-18 飛来塩分の分布 (厚田村シラツカリ Ab・Acライン)
C1はb4と重なったため省略

飛来塩分の測定期間は石狩の場合よりも長く、1985年11月12-17日、24-27日、12月4-8日である。各日における石狩町の風向、風速を表-14に示す。なお、12月の捕集は湿雪が降ったためデータの一部が乱れたので、再現計算には用いなかったが、平均飛来塩分の算定には使用した。

汀線から距離500mまでの飛来塩分の垂直分布再現を次に示す。

2回の測定例について、各地点の飛来塩分の高度分布を図-18中の点で示す。Ac-1の各高度における値はAb-4のそれにほぼ等しいので、以下では汀線から500mにわたり連続する分布変化として扱う。汀線Ab-0は高度1.2mで値が最大であり、高さとともに減少している。またAb-0は全ての地点の中で最大の値である。Ab-0から順に値は減少するが、高さによる分布形も変化して内陸に行くにつれて最大値が上方へ移動してゆく。これは、陸上を進むにつれて塩分粒子の拡散と落下による運動と地表面における完全な吸着とにより変化してゆく石狩の結果と同一であるが、さらに距離を延長したときのパターンを示している。

再現の方法は石狩の方法に準じた。すなわち、

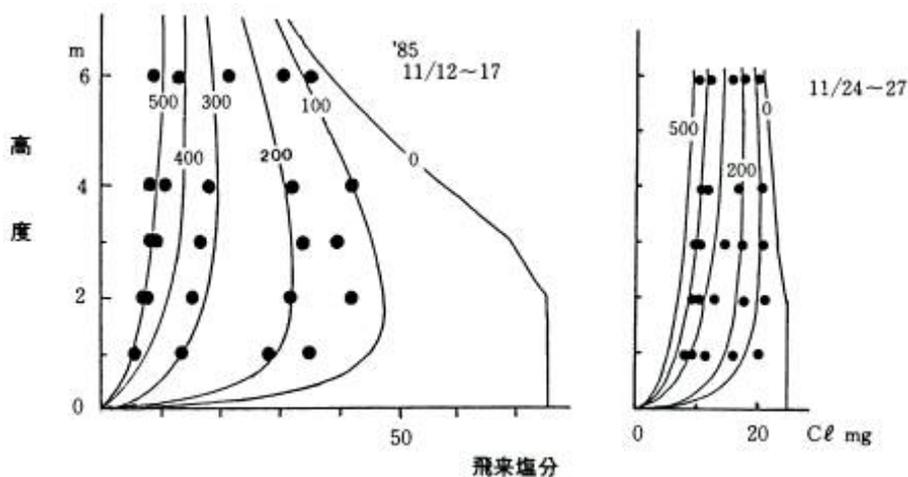


図-19 飛来塩分の高度分布再現(厚田村シラツカリ)

初期条件： Ab-0における飛来塩分の高度分布である。海が最も荒れた汀線から15mにAb-0地点を設定したが、静穏の時の汀線からは約40m離れたため、飛来塩分の分布形が変化している。第1回の測定では高度2m以下は一定値74mg、2-3mは直線変化して与え、第2回の測定では高度2m以下は25mgを与えた。それ以降は高度3、4、6mの飛来塩分量から高度の指数分布を当てはめた。

付表-1のプログラムに準じて計算を行った。結果は図-19の曲線に示すように、表-15の係数を与えることにより、測定値の再現をすることができた。この場合も石狩と同様に、海岸に近い部分では、風速から推定されたKmに近い値で再現ができたが、その後方ではDを大幅に増加させる必要がある。

汀線における飛来塩分の高度分布は陸上における分布の初期値として意義をもつ。広い海上において塩分粒子の発生と消滅が平衡状態になったとき、すなわち

$$\partial C / \partial X = 0$$

表-15 拡散係数(D)、落下係数(W)の例(厚田シラツカリ)

| | | 200mまで | 500mまで |
|----------|---|--------|--------|
| 11/12-17 | D | 16Z | 24Z |
| | W | -15 | -15 |
| 11/24-27 | D | 16Z | 24Z |
| | W | -15 | -15 |

ともに、3m以上でW=0

では、拡散方程式は

$$C_z = C_0 e^{-nz} + \text{const} \dots \dots \dots (5)$$

と解ける (はるか上空で $C_z = 0$ であるから, $\text{const} = 0$ である)。 C_z , C_0 はそれぞれ, 高度 Z , 0 における飛来塩分濃度である。鳥羽 (1969) によると n は海上では $0.002 - 0.005$ であるが, 石狩の 12 月 6-7 日, および 12 月 19-23 日の n は, それぞれ 0.0016 と 0.0018 であった。玉手ほか (1957) の山形県浜中のデータや, 門田 (1949) の測定例では, それぞれ 0.0018 , 0.0019 であり, 鳥羽の値よりも小さい。この状態で汀線に達すると, 飛来塩分は高度とともに指数関数的に減少するはずであり, 上に述べた玉手や, 門田の測定例ではこの分布を示した。しかし, 実際の高度分布は下方で多めに外れ, 指数曲線に合わない場合がある (玉手の横浜村のデータ, 金内 1979, 幸喜ほか 1969)。これは, 汀線に近づくと波頭が高くなり, 空中塩分量が下部から追加されるため, あるいは, 捕集期間が長いために弱風の日の磯波の影響と考えられる。指数曲線から外れた石狩の 2 例については, 3m 以上の高度でべき乗式がよく適合した。 3m 以下では各高度の値を直線で結んだ。なお厚田の汀線 $A b - 0$ における 1m の値が指数分布より小さいのは, 汀線から 40m 離れていたため高度の分布が変化したものと考えられる。

また, 海上にサンゴ礁 (幸喜 1978), 防波堤 (幸喜ほか 1969), あるいは流氷 (工藤 1975) などがある場合は, 広い海上における平衡状態が破られるので, 汀線までの距離や障害物の程度によって汀線における高度分布は当然変化する。幸喜 (1978) は沖縄と本州における飛来塩分の分布形の差異を海上のサンゴ礁によるものと結論したが, これはラグーン内の静かな海面によって空中塩分の補給がなくなり, また海面が陸上と同じように飛来塩分を吸着する役割を果たしたと考えることで統一的に理解できる。

飛来塩分分布の再現方法について, 次のようにまとめられる。

陸上における飛来塩分の高度分布の変化は, 単に汀線における分布形が下方に移動してゆくのではない。その変化は, 塩分粒子の拡散と落下, さらに地表面における塩分粒子の完全な吸着などの現象による結果であることが, 石狩の汀線から $0 - 140\text{m}$ において, また, 厚田の $0 - 500\text{m}$ において示された。この法則性は, マクロなスケールでは解明されているが, 高度数 m , 距離数 100m という海岸林の生育に関するスケールにおいても成立することがわかった。

また, 塩分粒子の拡散係数を, 中立状態における風の運動量の乱流拡散係数 (K_m) と置き, 高度とともに増加するとして, 不都合は生じなかった。これは, 塩分の飛来が盛んとなる秋期-冬期の曇天・強風日における地表面が気温とかけ離れた値をとらないことによるとみられる。このことから, 図-17 に示した風速と gr (風速の高度分布勾配) の関係, および風速と W (塩分粒子の平均落下速度) との関係から, 類似の海岸地形における飛来塩分の変化が推測できる。なお D (拡散係数) と W は, ともに汀線から離れるにつれて値が大きくなる傾向がみられるが, ここでは単純化するために風速を距離によらず一定とおいたことに一部の原因があろう。すなわち, 距離とともに風速が減衰する (薄井・清水 1986) ことによる見かけの変化によるとみられる。 D についてはさらに, 風速の減少による D の減少が考えられる。しかし, 実用的には例数を増やし帰納的に汀線付近の両係数に一定値を乗ずることで対応できる。

2 海岸段丘付近の風および飛来塩分

前節では飛来塩分の分布の規則性を論議した。この節では, 海岸付近の林木に対する立地因子として, 汀線からの距離が異なる海岸段丘, 飛来塩分, 風の 3 つを検討した。飛来塩分は, 捕集塩分の平均値, 風は海風の測定値を用いた。

風は飛来塩分粒子の発生および吹送を直接起こし、また乱流を発生させて塩分粒子の拡散を決定するので、飛来塩分の分布は主に風によって生じる。また、地形によっては縦断方向の風の流れが、飛来塩分分布を知るために必要となる。海岸林に与える別の作用例として、強風がカシワ葉の強制脱葉を起こし、抵抗力の弱い葉痕部への塩分障害を助長する（新村 1988）。

北海道において、海岸林の造成あるいは保護の対象になることが多いのは、緩やかな砂丘、海岸段丘であるので、これらを対象に飛来塩分の分布実態を調査した。第 V 章で樹形および生育と飛来塩分環境との関係を検討するが、この節ではその準備として飛来塩分の地形的分布を示した。

調査地は厚田村シラツカリで、石狩川河口付近の広大な平坦面と海岸段丘とが接する地域である。段丘崖は、ほぼ南北に続き、汀線は NE-SW 方向である。汀線に直交し、かつ冬季の主風方向である NW → SE にそって、段丘崖が汀線からそれぞれ 70、500、900m 離れて位置するところに a、b、c の 3 ラインを図-20 のようにとり、各測定点を設定した。このうち、b、c ラインは本章-1 節で述べたラインの延長線上にあたる。

a ラインでは汀線から 15、35、70m 地点の平坦地と、その直後の傾斜 44 度、比高 34m の段丘斜面を 3 等分して測定点を設定した。Aa-2 は山脚、Aa-5 は段丘肩部である。Aa-5 から、さらに平坦面上に 5 m づつ離れて Aa-6、Aa-7 を設定した。

b ラインでは、汀線から 15、100、200、300、400、440、480m 地点の平坦面に Ab-0 ~ Ab-6 測定点を設定した（Ab-0 ~ Ab-4 は本章-1 節の厚田試験地のそれと同一である）。Ab-5 は、山脚部 Ab-6 から前方に段丘の比高相当分の位置に当たる。傾斜 44 度、比高 37m の段丘斜面を 3 等分して、Ab-7 ~ Ab-9 を設定した。Ab-9 は段丘肩部で汀線から 540m の位置にある。

c ラインは、汀線から 400、500、900、930m 地点の平坦地に Ab-1 ~ Ac-4 を設定した。Ac-3 は山脚、Ac-4 は段丘肩部にあたる。

植生状態は飛来塩分の高度分布に大きな影響を与えるが、各ラインとも、トラップの前後は無立木地であり、飛来塩分の垂直分布形が大きく乱されることはないと思われる。

環境測定の方法について述べる。

風の流れの観察： 高さ 5.5m のポールに長さ 60cm のエスロン標識テープをつけ、段丘斜面に正面から風が吹く場合の風の流れを、a ラインの全測定点で同時に観測した。観察は 1985 年 11 月 16 日に行った。その時の風速は段丘肩部 Aa-5 において、ほぼ 13m/sec であった。

風速測定： a ラインにおいて、牧野式 5 点風速計を用い、1 点を段丘肩部の標高 2 m に固定し、他を移動させた。測定時間は各 3 分で、3 ~ 5 回行った。測定高度は 1.0 ~ 5.5m である。測定は、1985 年 12 月 5 日に行った。当日は西北西の風がほぼ一定の風速で吹き、風は段丘斜面に正面から当たっていた。b ラインにおいても測定したが、同じ傾向が得られたので省略する。

油点法による段丘模型上の風の流れの観察： 75 × 38cm、内幅 5 mm の長方形の透明ガラス箱をつくった。短辺の両日は開けておく。上側ガラスを外し、その内側面に使用済みのエンジンオイルをスポイトで適当な間隔に 1 滴ずつ滴下した後、速やかに裏返して閉じる。油点はガラス箱の内面に下垂する。箱内には段丘の縦断模型を 5 mm 角のアクリル棒で、比高 10cm、傾斜角 45 度に作り、模型背面から空気ポンプで吸引

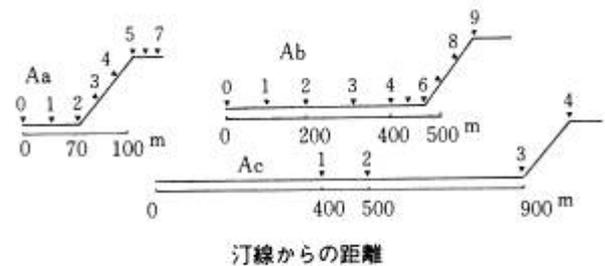


図-20 飛来塩分トラップ配置図（厚田シラツカリ）

した。これによって、模型段丘斜面の正面から風が当たる場合の流れを模した。なお、箱内前縁部の風速は11m/secである。

飛来塩分の捕集と表示： 捕集は本章1節と同様に行い、高さ、1、2、3、4、6mにトラップを設定した。なお、Aa-6、Aa-7は11月12-17のみ設定した。トラップの脱着は、いずれも海風の吹かない日に行った。飛来塩分は積算されて林木の枝条に障害を与えるから、冬期の合計量を求めるのが理想であるが、ここでは石狩については4回の、また厚田については3回の捕集の平均値を用い、汀線の高度2mにおいて示した飛来塩分値に対する相対値で示した。

段丘付近の風の流れおよび風速分布を次に示す。

吹流しによる風の流れの同時観察： 現地に設定した吹流しの状態を、図-21に示す。吹流しによって、風向きだけでなく、風速の目安も得ることができる。観察から、風が斜面上を地形に沿って流れることと、斜面中～肩部では風速が強いことがわかる。山脚部、肩部背後は風が弱く、また、内陸側方向から風が間欠的に吹くのが観察された。この弱風域は、海岸近くにおいて樹木の生育に好条件を与えている。なお、Aa-6、Aa-7は肩部から漸高状に強風域があり、風が肩部から吹き上がっており、平坦地における地面と平行な風の流れとは異なっている。

風速分布： aラインの風速分布を図-22に示す。平坦地形についてみると、まず、斜面から35m前方にあるAa-1の風速は、汀線の半分以下を示したが、Ab-1では汀線と比べ10-20%低下しているにすぎない。これから、Aa-1は風の淀み域に当たっていることがわかる。なおbラインではAb-0とAb-4の間に風速が約30%低下しており、陸上における新しい境界層による風速分布の変化を示した。図に山脚部と段丘肩部背後に明瞭な弱風域が、また、斜面上部から肩部にかけて明瞭な強風域が示されている。また肩部風速が汀線の値よりも大きい。この傾向はbラインでも観察された。

段丘模型上の風の流れ： ガラス箱中に下垂させた油点は、風向・風速に応じて図-23に示したように移動するので、模型上の風の流れ方向と相対風速の概要を知ることができる。この図から、山脚および肩部背後の油点が静止していること、斜面上部・肩部の油点の動きが最も速いことなどがわかり、これらは次のように要約される。段丘模型において、

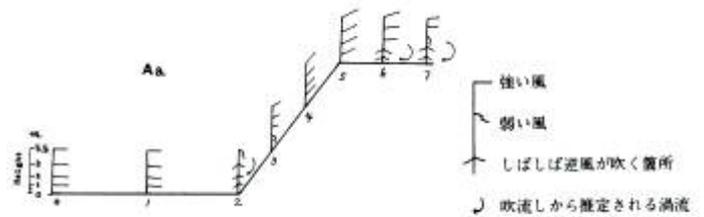


図-21 吹流しによる風の流れ（厚田シラツカリ）

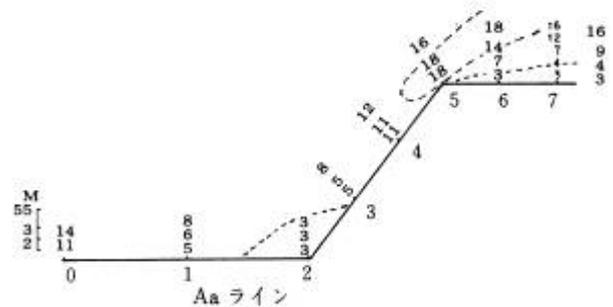


図-22 段丘付近の風速分布 (m/sec)
(厚田シラツカリ)

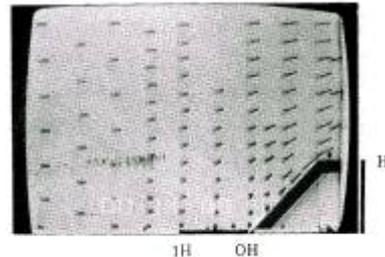


図-23 油点法による段丘模型上の風の流れ

- ア) 斜面部分では、風は斜面に沿って流れる。
- イ) 斜面下部および肩部背後に著しい低風速域がある。また、段丘比高に等しい前側地点では、斜面の影響を受け低風速である。
- ウ) 斜面の上部-肩部に著しい高風速域がある。

これらの傾向は、現地における吹流しによる風の流れ・風速分布の観察結果、ならびに風速測定の結果とよく一致した。

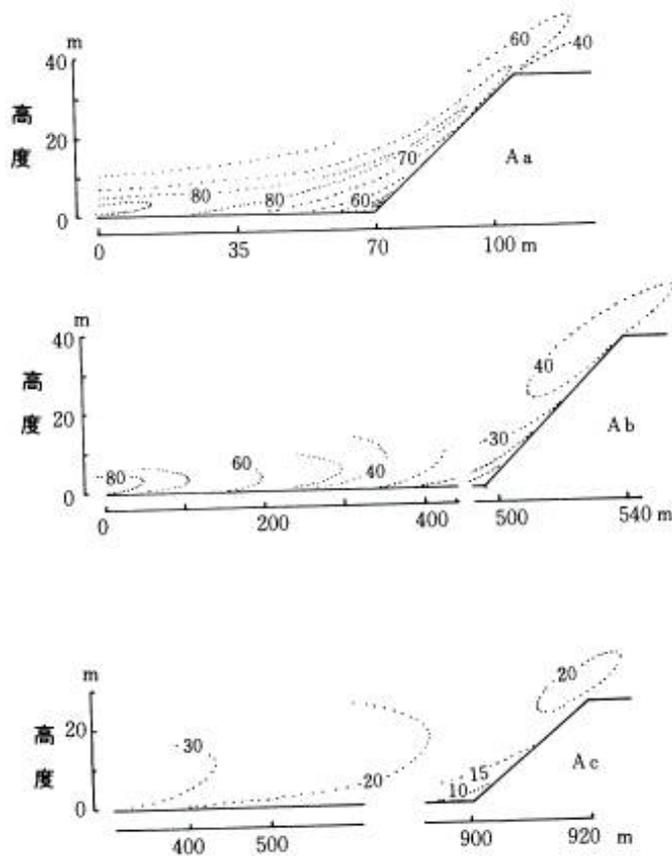


図-25 相対飛来塩分の垂直分布 (厚田村シラツカリ)
100は汀線における高度2mの飛来塩分量

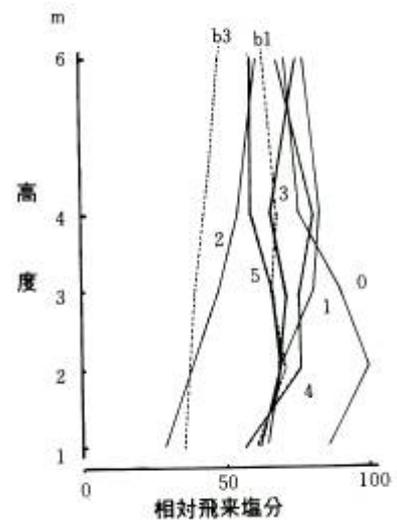


図-24 Aaラインにおける平均相対飛来塩分の高度分布 (厚田村シラツカリ)
100は汀線における高度2mの飛来塩分量

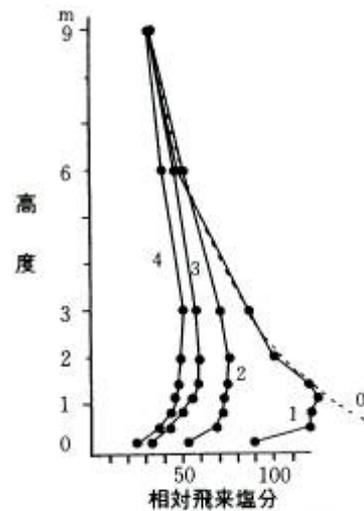


図-26 平均相対飛来塩分の高度分布 (石狩Isライン)
100は汀線における高度2mの飛来塩分量

段丘付近における飛来塩分の高度分布を次に示す。

まず、汀線から約70m離れて斜面があるaラインにおける各高度の相対飛来塩分値を図-24に示す。

Aa-2では、相対飛来塩分がAa-1と比べ急激に減少して、Aa-2の高度1mおよび2mの値は、広い平坦地の300m地点にあるAb-3の値より小さく、斜面の影響を強く受けていることがわかる。Aa-3では再び相対飛来塩分が急増しており、山脚付近の相対飛来塩分の減少域は狭いことがわかる。Aa-4では相対飛来塩分は、斜面における最大値を示した。肩部Aa-5ではやや減少した。汀線から約100m離れた、斜面上のAa-4, Aa-5の相対飛来塩分および高度分布形は、広い平坦地の100m地点であるAb-1の相対飛来塩分および中ふくらみ形と大体同じであることが図からわかる。

Aaラインにおける相対飛来塩分の等量線図を図-25の上部に示す。上で述べた分布の距離的变化を連続

的にみることができる。また、斜面に沿って飛来塩分が上昇する様子が示されている。段丘面の肩部付近の Aa-6, Aa-7 の値, 11 月 12 日~17 日の測定データを肩部 Aa-5 の相対飛来塩分に比例させて求めた。これによると斜面肩部背後には、肩部付近から漸高する形を呈した顕著な低分布域がみられ、山脚部の相対飛来塩分に近いことがわかる。

次に、汀線から遠くに斜面がある例について述べる。

石狩における 4 回の飛来塩分の測定値を平均し、汀線の高度 2 m に対する相対値の分布を図-26 に示す。汀線から 150m 付近までの詳細な飛来塩分の分布が示されており、高度約 5 m 以下の変化が速やかであることがわかる。また前章で述べたように、地表面付近は相対飛来塩分が極小値を示すと推測される。このことは汀線に近い植生がわい性化によって生存できることと関係があると考えられる。

厚田の b ラインにおける相対飛来塩分を図-27 に示す。段丘比高の 2 倍である 80m 背後に比高 37m の斜面をもつ Ab-4 の相対飛来塩分は、汀線から同じ 400m 離れた位置にある Ac-1 と同等であり、Ab-4 も斜面の影響を受けていないことがわかる。しかし、斜面に近い Ab-5, Ab-6 の値は汀線から 500m 地点の Ac-2 より小さく、斜面の影響を受けていることがわかる。斜面脚部 Ab-6 から、肩部 Ab-9 にかけての斜面上では、相対飛来塩分は高度 3 m 以下では斜面上部ほど増加してゆき Ab-9 で最大値を示し、500m 地点以後に位置するにもかかわらず、広い平坦地の 300m 地点の Ab-3 の値よりもやや大きい。

図-27 において、段丘肩部に近い Ab-8, Ab-9 における相対飛来塩分の高度分布形は、図-24 に示す Aa-4, Aa-5 とは異なり、高度による差が少なく、塩分粒子の拡散はもはや活発でないことがわかる。また、相対飛来塩分の等量線図(図-25)と風速分布図(図-22)を対比すると、Aa の風速は肩部以後で最大となるのに対し、相対飛来塩分は肩部以後減少している。一方、Ab では相対飛来塩分の分布は Aa の風速分布と同様であり、これらのことから拡散が進んだ状態では飛来塩分の分布は風速に支配されていることが理解できる。

c ラインでは、相対飛来塩分の高度分布形は Ab-3 以降のそれに類似し、測定範囲において上方への単調

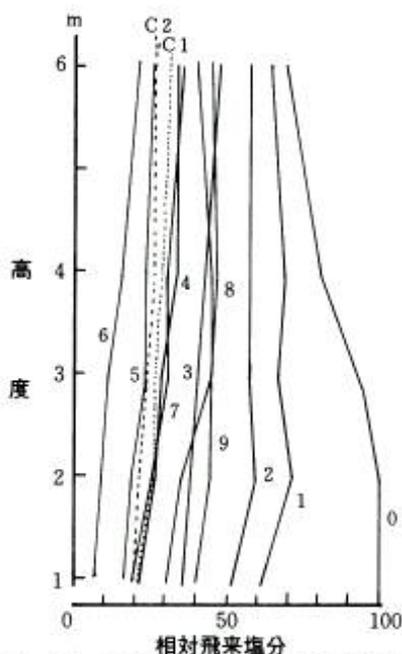


図-27 Ab ラインにおける平均相対飛来塩分の高度分布
100 は汀線における高度 2 m の飛来塩分量

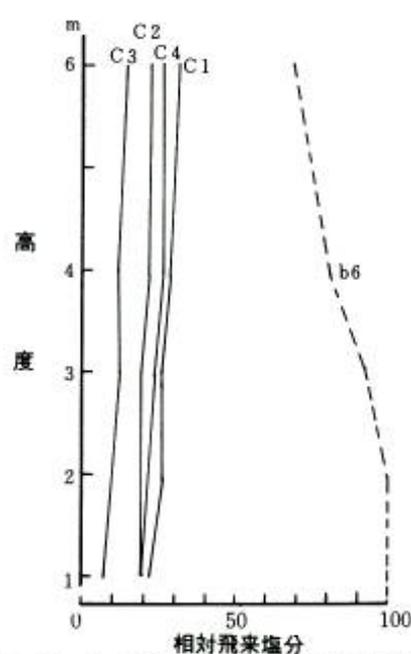


図-28 Ac ラインにおける平均相対飛来塩分の高度分布
100 は汀線における高度 2 m の飛来塩分量

な増加を示しており、また、肩部では相対飛来塩分の高度差が少ない（図-28）。その肩部 Ac-3 の相対飛来塩分は、500m地点の Ac-2 の値にほぼ等しく、肩部における相対飛来塩分の増大が b ラインと同様に観察された。

図-25 の各図から、各ラインの相対飛来塩分の分布の類似性と、地形による気流の収束を推測できる。

風の流れおよび風速分布に与える段丘地形の影響については、次のようにまとめられる。

段丘付近の風の流れおよび風速分布の特徴は、図-21, 22 に示したように、脚部、段丘肩部に近い平坦面で風速が小であり、段丘肩部で大である。それぞれ、風の淀み域、剥離域、加速域に当たっており（流れの可視化ハンドブック編委 1982）、海岸段丘や砂丘斜面の防災林の造成・維持に際して十分考慮する必要がある。

また、飛来塩分の分布に与える段丘地形の影響について概括すると、次のようである。平坦地、斜面ともに地表付近に極小値がある。また地上数mの高度に相対飛来塩分の最大値があり、距離とともに相対飛来塩分は減少しながら、最大値を示す高度は上昇する。しかし、段丘の肩部では気流が収束するため相対飛来塩分が大きく、山脚部では気流が淀むため、また段丘肩部の背後では気流が剥離するため、相対飛来塩分は小さい。汀線からの距離に応じて、飛来塩分粒子の拡散と落下によって大きく変化するので、相対飛来塩分の分布は風速の分布値とは単純に対応しない。汀線から数 100 m 離れると、塩分粒子に拡散が進行して濃度勾配が小さくなり、相対飛来塩分が風速分布に支配されたと理解できる。a ライン肩部の相対飛来塩分が最大にならなかった理由は、拡散が進行していない段階にあり、距離による塩分濃度の勾配が大きいことによると考えられる。

段丘斜面において最も相対飛来塩分が大きい肩部の値に相当する平坦地の位置を高度 2 m の飛来塩分でみると、a ラインでは 100m、b ラインでは 250m、c ラインでは 600m 付近であり、段丘斜面が汀線から近い a ラインを除き、概数としては肩部が位置する距離の 1/2 の地点の平坦地の飛来塩分量に相当している。

次に段丘斜面がない場合と、ある場合の各地点における風速および相対飛来塩分を較べると、斜面によって塩風が弱まり海岸近くでも林木が生育できる環境があることがわかる。斜面のこの意義は古くから知られており、傾斜 25 度以上の斜面では塩風害が起きにくいという（Ginzberger 1926）。

第V章 海風環境下の林冠形

1 風衝形の形成

(1) カシワ枝の伸長と枯下がり

第III章では、越冬期の飛来塩分分布が、芽吹きや枝条の生存と深く関わることを示された。塩風による枝条の枯死は必然的に偏樹形や風衝林形を形成するものと考えられる。そこで、汀線からの距離および地形に応じた枝の成長・樹形の実態を明らかにして、飛来塩分環境の区分に対応する偏樹形の関係を示し、また風衝林形の形成をモデル化するために必要な林冠形成枝の成長実態を示す。

調査地および方法は次のとおりである。

ア) 石狩郡石狩町3線の、海岸から 300m 離れた比高 7 m の海岸砂丘から成立し始める天然生カシワ林の最前線において、同一樹の海岸側および内陸側の樹冠から各 5~10 本の 1987 年伸長枝と生残枝を測定した。対象樹木は各 20 本で、枝数の合計は、海岸側 170 本、内陸側 188 本である。



図-29 天塩町サラシキのカシワ林形と調査プロット T_E-1-5

イ) 天塩郡天塩町サラキシの海岸から 115m 離れて成立する天然生カシワ林 (図-29) において、前方林縁部から、5, 30, 60, 110, 135m 離れた各地点にプロット 1~5 をとり、各々 15 本の樹木から林冠を形成する枝 (各区 90~100 本) を対象に合計 488 本の 1987, 1986 年伸長および生残長を測定した。

ウ) 石狩郡石狩町親舟の、海岸から 300m 離れた砂丘上から成立する天然生カシワ林の最前線部と、そこから 30m 離れた内陸部に傾斜した砂丘斜面上において、林冠を形成する枝のうち各 90 本について 1987 年伸長を比較した。

まず、海岸付近のカシワ孤立木の樹冠を形成する枝の成長について調べた。図-30 は石狩町 3 線で行った同一樹冠を形成する枝について、伸長と生残長を海岸側と内陸側で比較したものである。1987 年度に成長した枝の海岸側と内陸側の枝長の平均は、各々 19.5, 15.8cm であり、その差は 1% 水準の危険率で有意であり、海岸側が長かった。これらの枝は多くの場合、越冬期に枯れ下がる。1987 年枝の生残長の分布は図-30 中の点線で示される。海岸側の枝は生残長が短いものが多く、内陸側枝とは異なった頻度分布形を示し、平均生残長は各々 8.0cm, 15.0cm と倍近い差を示している。

これから、海岸側の枝は内陸側の枝と比べ伸長量は大きいですが、枯下がり長が大きき、その結果生残長が小さいことがわかる。そして前述したような、枝の非対照な成長は、結果的に偏樹形を形成する。なお、枯下がり長が大きい海岸側の枝で、伸長が長くなる現象は興味ある点であるが、その理由は明確ではない。

次に、林分状態における枝の伸長を天塩町サラキシで検討した。林冠を形成する枝の全伸長を、最前部からプロット別に図-31a に示す。値は 1986 と 1987 の平均である。図から海岸に近い位置ほど長い枝が多く、また、短い枝が少ない傾向がある。このことは、前線側の枝の伸長が枝の成長期に海風等によるマイナスの影響を相対的には受けていないことを示す。

一方、図-31b に示す枝の平均生残長は、前線に近くてもくぼんだ林冠形のプロット 2 では相対的に長い

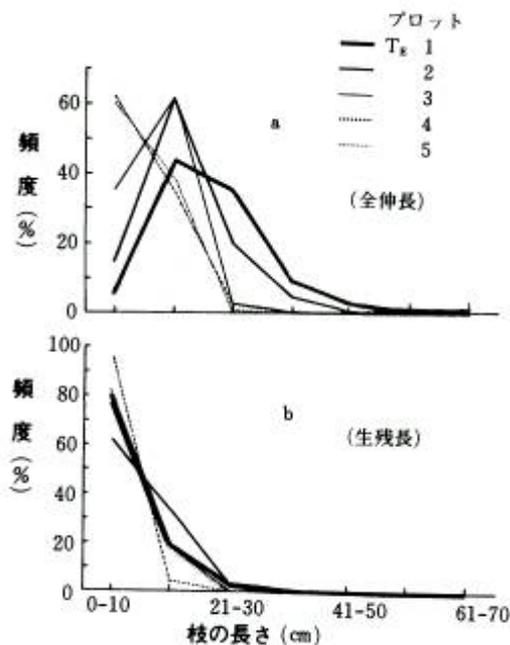


図-31 カシワ枝の伸長と生残長 (1986 年と 1987 年の平均 天塩町)

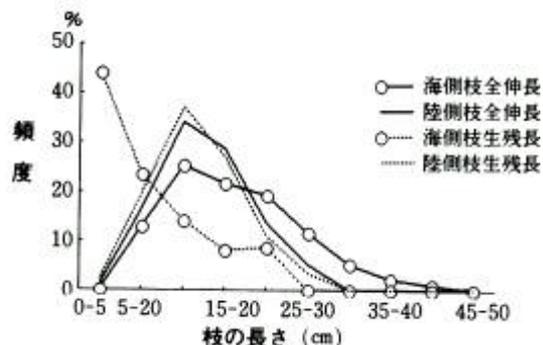


図-30 林帯の前後におけるカシワ枝長の比較 (石狩町 3 線)

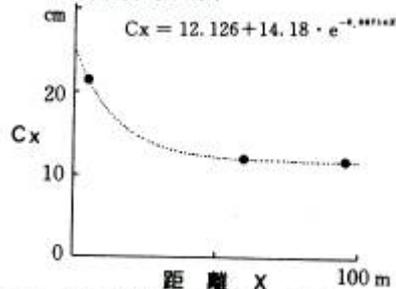


図-32 林冠を形成する枝の 2 年間の平均全伸長の距離による変化 (天塩町)

枝が多く、逆に前線からやや離れていても凸型の林冠形を呈するプロット4の枝は短く、成長が停滞することがわかる。

枝が長くなる現象が、前方林縁からの距離とどのような関係にあるかを次のように推定した。TE-1および林冠が平坦なTE-3, 5における1986, 1987年の平均枝長量Cx(86・87)を距離(X)と対応させ、図-32に示す。前縁近くで急激に減少して、40m以後はほぼ一定である。指数関数を当てはめると次の関係がえられた。

$$C_x(86 \cdot 87) = 12.126 + 14.18 \times e^{-0.06714x}$$

枝の伸長が促進される現象は、林冠の前方から40~50mまでにみられるものと考えられる。

このように、風衝形を呈するカシワの孤立木および林冠の枝の伸長量は風衝の程度が強いところでは大きく、弱いところでは小さいという一致した傾向を得た。この傾向は坂本(1984)がイタヤカエデの枝でみた結果と一致した。

門田(1962)はクロマツ海岸林の研究から、砂質土壤中にわずかに含まれる塩分が、クロマツ植栽木にマイナスの影響があることを示した。

しかし、カシワ枝で示したように、

ア) 同一樹の海岸側の枝長と内陸側枝長が異なり、海岸側枝がむしろ長いが、枯下がりが大きく、生残長が短い。

イ) 同一林冠では海岸側の枝長が長いのに反し、海岸側カシワの樹高が低く、かつ、単年の枝の枯下がりが大きい。

ウ) 前章で示したが、秋期まで生存した枝が越冬期に芽の基部から褐変枯死する。

などから、偏樹形および風衝林形が成長期の枝の伸長量が短いため形成されるのではなく、越冬期の枯下がりの結果つくられると判断できる。またこのような樹体の部分間の成長差の原因を、前線の土壤中塩分に求めることはほとんど不可能である。

図-32に示したように、枝の伸長は枝の枯死率の高い前縁側で大で後方では一定となるが、その減少は距離と指数関数の関係にあり、距離とともに急激に減少する。この枝が長くなる現象は林冠前縁部の限られた範囲に起きるとみられる。

次に海風の出現頻度を季節別に検討する。図-33に、石狩町において海から吹く風の日平均風速が5mおよび6mを超える日の日数分布を示す。5mを超える風が吹く日の場合は、9月~翌年4月の月平均値が5~8月の8.6倍を示し、6mを超える日数では18.7倍である。坂本(1986)も同様な風の季節変化を、カシワ葉に付着する塩分分析から得ている。こことは、枝の伸長期には飛来塩分が少ないことを示している。夏期における雨を伴わない強い海風は、海岸林に大きな被害をもたらすが稀であることから、越冬期の飛来塩分が海岸林の生育を制限する主要な因子であるとみなせる。

孤立木では、海岸に近い樹の樹冠角度の減少、樹高の減少および樹冠の偏心性が観察された。また林分状態では、林冠枝の枯れ方の強度は、林帯の前線や砂丘肩部で枯下がりが大きく、くぼんだ林冠や内陸側に面した林冠では小であり、塩風の当たり方と関係が深いと判断される。これによって林冠形は時間の経過に伴って全体に凹凸が少ない形に変化していくものと考えられる。これらは、枯れ下がりによる受動的結果であ

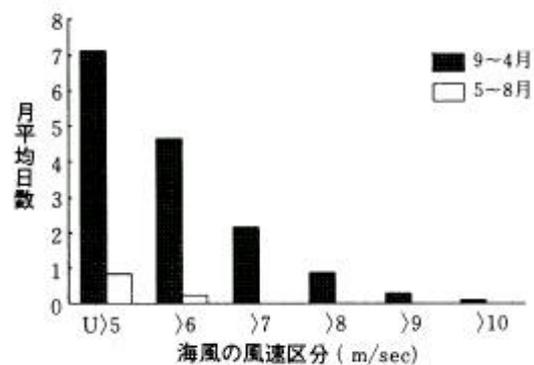


図-33 海風が吹く日数の季節差
「北海道の気候」から作図 (石狩町)
1983-1985

るが (Boyce 1957), その対応によって樹体あるいは林分にとって最も枯死量が少ない形態になると考えられるので, 適応の一種と理解される。

(2) 飛来塩分環境とカシワの偏樹形との関係

これまでに, 地形的および汀線からの距離による飛来塩分の分布が示され, また, 枝の枯下がりや偏樹形との関係が深いことが推測された。ここでは第IV章で示された海岸付近の飛来塩分の分布に応じた林木の偏樹形を調べることによって, 飛来塩分による累年的影響を明らかにする。

調査地のうち厚田村シラツカリ, 小樽市樽川9線の植生を次に示す。

Ab ライン: 前章で述べた厚田 b ラインの Ab-6 ~ Ab-9 付近で調査を行った。段丘斜面および段丘上平坦面は, 主にクマイザサが占めているが, 斜面の下部は樹高3~6mのヤマグワ, タラノキが点在し, 上部は樹高2m以下のカシワが点在する。なお, 林相は図-6および表-2に示した。

Ac ライン: 前章で記した Ac-3~Ac-4 付近で調査した。段丘斜面上部は樹高6~8mの天然生カシワが占め, 中下部は樹高8~13mのイタヤカエデ, シナノキ, ハルニレが占めている。

小樽市樽川9線: 海岸から150m離れた凹凸に富む砂丘のくぼみ (T1) から孤立状にカシワがみられ, 無立木帯をはさんで200m地点 (T2) から600m地点 (T3) に成立するカシワを主とする天然生林で調査を行った。

上記天然生林の林齢は, 厚田では50年以上, 樽川では約80年 (坂本ほか1985) である。

なお, 厚田村ヤソスケ, 石狩町親舟, 石狩町3線の植生は前述した。

偏樹形の測定方法は次によった。上記各地点のカシワの孤立木を対象に, 海岸から内陸に向けて樹心を通して張った水糸から, 生存枝までの高度を測定して樹冠形を求めた。

なお, 樹高および偏心性は図-34の定義により求めた。

孤立木の樹冠形と飛来塩分の関係を次のように推測した。

小樽市樽川9線において, 汀線からの距離が異なる3地点で行った平坦地におけるカシワ孤立木各5本の樹冠形を図-35に示す。汀線は左側にあり, 中心点Oは株の位置を示す。図から, 林帯の前線 (T1) で顕著にみられる偏った樹冠形は, 低い樹高, 汀線方向に向かって直線的な樹冠形でかつ緩傾斜な樹冠角度および海岸側の枝ばりの不足による偏りによって特徴づけられる。

図-36に厚田村シラツカリの傾斜45度の段丘斜面に生育するカシワ孤立木の樹冠形を, 平坦地の樹冠形に準じて示す。平坦地と同様に, 飛来塩分環境によって異なった樹冠形を示し, 肩部のAb9では他と比べて樹高が小さく, 偏心性が大きいと推察される。これらの形態のうち, 樹冠角度は傾斜面においては評価に問題がある。そこで樹冠形の偏りの指標としては, 樹高, および樹冠の偏心性が妥当であると仮定し, これら2因子と飛来塩分との関係を見た。主に飛来塩分が多い環境下において得られたデータから, 汀線の高度2mの飛来塩分に対する相対値で表した飛来塩分環境と, 樹高および偏心性の関係を表-16に示す。表に示すように, 樹高 (H) と偏心性 (A) の2因子から, 汀線における高さ2mの飛来塩分に対する相対飛来塩分 (rC?) を推定する関係式は次式で示され, 重相関係数は0.757であった。

$$r C? = -6.239H + 8.802A + 33.635 \dots \dots \dots (8)$$

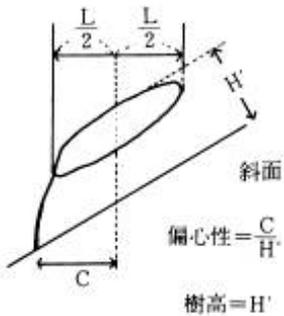
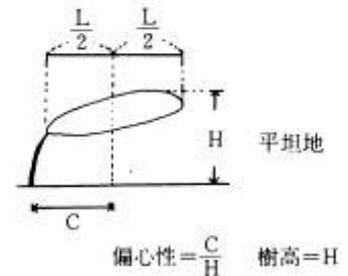


図-34 偏心性の定義

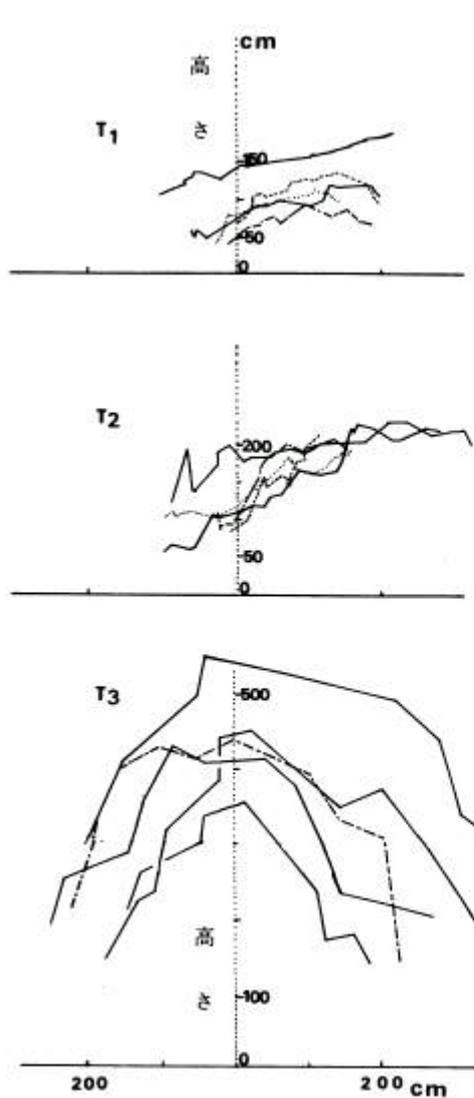


図-35 平坦地形における樹冠の形態
 左方が汀線側。0点は株の位置
 各線は各孤立木の中央線。(小樽市樽川9線)

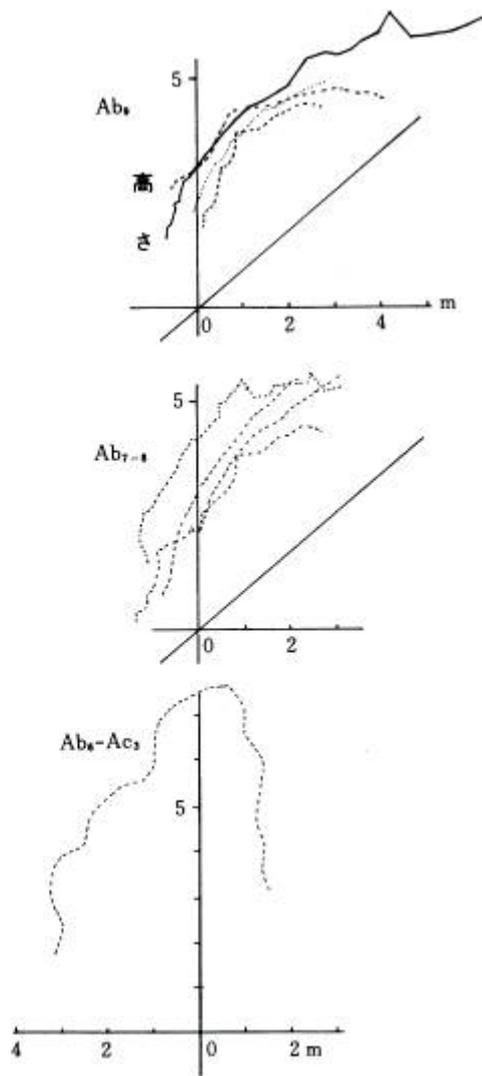


図-36 斜面における樹冠の形態
 左方が汀線側。0点は株の位置
 各線は各孤立木の中央線。(厚田村シラツカリ)

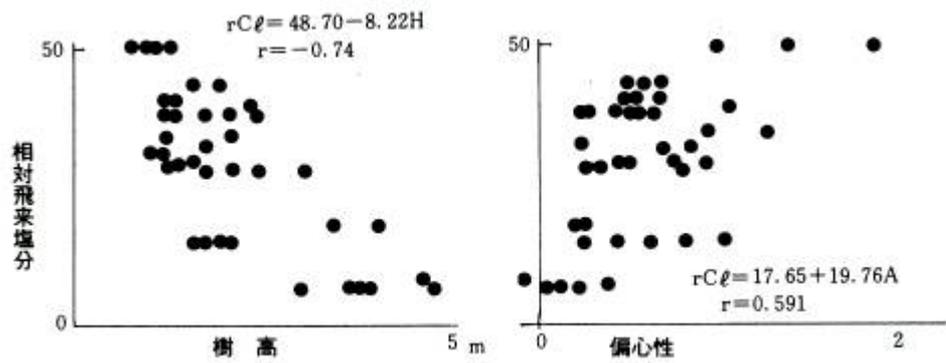


図-37 相対飛来塩分と樹高および偏心性の関係

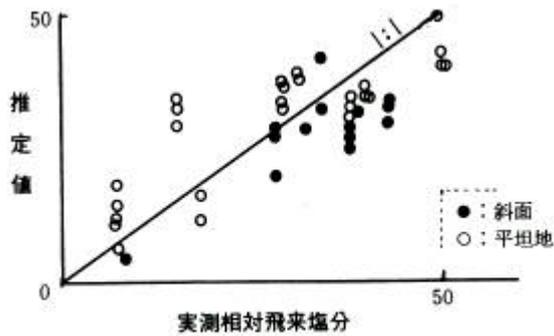


図-38 実測相対飛来塩分と推定値の関係

樹高は偏心性よりも $rC?$ と密接な関係がみられ、両者の関係は次式で示された。相関係数は -0.74 であった。

$$rC? = 48.70 - 8.22H \dots\dots\dots (9)$$

また偏心性 (A) との関係は次式で示され、相関係数 $=0.591$ であった。

$$rC? = 17.65 + 19.76A \dots\dots\dots (10)$$

図-37に示すように、2つの因子と $rC?$ との関係はバラツキがあるが直線とみなすことができ、また相関係数は1%水準で有意である。8式による推定 $rC?$ 値と実測値との関係を図-38に示す。両者の関係は平坦地および傾斜面についても同じ直線上に分布するとみなすことができ、上の定義による樹高および偏心性が、平坦地および斜面において共通して使える偏樹形因子であるといえよう。

樹木の生存限界あるいは偏樹形を起こす下限と飛来塩分の関係を上の結果および図-25 (IV章) と樹形から以下検討した。

Aa-5から50m側方の同じ段丘地形上において、肩部から背後の20m区間に、相対飛来塩分値の減少域と似た形で漸高するカシワおよびイタヤカエデのほぼ純林をなす天然林がある。両樹種とも、斜面の延長線を超えて成長できない。またAラインでは、他の地点に樹木はみられず斜面はススキによって占められており、この結果では、相対飛来塩分値60以上は樹木は生育できない環境であるとみられ、上の相対飛来塩分とHの関係式からも $H < 0$ となる。

bラインでは、Ab-7~Ab-9に天然生カシワが単木状にみられる。肩部Ab-9においては、樹高Hが1.8mと小さく、Aも0.5~0.7と大きく、また枝張りおよび葉量が乏しい個体が点在する。肩部Ab-9における相対飛来塩分値43は、カシワの生存が可能であるが限界に近いことが推測される。また、樽川9線T1においてカシワが点在する最前線において、相対飛来塩分値50を示す高度1.5mを超えてカシワが成長できないことから、相対飛来塩分値45付近が樹木の生存限界と推測できる。この相対飛来塩分 $=45$ は、上で求めた関係式からみると、 $H=0.45m$ であり、その地点におけるササ高とほぼ同じになり、限界相対飛来塩分値に対するHとしては妥当である。また偏心性Aについては $rC? = 45$ に対応するAは1.4で、これ以上のAは平均的には存在しないことになる。

表-16 偏樹形による塩風塩分環境の変化

| | 樹高 | 偏心性 | 相対塩分 |
|--------|-----|--------|------|
| 斜面 1 | 2.7 | 1.070 | 39 |
| 2 | 2.8 | 0.640 | 38 |
| 3 | 2.4 | 0.560 | 38 |
| 4 | 3.5 | 0.286 | 28 |
| 5 | 2.0 | 0.300 | 28 |
| 6 | 5.4 | -0.110 | 8 |
| 7 | 2.8 | 0.800 | 28 |
| 8 | 2.4 | 0.330 | 28 |
| 9 | 2.0 | 0.240 | 32 |
| 10 | 2.4 | 0.960 | 34 |
| 11 | 2.0 | 0.450 | 38 |
| 12 | 2.2 | 0.520 | 43 |
| 13 | 1.8 | 0.580 | 43 |
| 14 | 1.8 | 0.690 | 43 |
| 15 | 1.4 | 1.290 | 34 |
| 平坦地 16 | 0.9 | 1.900 | 50 |
| 17 | 1.1 | 1.000 | 50 |
| 18 | 1.2 | 1.000 | 50 |
| 19 | 1.4 | 1.400 | 50 |
| 20 | 2.0 | 0.630 | 15 |
| 21 | 2.3 | 1.040 | 15 |
| 22 | 2.2 | 0.450 | 15 |
| 23 | 1.9 | 0.260 | 15 |
| 24 | 2.2 | 0.820 | 15 |
| 25 | 4.3 | 0.050 | 7 |
| 26 | 4.5 | 0.380 | 7 |
| 27 | 5.5 | 0.220 | 7 |
| 28 | 3.5 | 0.110 | 7 |
| 29 | 4.4 | 0.020 | 7 |
| 30 | 1.3 | 0.850 | 31 |
| 31 | 1.2 | 0.710 | 31 |
| 32 | 1.8 | 0.500 | 29 |
| 33 | 1.6 | 0.470 | 29 |
| 34 | 1.5 | 0.770 | 29 |
| 35 | 1.6 | 0.940 | 29 |
| 36 | 4.0 | 0.230 | 18 |
| 37 | 4.7 | 0.210 | 18 |
| 38 | 1.4 | 0.500 | 40 |
| 39 | 1.5 | 0.530 | 40 |
| 40 | 1.4 | 0.680 | 40 |
| 41 | 1.5 | 0.530 | 38 |
| 42 | 1.4 | 0.290 | 38 |
| 43 | 1.5 | 0.270 | 38 |

| 単相関 | 樹高 H | 偏心性 A | 相対塩分 $rC?$ |
|------|--------|-------|------------|
| 樹高 | 1.00 | | |
| 偏心性 | -0.600 | 1.00 | |
| 相対塩分 | -0.743 | 0.591 | 1.00 |

$$rC? = -6.23H + 8.802A + 38.635 \quad \text{重相関係数} = 0.757$$

カシワ林帯が形成し始める相対飛来塩分値は、Ab-8 付近および石狩町親船の値から約 37 である。この相対飛来塩分値に相当する樹高は上式から、1.42m となり、妥当な値を示した。

Ab-9 の相対飛来塩分値 43 は、図-25 から広い平坦地においては汀線から 250m 付近の値である。肩部に点在するカシワが生存できる限界に近い形態を示すことは、北海道の天然生海岸林が、平坦地では汀線から 300m 付近で成立し始めるとの報告（伊藤 1985）とほぼ一致する。

c ライン脚部では、ハルニレ、イタヤカエデが樹高 13m を示しており、また樹形は正常である。このことから、相対飛来塩分値 8 は林の成立にとってほとんど無視できるとみなした。また肩部 Ac-4 および樽川 9 線 T2 ではカシワが森林を呈していることから、相対飛来塩分値 20 以下はカシワ林が正常に生育する値と考えられる。

第 II 章においてカシワとイタヤカエデのすみわけ実態を図-5~7 に示したが、各地点の飛来塩分との関係を次に検討する。表-17 に厚田の 3 ライン Ab, Ac, Ay および石狩 3 線において測定した高度 1.5m の飛来塩分を汀線（高度 2m）に対する相対値で示す。表および図-25 に示した飛来塩分の距離的・地形的分布図から、イタヤカエデが生育する箇所は飛来塩分が少なく、反対にカシワが優占する箇所は多いことがわかる。しかし II 章で述べたように、内陸部におけるすみわけの傾向と共通点があり、また III 章-3 節で述べたように、同一地点のカシワとイタヤカエデの芽基部の褐変率に大きな差がみられないことから、すみわけが飛来塩分によって決定されているとは考え難い。砂丘地では前線に近く飛砂により地床が裸出状態であること、斜面では凸地形に付随する土壤乾燥・林床の明るさなどがイタヤカエデよりもカシワに利することによっていると考えられる。

表-17 カシワおよびイタヤカエデの生育地の相対飛来塩分

| 樹種 | Ab ライン | Ac ライン | Ay ライン | 石狩 3 線 |
|----|--------------|--------------|-------------|-----------|
| | 段丘 | 段丘 | (ミズナラ) | |
| Qd | 中一肩 33-43 | 中一肩 8-19 | 海食崖 | 平坦地 31 |
| Am | | 中一脚部 8 以下 | 脚部-上部 22 | 平坦地 29 |

2 海岸風衝林形のシミュレーション

林冠形が強く偏って形成される海岸林において、林冠形の形成過程あるいは変化が経時的に予測できれば、造林分の達成樹高予想のみならず、塩風環境に応じた必要林帯幅の決定や、林分の一部の伐採が後方林分へ与える影響などを知ることができる。しかし、海岸林の伐採が稀であり、また風衝林形の形成が飛来塩分の強さ、微地形、林冠の形態などにより複雑な影響をうけるため、林形の経時変化の研究が遅れてきた。

前節までの検討の応用として、海岸部の林冠形の成長を、塩風が吹かない場合の樹高伸長量、平坦な林冠の頂部における塩風による枯れ下がり量、および林冠形の凹凸と林冠傾斜に応じた枯れ下がり量の和で表わすモデルを考え、その適用を試みた。ここではモデル中の各係数を適宜与えることによって、林冠形の経時変化の再現を試みた。

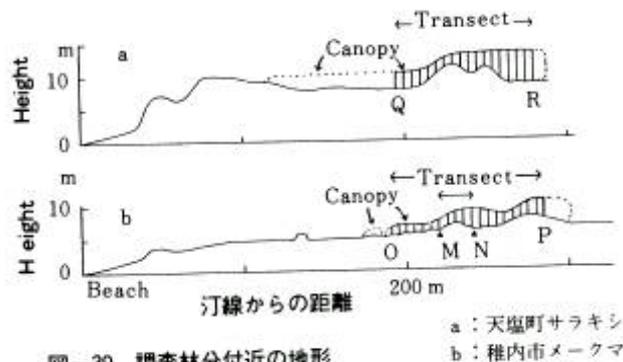


図-39 調査林分付近の地形

a: 天塩町サラキシ
b: 稚内市メークマ

調査地を北海道天塩郡天塩町サラキシと、稚内市声間メークマに設定し、1985年6月に調査を行った(図-4)。天塩の調査地では図-29に示したカシワ枝長の調査ベルトから北に30m離れている。両調査地とも砂丘上に位置し、前者はカシワ後者はミズナラの天然生林が成立している。

天塩では、簡易レベルにより海岸からの地形測量を行い、また各地点でのカシワ林冠の高さを測定した(図-39a)。天塩の調査林分は、海岸から115m離れた地点から成立している。調査ベルトの前端Qは汀線側林縁から85m離れており、その地点における樹高は3mである。ベルトの後端RはQ地点から85m離れた後方の林縁に当たり、その付近における樹高は6mである。調査ベルト中には泥炭など湿性な土壌は分布しない。また、比高3.7mと3.3mの砂丘を2列はさんでいるが、図に示すように現在の林冠形には、波形地表面の影響は見られず、滑らかな形を示している。なお、この林分は松井(1952)によって1951年に成長量の調査がされており、当時において35~40年生であること、また、山火事あるいは伐採による萌芽再生林であることが示された。著者が1984年秋に行った野鼠害による枯死木の年輪調査では、林齢68~70であり松井のデータと一致した。

稚内では、調査地を飛行場拡張に伴う伐採予定地にとり、簡易レベルによって砂丘地形を調査した(図-39b)。また各地点ミズナラ林冠の高さを測定し、枝条展開を10年間遡ってその高度を測定した。この林分は海から170m離れた地点から成立している。

そのさらに汀線側は滞水した泥炭地となっており林木が生存できないとみられる。調査ベルトは林の前端から20m離れて始まり(O)、ベルトの後端Pまでの距離は96mである。ベルトの前端における樹高は1.2m、後端では3.5mである。ベルトの前端から30~52mの区間において、ベルトに平行して短い別の調査区M-Nをとり、8木の樹幹解析を行って最近20年間の林冠形の変化を求め、その再現を試みた。

なお、この林分の林齢は1984年秋において38年である。株立ちが一点から放射状に4~18本生立しており、薪炭伐採跡の萌芽林と考えられる。現在の林冠を形成する枝条の中には、林齢20年の若い樹も混在している。

シミュレーションのモデル式は次のように構成した。

春に展開した新条は、夏に冬芽を形成して秋を迎える。この時点までは強い塩風が吹かず、海岸林は樹種、林齢および土壌条件に応じた上長成長量 $C(t)$ を終えている。秋以後翌春までに海岸近くでは多くの新条の先端側が飛来塩分によって(浅井ほか1986, 工藤ほか1972, 坂本ほか1985, 新村1988)枯れ下がる。すなわち、ある地点における1年間の実質上長成長量 $\partial H/\partial t$ (cm/年)は、 $C(t)$ とその新条が秋期から冬期に塩風をうけて枯れ下がる量の和で示される。実際の林冠の形状における塩風による枯れ下がり量は、平坦な林冠形に対する枯れ下がり量 $E(x)$ と、林冠の形状に応じた枯れ下がり量の和であると仮定する。さらに林冠の形状を、汀線からの距離(x)方向に沿った林冠の凹凸の程度 $\partial^2 H/\partial^2 X$ と、塩風に対する林冠の勾配 $\partial H/\partial X$ とに分ける。よって次のモデル式を得る。

$$\partial H/\partial t = C(t) + E(x) + D \times \partial^2 H/\partial X^2 - B \times \partial H/\partial X \dots \dots \dots (11)$$

ただし、H: 樹高(cm)

t: 時間(年)

X: 汀線からの距離(cm)

D, Bは正の係数で単位は各々 $c\ m^2/年$, $cm/年$ である。なお、今回の調査区間においては、土壌条件はXに関係しないとみなし、 $C(t)$ ($cm/年$)はXの影響を受けないと仮定した。また $C(t)$ の短期間の年変動を無視した。

$E(x)$ ($cm/年$, $E(x) < 0$)は枝の付着塩分量と密接な関係があり、海岸または汀線側林縁からの距

離によって指数間数的に減少すると推測されるが、詳細はわかっていない。E (x) は地表面からの高さによっても変わると予測される。E (x) は各年の秋冬期の季節風の強さに影響され、年変動をもつとみられるが、ここでは無視した。

なお、C (t), E (x) の個々について値を与えることができなかったため、C (t) + E (x) として一括した。

Dは汀線からの距離、塩風条件などで決まり、厳しい条件では値が大きい、その関係は未知である。熱伝導方程式における拡散係数に当たる。仮にDを林冠の平滑化係数と名付ける。

よって $D \times \partial^2 H / \partial X^2$ は、塩風環境と林冠の凹凸形状との相乗効果により、凸型の林冠 $\partial^2 H / \partial X^2 < 0$ では枯れ下がる量が減少して、林冠形が次第に平滑化されてゆく量を示す。

BはDと同様に、汀線からの距離、塩風条件などで決まり、厳しい条件では値が大きい、その関係は未知である。仮にBを林冠の後退係数と名付ける。

よって $B \times \partial H / \partial X$ は、塩風環境と林冠の勾配との相乗効果により、塩風が当たる側 $(\partial H / \partial X > 0)$ の林冠では平坦な林冠と比べて枯れ下がる量が増大し、逆に塩風の当たらない側 $(\partial H / \partial X < 0)$ では減少する結果、林冠形が次第に偏ってゆく量を示す。

なおE (x), D, Bは樹種により異なることが予見される。したがって、塩風に対する抵抗性を示す係数が、これら3者に共通して含まれていると考えられるが、ここでは省略した。

以下は、この式を差分法により計算したものである。計算の刻みは距離を100cm, 時間を1年とした。

まず林帯の部分的な区間における林冠形の経時変化の再現を示す。

前線部を除く林帯において、部分的区間ではC (t) + E (x) が一定とみなすことができる。

稚内市メークマ砂丘林 (図-39, M-N) における、ミズナラ林冠形の最近20年間の推移を樹幹解析により求め、5年ごとに打点し図-40に示す。太い実線で示した20年前の林冠形は、現在と比べて凹凸に富んでいることがわかる。Mから4m, 9m地点のように、風の当たる側の凸部分では伸長量が小さい。逆に、1m, 12m地点のように凹地部分では、くぼみの程度が大きい前期に伸長量が大きい、林冠が一様になり、くぼみの程度が小さくなると伸長量が低下している。これらは、モデル式について述べたことと一致する。

このように、林冠全体が滑らかになってゆく過程の再現にモデル式を適用する。

初期値として20年前の林冠頂部を与えた。調査木の間隔は不均一であるが、その間の林冠形は直線とみなした。また境界値として地点M, Nにおける各年の基準高度からの林冠高を与えた。推定区間は同一砂丘上で、また22mと短いので、C (t) + E (x) を一定値とおき、5.5cm/年とした。凸部の風上側の $\partial^2 H / \partial X^2 < 0$ の部分ではD=2500, B=5とおき、他ではD=1000, B=1としたときの5年ごとの林冠形の変化を、図-40中に曲線で示す。1m地点では、初期に過小評価となったが、これは萌芽直後の旺盛な生育によるものとみられる。また9m地点の最高部では、最近の成長に対し、過大に推定した。これは、この地

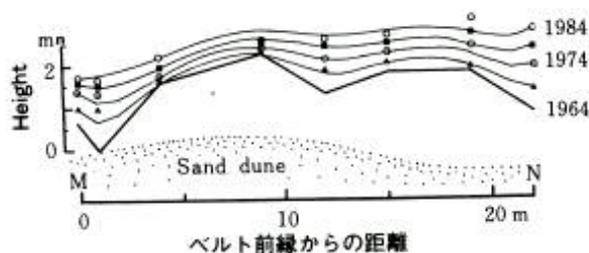


図-40 風衝林形の形成過程の再現 (稚内)

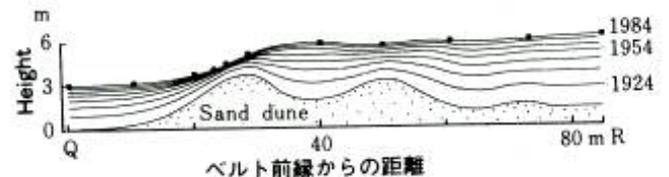


図-41 風衝林形の形成過程の再現 (天塩)

点の推定した。これは、この地点の樹冠が粗な状態であり、奥行きを無視する一次元による推定値よりも塩風の影響を受けやすいものと考えられる。また 19m地点では過小評価となっているが、全般に単純な仮定のわりあいに、途中経過がよく再現されたといえよう。

次に、長い距離間における林冠形の推移の再現について、初めに天塩砂丘林に当てはめた例で示す。

長い区間では $C(t) + E(x)$ が一定とはみなせない。ここでは、2つの凸部をもつ 85m区間の砂丘地面から、萌芽更新によって発生した 70 年生カシワ林の林冠形が形成する過程の再現を試みる。当林分では樹幹解析は実施せず、図-41 の黒点で示す現在の林冠形の再現のみを行った。

林冠が常に平坦な箇所では、

$$\partial^2 H / \partial X^2 = 0, \quad \partial H / \partial X = 0$$

であるから、

$$\partial H / \partial t = C(t) + E(x)$$

であり、 $\partial H / \partial t$ を各年度の実質伸長量から求めることができる。林冠と地表面がほぼ平坦な地点 Q, R において、過去における林冠も平坦であったとみなして、各年の両地点における $C(t) + E(x)$ を、樹高成長曲線から次により求めた。この林分で行った(松井 1952)の樹幹解析データを、修正指数曲線に当てはめて樹高成長の関係を求め(図-42)、70 年生時における現実の A, B 両地点の樹高となるように比例配分により調整した。この樹高曲線から Q, R 両地点の、各年度 t における連年上長成長量 $G(t) = H(t) - H(t-1)$ を求めて、各年における境界値として与えた。Q, R 間各地点の $C(t) + E(x)$ は、位置に応じて比例配分した。初期値は各地点の地形面高を与えた。なお凸地形においては塩風の吹かない内陸地域でも樹高成長が不良であり、ここでも 25~35m, および 45~55m の両区間においては各々 $C(t) + E(x)$ に 0.75, 0.70 を乗じた。

D については、凸形すなわち $\partial^2 H / \partial X^2 < 0$ の場合は平滑化が強いとして 3000 と大きい値を与え、その他は 500 とした。

B については同様に、28m までの風上側では枯れ下がる量が多いとして 15 を与え、その他は小さく 2 を与えた。

以上の条件における、林齢 70 年までの林冠形の形成過程を付表-2 に示すプログラムにより求め、10 年ごとに図-41 中の曲線で示す。簡単な条件にもかかわらず、途中経過について大きな不自然さはみられず、また現在の林冠形をよく再現している。

次に途中経過を含む、稚内砂丘林への当てはめ例を示す。

96m の測定区間 O-P の一部地点に湿性土壌をはさむ砂丘面から、萌芽更新によって発生した 38 年生ミズナラ林の林冠形を、図-43 中に白点で示すこの林冠形の再現を次により試みた。

図の右端 P の砂丘上における $C(t) + E(x)$ は次のように推定した。38 年生における林冠形の接線が、水平になる地点 (86m) と樹高 (3.45m) を、70-96 m 区間の林冠形に 2 次式を当てはめて求めた。この地

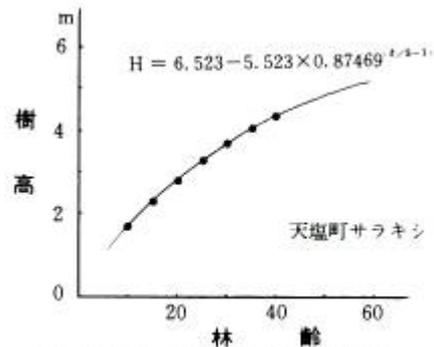


図-42 松井の資料によるカシワの樹高成長

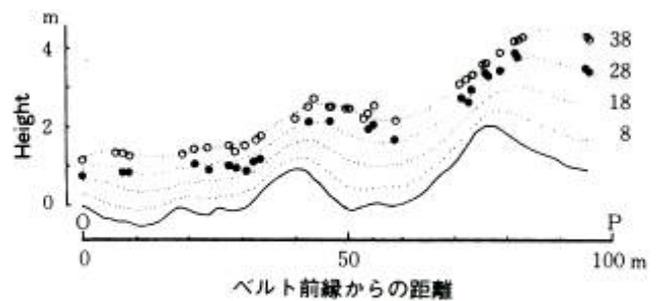


図-43 風衝林形の形成過程の再現(稚内)

○, 38 年生時; ●, 28 年生時の林冠高; ……、各時点の林冠高推定値

点の林冠形は水平になる以前は風下側に傾斜しており、付近の林冠形の $\partial^2 H / \partial X^2$ を無視すれば、塩風から保護されていたが、その後は風上側に傾斜するため保護を受けず、 $C(t) + E(x)$ より低い成長が推測される。すなわち、38年生時点でのその地点の樹高成長曲線は、 $\Sigma(C(t) + E(x))$ と交わる。ここでは $C(t) + E(x)$ の年変化を直線とみなし、年間9cmを得た。

0~30m区間の $C(t) + E(x)$ は林冠が平坦に近い0~25m区間の10年間の平均成長4.5cmを用いた。中間地点の $C(t) + E(x)$ は30m地点の値との比例配分によるが、50~62mの低地においては、5.8cmを与えた。

DとBは、それぞれ3000、10としたが、60m以後の風上斜面では4000、20とした。

以上による林冠形の推移の再現計算結果を図-43の点線で示す。28年生時の樹高(黒点)とは、やや異なる部分があるがほぼ一致した。

図-40に示したように、すでに上層の林冠を形成する部分は成長が遅いが、林冠がくぼんでいる箇所では速いために林冠が平滑化してゆく傾向がみられる。Boyce(1957)は、林冠形が偏ったred cedar (*Juniperous virginiana*) ほかに2種類のそれぞれの海岸林において、凹凸のある林冠では平滑の場合より飛来塩分を多く集積すること、突出する枝は飛来塩分を多く捕集して枯死すること、また、海岸林の最前線において林冠と水平面のなす角度は、塩風が強い環境では小なることを報告した。これらは、 $\partial^2 H / \partial X^2$ と $\partial H / \partial X$ とが林冠形の形成と関連が強いことを示し、林冠形変化の説明変数としてこれらを使用する意義を示している。

このようにして形成される凹凸の少ない林冠形への変化は、塩風からみれば、滑らかに流れる表面が作られてゆくことであり、一方、海岸林の側からみると群としての生存適応を意味するものと考えられる。

先に示した天塩の事例は、林分の発生時点の地形と現時点の林冠形が既知であるだけで、途中の経過が不明であり、モデル式の評価をすることが難しい。しかし、林冠形の平滑化を主とする推定結果は、経験的知識と矛盾しなかった。また、他の2つの事例は、モデル式の再現性を示したものと考えられた。いずれの例においても塩風が強く当たる凸部、風上側でD、Bを大きく、逆に凹部、風下側で小さい値を与えることで林冠形を再現できた。これらのことから、モデル式の妥当性がある程度示されたものと考えられる。

現実の林冠形は空間に形成されるが、このモデルでは単純化して、距離方向(X)の一次元で考えた。すなわちX方向の林冠形だけからシミュレートした。実際の林冠形は距離方向と直角なY方向の厚みが各位置で変わることが考えられ、厚みを一定と仮定した今回のモデルでは誤差を生ずることが考えられる。しかし、閉鎖した林分では大きな影響はここでは見いだされず、このモデルによって林冠形の経時的変化を一定の根拠をもって推測できることがわかった。

ここで用いた係数は、試行錯誤的に与えたものである。さらに条件を細分して係数を変えれば再現性を高めることは可能であるが、今はその根拠が不明確であるので簡単な与えかたにとどめた。したがって、これらの係数は必ずしも最適値ではないが、概数として許容されると考える。

なお、稚内砂丘林における二つの例でD、Bが異なり、短区間ベルトで小さいのは、林冠形を直線で結んだため $\partial^2 H / \partial X^2$ 、 $\partial H / \partial X$ が過大になることが理由の一つに考えられる。また、当てはめたD、Bの天塩と稚内における違いは、樹種および地形が異なるため比較できない。

D、B、 $E(x)$ 、kは既に述べたように、塩風環境および樹種で決まると考えられ、林冠形は飛来塩分環境の林木指標となることがわかる。異なった塩風環境下の林冠形の変化を調査することにより、これらの関

係が明らかになれば、普遍的に林冠形の形成や変化を知ることができる。

また、このモデル式は塩風環境以外の因子によって林冠形が偏る現象、例えば内陸、高山における風衝林形の形成過程についても応用が可能である。

第VI章 海岸林の保全および造成への展開

1 海風環境判定の指標

海岸林を造成する際、海風の程度を把握する必要が生ずるが、飛来塩分を測定せずに判定できることが望ましい。そのためにはII章とIV章で述べた植物指標と地形的な指標の活用がある。

植物指標のうちイタヤカエデ、カシワのすみわけは、カシワが乾燥的立地に耐え、明るい環境を好むが、イタヤカエデは適潤な立地を好み、他の樹種との競合に耐えることから、両樹種は越冬期の耐塩性に大きな差がないにもかかわらず、海風環境が厳しい箇所にかシワが生育し、逆に穏やかな箇所にイタヤカエデが優占することを利用する。すなわちイタヤカエデが優占する箇所は林帯造成が比較的容易であり、カシワが優占する箇所は困難が予想される。

冬芽の枯死率は、強い海風が吹く日数とともに指数関数的に減少する点を利用する。すなわち、枝が頂芽から展開する率は海風環境の指標となる。

偏樹形は海風によって冬芽の生存率が海岸側と内陸側とで異なる点を利用する。偏樹形は図-34に定義した成木の偏心性と樹高によって表現され、両者は孤立木では相対飛来塩分との間に直線的関係がある。林帯が可能となる相対飛来塩分を30としたときの各々の値は0.63ならびに2.3mとなり、限界地の目安を得ることができる。

このほかの指標としてハマナス、ハマニンニクがあり、これらが優占する箇所は飛砂が多く、不安定な地表条件であり林帯造成が不可能な場合が多い。

立地的指標としては、図-25の飛来塩分分布図を参考にすることができる。平坦地形では汀線から300m付近で林帯造成が可能となるが、起伏のある地形では汀線からわずかに70mの地点でも山脚部や段丘肩部の背後に造成可能である。また500m地点であっても段丘斜面上部～肩部では風速および飛来塩分が大であり造成は困難である。なお肩部でも900m地点では造成が可能である。

上記のうち、いくつかの指標を調べることにより、飛来塩分を主とする海風環境を知ることができ、海岸林の保全の必要性および造成の可能性を推測できる。

2 現存海岸林の保全

林帯の維持

更新の促進： 林帯の前縁部より後部では、飛砂は少なくなり地表が安定する反面、ササを主とする林床植生が繁茂して、主林木の更新を妨げている。このような所では、林床植生を刈払えば、種子・稚樹の野鼠などによる食害を防ぐことができ、更新が期待できる。

一方、林帯の前縁では表層の砂が堆積・移動しやすく、また海風の直接的影響があり、実生による更新は困難である。この場合は、カシワや道北地方では地元産のミズナラの植え込みが考えられる。

林帯の強化： 飛来塩分は地物に付着しやすいこと、および細い枝でも効率よく飛来塩分を補足することを利用して、現存林帯の前方に前衛（犠牲）林帯を設定する。夏期に繁茂さえすれば越冬期に枯死しても草本とは異なり倒伏しにくいので、飛来塩分の減衰を速めることができる。毎年萌芽すれば設定の目的は達成したことになる。吸着量は枝の本数密度にほぼ比例すると予測されるので、この目的のためにはヤナギの埋

枝が適切である。前衛林帯は新規的林帯造成においても有効である。また急速な林帯の回復策としては新規造成と同様に防風工による。樹勢が増強されると、垣が腐朽、倒壊しても群としての耐性が高まり、効果も長期間に及ぶ。

林帯の達成樹高・必要幅・所要年数の把握

平坦な天然生海岸林の最前線における林冠形の形成過程がわかれば、目標樹高の達成年数や林帯の必要幅も推測できる。そこで林帯先端部付近の林冠形の形成過程を検討する。

塩風によって前方林縁の位置が決められている天然生海岸林の先端では、枝の枯死量 $E(x)$ と伸長 $C(t)$ とが等しいと考えられる。林冠の枝の先端だけを考えれば、林冠上部の相対飛来塩分と枯死量とは比例すると考えられるが、飛来塩分は横から当たるため、林冠層では両者は比例しない。

平坦な林冠内の枝に対する飛来塩分の当たり方は、林縁から減衰し、その減る量は枝に吸着された量であると仮定する。枝の長さおよび空間密度が一定ならば、飛来塩分の減少量はその林冠層の飛来塩分量 $C^?(X)$ に比例すると考えられる。すなわち、

$$\partial C^?(x) / \partial X = -K C^?(x) \dots \dots \dots (12)$$

これから、

$$\partial C^?(x) / C^?(x) = -K \cdot \partial X \dots \dots \dots (13)$$

積分して

$$C^?(x) = a_1 \cdot e^{-Kx} \dots \dots \dots (14)$$

ただし $a > 0$, $K > 0$ である。

$C^?$ と枯死枝長 ($-E(x)$) が比例すると仮定すると、

$$E(x) = -a_2 \cdot e^{-Kx} \dots \dots \dots (15)$$

であり、林縁部 $X=0$ では上の仮定から、枝の枯死長と伸長が等しく、 $-E(0) = C(t)$ であるから $a^2 = C(t)$ となり、結局、

$$C(t) + E(x) = C(t) (1 - e^{-Kx}) \dots \dots \dots (16)$$

となる。 K は海岸からの林縁位置、塩風環境、空間当たりの枝本数および樹種などで異なる。飛来塩分環境の厳しい所では、林冠高が距離の増加の割合には増加しないことが知られており、類似した林分条件間で比較する場合には、 K は飛来塩分環境の林木指標の一つとみなすことができる。現段階では K を客観的に与えることができないが、類似環境下の天然生林があれば当てはめによって推測できる。図-44a中の白点は、伊藤(1985)によるえりも町における天然生カシワ林の前線部林冠形を示している。16式を使ってこの林冠形の形成過程の再現を試みる。当林分は海岸から300m離れており、幅55m、林齢55年である。再現に必要な $C(t)$ は、距離による樹冠曲線の漸近高10.23mを工藤と同様に求め、また樹高成長曲線は松井のデータ(図-42)を55年生時点で漸近高に比例配分した。その式から樹高成長を各年計算して連年伸長量を求めた。

ここで、 $K = -0.033$, $D = 0$, $B = 0$ とおき、モデル式により再現した林冠形形成の過程を図-44a中の曲線で示す。

また工藤(1972)の修正前データから、同様に漸近高9.28mを求め、 $k = -0.04$, $D = 0$, $B = 0$ とおき、53年時生時点の林冠形の計算結果を図-44b中の曲線で示す。両者とも D , B を無視することで非常によい一致を示した。

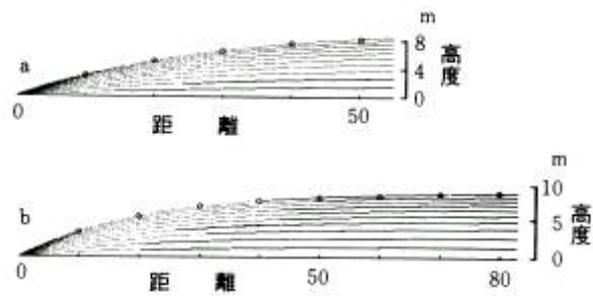


図-44 風衝林形の形成過程の再現(えりも)

a: 伊藤データ
b: 工藤データ

この二つの例からみると、11式における林冠形の影響が無視できることを示しており、モデル式が成立しないように思われる。しかしこの原因は次のように考えられる。すなわち、

1. 林帯前縁付近では、枯死枝による塩分の吸着により林冠の内部や後方が保護され、枯死量が外部の塩分量と対応しなくなる。
2. 前縁部では前節に示したように、枝の長さが長く1.の効果がさらに増大する。
3. 新村(1988)によるように、枝の基部側の芽は葉痕が小さいために塩分の害を受けにくい構造である。

(2)式の前提条件とした仮定は、これら1~3を含んでいない。1~3はいずれも前縁部における樹高を仮定より高くする。一方、林冠形に依存するD、Bを含む項は、林形の距離的变化が大きい前縁で大きく寄与するから1~3と相殺するとみられる。以上のことから、外見的にはモデル式と矛盾するが、(11)式から $\partial^2 H / \partial X^2$ 、 $\partial H / \partial X$ を除去した次式を、平坦地形に形成される林冠形の経時モデルとして提示したい。

$$\partial H / \partial t = C(t) (1 - e^{-kx}) \dots\dots\dots (17)$$

図-44aの例において林帯幅が30mに限られていれば、最高の樹高が6mになるのは45年であり、また30年で最高の樹高を6mにするには、50mの林帯幅が必要であることがわかる。

上で示した天然生林の前縁位置における例は、漸近樹高が推測できれば、平坦地における林冠形の経時変化が推定でき、また一定幅の林帯が目標樹高に到達する年数、あるいは目標樹高を一定年数で達成するのに必要な林帯幅、横断樹冠形などが推測できる。

天然生林の前縁位置より前方に造成する場合は、保護工作物がなければ天然生林の位置まで後退して、上と同じ林冠形がつくられるであろう。また、さらに後方に造成された場合は、 $C(t) + E(x)$ については枯下がり量が減少する分の増加があると予想される。

林縁伐採の影響の推定

現実林帯の林縁伐採による残存林冠の後退の程度を明らかにすることは、林帯の保全を図る上で重要である。第V章に示した林冠形変化のシミュレーション(11式)において、一応の再現性をえた係数を用いて検討を試みる。いま海岸側林縁が伐採され、樹高3mの林分が残されたと想定し、林冠形の経時変化を求める。先の3つの当てはめ例では、D、Bを高度に関係なく一定とした。それは林冠の広がり十分あれば、成長とともに地表面と類似の面-粗度-が距離方向に連続して林冠付近に形成され、高度による飛来塩分の変化が無視できると仮定したことによる。現実には、 $C(t) + E(x)$ は最近の樹高成長の経過から求める。また係数D、Bは付近の林冠形から、前記の当てはめにより近似する。しかし、この例は短い区間で林冠形が不連続的に変化する場合であり次のように行った。

地表付近ではD、Bはともに地表面からの高さに比例すると仮定し、高度3mにおいて $D=3000$ 、 $B=15$ とする。また単純化のために、 $C(t) + E(x) = 0$ とする。この仮定により林冠形の30年間の後退を推定し、5年ごとに示したものが図-45である。初めに急速な変化が起こることがわかる。実際は、枯損木が後ろの林冠を保護するので、後退の速度はやや遅くなるであろう。林冠形の後退の程度は樹種および各樹冠の密度で異なると予想されるが、傾向としては図のような時間的变化をたどるものと考えられる。この推定の結果、急速な衰退が予測されれば上記の林帯を強化する必要がある。

なお、この例は、防風垣の倒壊により林帯

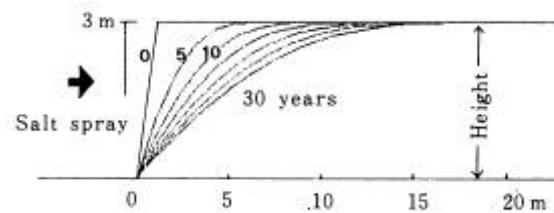


図-45 汀線側林冠の除去による残存林冠形の変化の推定

が塩風にさらされる場合の林冠形の変化過程と同等と考えられる。

3 海岸林造成

飛来塩分のほかにも、海岸林の生育を阻害する因子がいくつかみられる。草本との競合、野鼠害および過湿な泥炭や乾燥した砂丘土壌などがそれらの主なものであるが、下刈や野鼠駆除を適期におこなうことや、排水・客土の実施など既往の方法で対応できる。しかし現実には前2者が成林を妨げている例が多く、植栽後の長期にわたる手入れは不可欠であり、海岸林造成では一般造林に増して保育を重視した造成基準を採るべきである。いずれにせよ今までの経験から、強い海風環境下において海岸林造成を成功させるには単一項目の改善では不十分であると考えられる。樹種、産地・系統、植栽方法、防風工、枝条保護など幅広い技術の改善が必要である。

樹種

海岸林に用いられる樹種はモンタナマツおよびグイマツを例外として、郷土樹種を十分な保育管理により育成する方向がとりいれられている。ここで述べたカシワ、ミズナラ、イタヤカエデは海風に耐え、普通土壌や客土された砂丘土壌における適樹であるが、グイマツ（伊藤 1985）、アカエゾマツ（坂本ほか 1984）は普通土壌あるいはやや湿性な土壌に適す。なおトドマツは幼齢期に寒風害を受けやすく、風の強い地域や段丘肩部への植栽には不適である。

海岸林の植栽成績、天然生林の更新実態および出現樹種と位置などから、留萌・宗谷地方の海岸林造成の主要樹種としてカシワ・ミズナラ・イタヤカエデをあげ、ここで調査した結果を加え表-18に示す。カシワ・ミズナラは初期成長が遅いが乾性土壌に耐えることから砂丘地帯の植栽に採用できる。またイタヤカエデは耐陰性があり、他の植生とくにイタドリによる被圧が予想される土壤水分が潤沢な箇所ではカシワ・ミズナラは用いず、イタヤカエデを植栽するとよい。

表-18 カシワとイタヤカエデの比較

| | カシワ | イタヤカエデ |
|-----------|--------------|--------|
| 越冬期の耐塩性 | 頂部, 側芽 側芽 | > < |
| 耐陰性 | | < |
| 耐乾性 | | > |
| 開花枝の展開起源芽 | 頂部, 側芽 | 頂芽 |

飛来塩分、土壤条件、野鼠被害などにより前線においてはカシワあるいはイタヤカエデの植栽木からの天然更新はほとんど期待できないので、継続的な植込みが必要となろう。

道北地方の海岸林植栽樹種のうち今後確認を要する点として、次が考えられる。

イタヤカエデの道北部における適性。イタヤカエデの純林は道北部では認められず、その原因として気候条件も考えられる。

ミズナラの道北部産と他地域産との間の、あるいはカシワとの耐塩性の差異。

天然分布がない天塩川以北におけるカシワの適性。

脱葉しにくいカシワ、ミズナラ系統を植栽した場合、葉痕部からの塩分の防止効果による枝条枯死の軽減。
植栽列の方向

第V章の検討から、単木および林帯の風上側の塩風環境の厳しいところの枝は、越冬期間中に枯死する率が高いが、その他の枝よりも伸長がやや長いことがわかった。Boyce (1957) は枝のような細い物体は飛来塩分の捕捉率が非常に高いことを見いだした。風上側の植栽苗木の飛来塩分による枯死すなわち塩分の捕捉が、後方の苗木の保護につながるように植栽することが望まれる。また、やや大きいスケールであるが、汀線と平行な複数の林帯がある場合に後方林帯の塩分吸着量が非常に多いことが知られている。また坂本ほか

(1984)は海岸と平行の林帯後部では直交する林帯と比較して飛来塩分が少ないことを報告した。このことは汀線に平行な林帯はより多くの飛来塩分が付着して、枝の枯死を助長すると考えられる。このことから、造成の段階では植栽列は汀線と直角方向にとるのがよく、また植栽間隔(苗間)は狭くするのが有利であろう。また数列を寄せ植えにして、早期から群を形成させ単木当たりの露出面積を小さくすると有利であろう。

防風工

厚田海岸において、平均的な汀線から40m離れた高度2mの飛来塩分を100とする相対値で表わすと、カシワが単木的に成立できる上限は45付近、林帯を形成する上限は37付近にあるとみられた。これらのことから、海岸付近における林帯造成の立地環境としては相対飛来塩分値で37以下では可能性は大であり、37~45では作工物の保護下で可能性があり、45以上では作工物を越えて生育することは不可能に近い。このことから海岸林造成が成功する一つの条件としては、防風工によって汀線にたいする相対飛来塩分値で37以下の空間をつくる必要がある。しかしこの37の値は風衝林形を呈する林帯の限界値であり、林帯造成の場合は植栽後数年までの樹木の耐塩性を考慮して、さらに小さな限界値を設定しなければならない。現段階では相対飛来塩分で30を環境整備の上限にしたい。したがって、防風工によっても30以上となる地点における林帯造成は不可能であるとみなし、造成地点を後退させる必要がある。

なお他地域における相対飛来塩分の距離的分布は、厚田とは異なることが予想される。すなわち、さらに強風が吹く地域では距離が増加しても飛来塩分の絶対量は多いとみられるからである。そこで、風速強度による地帯区別に相対飛来塩分の分布と、それに対応する樹木の生育状態を明らかにする必要がある。

実際の地形は変化に富み、汀線からの距離で一律に飛来塩分環境を決定できない。汀線付近が段丘状を呈する場合、以後の飛来塩分は平坦地形よりも少ないと考えられる。事実、凹凸の大きい箇所では、汀線に近い所からの樹木の生存が観察される。上記の海風環境指標などを調べるのが望ましい。

段丘斜面中上部および肩部では、海風の風速が同じ距離の平坦地の約2倍を示すことから、作工物は4倍の耐風強度が必要となる。また段丘斜面において林帯造成を行う場合の海風対策としては、段丘斜面の中～肩部においては防風樹の高さ、設定間隔について特に強化する必要がある。一方、斜面脚部および段丘上部の平坦地では、風の淀み域であり、同じ地点の平坦地よりも対策を緩和してもよい。

一方、平坦地では、石狩の場合林帯造成が行われることが多い汀線から100~200mにおける飛来塩分の高度分布から見ると、カシワの単木の生存が可能な値を越えており、防風垣等の設定が必須である。また現在の垣の高さは飛来塩分分布から見ると、最大値が現れる高度2~4mよりも低い位置に設定されていることになる。防風垣を設置しなければ林木の成長がほとんど不可能な造成地において、防風垣により保護を受けて垣高に達した林木が、苗木高の付近よりさらに飛来塩分濃度の高い上方へ成長するのは非常に困難であることがわかる。

垣内の植栽木を飛来塩分からさらに有効に保護するには、防風工の改善が必要になる。しかし、防風垣の背後は風速減少によって堆雪しやすくなり、垣高を高くすれば堆雪深も増して樹木の雪害も増加する。石狩町親舟、稚内市抜海の観察では堆雪深は、2mの垣高と同等かそれ以上となり、植栽木に強い雪害が生じている。飛来塩分と地吹雪量が多い箇所における林帯造成は極めて困難であるが、高さ1m程度の低い垣を短い間隔で設定する方法もある。堆雪が飛来塩分を遮断し、かつ雪害も少なくできる。樹木が垣高に到達して植栽木に抵抗力ができた段階で、さらに垣の高さをますことができよう。

海岸林の距離・高度スケールにおいて拡散方程式から得られた法則性のうち、飛来塩分粒子の拡散と地表面吸着の2点が、防風工の改善に大きな示唆を与える。即ち、a) 飛来塩分を速やかに上方へ拡散させるか、

b) 飛来塩分粒子の吸着現象を積極的に起こして林帯の高度付近の塩分濃度を低下させる方法があることを示している。

a) の考え方の特徴は、風速を低減させる「ついたて」としての今までの防風垣から、風の流れを上空に移動させようとする点にあり、風速を直接減少させようとするものではない。この上方への拡散を促進する垣は、理論的に有望な方法であり今後の発展が期待できよう。これに近い形の垣は、工藤ほか(1977)によって考案された流線型防風柵がある。彼は風衝林形からヒントを得て、海風の減速、ならびに流線を上方に持ち上げて背後に広い防風域をつくることをねらった。しかし、防風板は風に直面させており、ついたて方式の発展型とみなすことができる。

b) では a) とは全く反対に飛来塩分の流れを強制的に地表面等に触れさせ、吸着による補足を促進させて塩風が林帯に至る以前に塩分を減らそうとするものである。垣の構造、設定位置、a) との併用、風食防止方法、既存の垂直垣との効果の比較などの検討を要する。

芽基部の被覆

越冬期のカシワ・イタヤカエデの枝条枯死の一因として、海風に由来する付着塩分が葉痕から侵入して壊死を起こし、結果的に枝条を枯死させる。芽基部へのロウ塗布により被害を軽減することがわかっているため、芽基部を効果的に被覆する資材が開発されると、海岸林の保全および幼齢期の植栽木保護に有効となろう。

結 言

過去 50 年の海岸林造成事業の結果、多くの海岸防災林が成林し、その機能を発揮している。しかし北海道の日本海側北部では、苛烈な気候のため、造成が困難である現場が多い。この事態を少しでも改善するため、厳しい環境に対する木本の生残あるいは適応の実態解析、および飛来塩分の分布環境の解析を行い、それらの相互関係を考察して海岸林の造成・保全の改善方法を検討した。

カシワ・イタヤカエデのすみわけの理由は、内陸と共通する点が多いが、海岸特有の飛来塩分を含む強風によってすみわけの立地条件の差がさらに強調されることにある。両樹種の枝条の耐塩性には、部位による差異が認められるがおおむね等しい。土壌水分条件や他種との競合を考慮して植栽樹種を選択すると良い。

カシワ・ミズナラ・イタヤカエデの冬芽の枯死は、付着塩分が葉痕部あるいは芽基部から侵入によることによることが確認された。この点の改善、例えば芽の基部を被覆するための効率のよい方法が開発されれば、樹木の耐塩性を高めることが可能になり、期間や場所を選んで適用することができる。

海岸林のスケールにおける距離・地形に応じた飛来塩分の高度分布が明らかになり、これにより事前に塩風環境が推測できる。また段丘地形付近の風速分布が明らかになり、防風工の強化すべき地点や緩和できる地点が示され、地形に応じた弾力的対応の資料となる。

飛来塩分の拡散性および地物に対する強い吸着性は、塩風の対策に重要なヒントを与えており、これらの性質を応用してその減衰を促進することが可能である。防風工の改善による造成成績向上に期待がもたれる。

越冬期の海風が形成するカシワの偏樹形および風衝林形などの形成過程を推定する方法の基礎が開発され、海岸林の樹高達成目標および必要林帯幅、必要年数、伐採の影響範囲・速度などの推定が可能となった。

摘 要

我が国は人口密度が高いうえに平野面積が少ないため、海岸地域まで農業型、都市型の土地利用が進んでいる。このため海岸林の造成・保全の必要性はますます高まっている。

北海道における海岸林造成には、施工地が汀線に接近している、冬期に寒冷な強風が吹く、比較的飛砂が少ない、積雪の影響を受けるなど多くの特殊性があり、技術的にも未解決の問題が多い。なかでも樹種の導入試験に多大な努力が払われたが決定的な樹種は見いだされず、現在は郷土樹種を保育してゆく方向がとられている。そこで北海道の天然生海岸林の主要樹種であるカシワ・ミズナラ・イタヤカエデを研究対象として、海風環境下の生育を調べ、造成・保全に応用できる方法を見いだすことを本論文の目的とした。すなわち、カシワ・イタヤカエデの分布実態とその理由、また越冬期の枝条の枯死の進行およびその原因を調べた。その結果、飛来塩分の関与が明らかになり、飛来塩分の分布の法則性を解析して生育の関係を検討した。次に海風の影響によって形成される風衝林冠形について検討し、その形成過程を推測するモデルを提示して、海岸林の保全および造成目標を具体化するための根拠を示した。

第Ⅰ章では、研究史、研究目的、調査地、海風の測定を論じた。

第Ⅱ章では、まず内陸において斜面方位・斜面位置によるイタヤカエデとミズナラの分布を調べ、ミズナラは乾燥地に、逆にイタヤカエデは比較的湿潤な所に分布することを確認した。次に海岸地帯において、イタヤカエデとカシワの分布を調べ、両樹種は内陸部と共通の地形的すみわけを行っており、海岸部のすみわけが海風の影響下で更新様式、稚樹の耐陰性・根系・初期成長など生態的な相違によって決定されていると推察した。なかでもイタヤカエデの種子は融雪後速やかにそろって地上部を展開するが、カシワは約1ヵ月後から数週間にわたり次々に発芽する。この間に前者は海岸林前縁部では海風、強風、土壤乾燥、霜害などを受ける危険性がある。また、イタヤカエデの花穂は1年生枝の頂芽から展開する枝にのみ着性するので、頂芽が海風によって枯死しやすい海岸林の前線では、実生繁殖に依存するイタヤカエデの更新は困難であり、一方、カシワは枝の展開部位に関わらず日当たりのよい枝に開花・結実するので、海風が強い凸型地形や林帯前線でカシワが優占する理由の一つであると考えた。

第Ⅲ章では、冬期におけるカシワおよびイタヤカエデの冬芽と枝条の枯死について調べた。冬期の強い海風がもたらす塩分が枝条に蓄積して枯死させることを明確にするため、海岸部のカシワとイタヤカエデの冬期における経時調査を行い、芽基部に壊死が発生すること、その壊死部は拡大し、これら被害枝が増加することを明らかにした。またカシワはイタヤカエデと比較して、頂芽部が飛来塩分に対してやや抵抗性が大きい、側芽では逆の傾向があった。

内陸部でイタヤカエデ枝に対する飽和食塩水の添加試験により、塩分によって芽基部に壊死が起こること、また枝の傷部分から枯死が起こることを明らかにした。

以上から飛来塩分の役割が明らかになり、その分布の検討が必要になった。

第Ⅳ章では、新しく考案した糸トラップを用い、石狩・厚田地域において、平坦地形上の飛来塩分分布の実態および分布の規則性を検討した。その結果、海岸林のスケールにおいても飛来塩分の汀線における分布形が、上陸とともに拡散、落下、地表面において完全吸着することを仮定した拡散方程式に従って減少することが確認された。

次に、海岸から70、480、900m離れた地点に段丘斜面がある調査において、飛来塩分と風速、風の流れを測定し、分布図を作成した。段丘斜面上部～肩部においては飛来塩分と風速が増大し、また肩部背後の段丘面および斜面脚部においては減少することが明らかになり、さきのカシワとイタヤカエデの分布が飛来塩分との関係でも説明できることを示した。

第Ⅴ章では、カシワの枝の伸長と枯下がりの実態を調べ、塩風が強く当たる側の枝は成長期の全伸長量が

大きい、冬期の枯下がり量が大きく、結果的に生き残る部分が短いことを明らかにし、これが偏樹形を形成すると考えた。平坦地形および段丘斜面における偏樹形と相対飛来塩分との関係を検討し、樹高および樹冠の偏心性から飛来塩分を推定する関係式をつくった。この関係からカシワ・イタヤカエデの生存および成長の相対塩分値の限界値を明らかにした。

これらの成果を総合して下記のモデル式をつくり、実際の林冠形形成過程について適合性を検討した。この式は平坦な林冠形を基準にとり、それと比較して凹凸および塩風に面する傾斜度によって抑制が強まるかまたは弱まるかを一次多項式で現したものである。すなわち

$$\partial H / \partial t = C(t) + E(x) + D \times \partial^2 H / \partial X^2 - B \times \partial H / \partial X$$

ここで、H：樹高

t：時間

X：汀線からの距離

Dは林冠を平滑にする程度に関係し、Bは林冠を偏らす程度に関係する。凹凸のある林冠の経時変化や不規則な地形をした砂丘上での林冠形成過程を再現することができた。林帯の前縁部では適合性は若干悪いが、ほぼモデルと合致した。両係数は正の係数であり、現段階では試行によって両係数を求めることになる。この論文では係数がある幅で例示したが、係数を環境条件から求めることが将来の課題である。

第VI章では、海岸林の保全および造成への応用について述べた。とくに、塩分粒子の拡散性と、地物への高い吸着性を利用した高能率防風工の可能性を示したこと、飛来塩分の空間的分布と林木の生育の関係を導いたこと、および海風環境下の林冠高目標の設定や、海岸林が伐採された場合の影響範囲の推定が可能となったことなどが、林帯造成・保全技術に寄与できる点である。

文 献

- ABRAMS, M. D. 1988 Sources of variation in osmotic potentials with special referenc to north american tree species. *For. Sci.* 34 : 1030-1046
- 相場芳憲・相沢孝夫・生原喜久雄・新井雅夫 1984 北関東地方における低質広葉樹の有用広葉樹への施業転換に関する研究. 昭和 58 年度 文部省科学研究費補助金研究成果報告書 : 25-39 東農工大
- 青野英也・梁瀬好充・杉井四郎 1974 茶園の潮風害発生機構. *農業気象* 30 : 131-140
- 浅井達弘・菊沢喜八郎・福地 稔・水谷栄一 1980 浦幌地方の天然生混交林の構造と生長量. *北林試報* 18 : 25-41
- ・新村義昭・薄井五郎 1983 道北地方の天然生海岸林の育成と生存条件-2. カシワ・ミズナラの芽の死亡の兆候はまず葉痕部にあらわれる-. *北方林業* 35 : 226-229
- ・新村義昭・薄井五郎 1984 北海道北部の天然生. ミズナラ海岸林の芽吹き様式と海風について. *95 回日林論* : 559-560
- ・新村義昭・薄井五郎 1986 北海道北部の天然生カシワ・ミズナラ海岸林の冬芽枯死の原因. *日林誌* : 68 : 368-374
- 浅野二郎 1963 種子の耐塩性を中心とした海岸地帯におけるアカマツおよびクロマツ林の成立に関する研究. *香川大農紀* 15 : 1-70
- BOHM, J. 1889 Meerwassersaltz in der Luft. *Zentralbl. f. das Gesam Forstw.* (Boyce より)
- BOYCE, S. G. 1957 The salt spray community. *Ecolog. Mono.* 24 : 29-67
- 千秋鋭夫・大野博教・下田 修・西宮 晶・関 輝雄・浅川仲平・赤井幸夫・宮川 実 1973 碍子汚損に

- 関連する環境条件の解析 — 礫子付着塩分量の離岸特性及びこれと気象条件の関係について—
 電力中研技—研報 73020 : 1—34
- 千葉 茂・小川 章・松平 昇・飯塚 修 1976 北海道胆振, 日高太平洋沿岸の緑化技術に関する研究 (3)
 — 苫小牧海岸試験地における潮風と樹木の葉中塩分量—. 王子紙林木育研報 3 : 135—141
- 大後美保 1937 農作物の塩害に対する研究. 日本気象集誌 81—95
- DAVID A. KING. 1986 Tree form, height growth, and susceptibility to wind damage in *Acer Saccharum* Ecol. 67 : 980—990
- 塩害対策専門委員会気象小委員会 1964 塩害と気象. 電協研 20 : 1—95
- 船津康二 1964 関東地方の台風による塩風害について. 気研時報 16 : 103—117
- GINZBERGER, A. 1926 Kustenvegetation der suddmatinischen Eilande. Vegetationsbilder 17 : 1—19
 (Boyce より)
- 長谷川 栄 1984 北海道における天然生海岸林の保全に関する基礎的研究—石狩海岸におけるカシワ林の
 構造と更新—. 北大演研報 41 : 313—442
- 藤原滉一郎 1987 防風堆雪柵の原理と適用 (III). 2 冬期の堆雪状況. 日林論 98 : 647—648
- ・梅島嗣郎 1962 海岸段丘上における潮風中の塩分分布について. 北大演研報 21 : 453
 —464
- 東 三郎 1964 砂防植生工におけるヤナギ類導入に関する研究. 北大演研報 23 : 151—228
- 1975 環境林をつくる. 205pp. 北方林業会
- ・清水 収・小泉章夫・藤原滉一郎 1985 防風堆雪柵の原理と適用 (I). 日林北支講 34
 : 182—184
- ・—————・藤原滉一郎・笹 賀一郎 1986 防風堆雪柵の原理と適用 (II). 日林北支講 35 :
 181—183
- 平野政治・塚本喜一 1974 留萌沿岸における冬季の塩分分布について. 昭和 47 年度道林研論 : 125—128
- 広木詔三・松原輝雄 1982 ブナ科植物の比較生態学的研究. III. 種子—実生期の比較生態学的研究.
 日生態会誌 32 : 227—240
- 北海道治山協会 1978 北海道民有林治山事業 30 年史. 631pp
- 北海道気象協会 1979—1989 北海道の気候. 23—33
- 北海道林業試験場防災科 海岸林樹種適応試験地の成績. 未発表
- 飯塚 肇・玉手三稜寿・高桑東作・佐藤 正 1950 防風林による海風中の塩分減少効果に関する研究. 林
 業試験場 45 : 1—15
- 猪野俊平 1964 植物組織学. 604pp
- 伊藤重右衛門・今 純一 1968 犠牲林の造林に関する一, 二の考察. 日林北支講 17 : 96—101
- ・————— 1970 北海道内海岸林用樹種の耐塩性試験. 日林講 81 : 310—312
- 1974 北海道における海岸防災林の造成. 林業技術 390 : 17—20 1974
- 1979 北海道における天然海岸林の現況調査と林帯造成法. 日林講 90 : 455—458
- ・成田俊司・新村義昭・清水 一 1980 治山用樹種としてのハンノキ類の利用について. 北
 林試治山調報 3 : 53—79
- ・—————・————— 1982 主要樹種の林分成立過程と苗木の産地特性. 光珠内季報 53 :
 49—51

- 伊藤重右衛門 1985 北海道における海岸林造成に関する基礎的研究. 北林試報 23 : 1-108
- 伊藤浩司 1970 根室国野付崎の植物生態学的研究 (II) - 森林群落について -. 北大演研報 27 : 1-48
- 門田正也 1979 防潮林の潮風濾過に就て (予報). 日林誌 35 : 212-216
- 1949 海岸付近における潮風中の塩分分布に就て. 日林誌 35 : 145-148
- 1962 海岸砂地のクロマツの塩害に関する生理生態学的研究. 名大演報 2 : 1-95
- 金内英司 1979 前砂丘の機能とその改善に関する研究. 山形大紀 (農) 8 : 293-408
- 河田三治 1951 飛砂に関する実験. 治山事業参資 (4) 1-22
- 河合英二・竹下 幸・大谷義一 1985a クロマツ海岸林の空中塩分捕そく作用 (II). 日林論 96 : 575-576
- ・————・————・細山田昭典・菅 道教 1985b 一ツ葉海岸の環境保全機能 (II) 日林
九支論 38 : 327-328
- 小池孝良 1986 北海道落葉広葉樹の葉内空隙量と樹種間差. 日林北支論 35 : 138-140
- 今 純一・伊藤重右衛門 1974 治山用広葉樹苗の育成について. 光珠内季報 19 : 12-18
- 幸喜善福・長沢 喬 1969 海岸付近の空中塩素量について (II) 空中塩素量の水平および垂直分布. 80
日林論 315-317
- 1978 海岸保全的見地からの沖縄の飛塩に関する研究. 琉大農報 25 : 431-554
- 1985 沖縄本島南部における防災林造成の方法について. 沖縄開発局 pp. 28
- 工藤哲也 1975 オホーツク海常呂海岸における空中塩分量と流氷との関係. 日林講 86 : 425-426
- ・鈴木孝雄 1972 北海道における海岸林の枝枯れの原因. 北方林業 24 : 261-263
- ・————・増田久夫 1972 江線付近における塩分の垂直分布. 林試北支年報 : 43-47
- ・————・遠藤泰造 1972 海岸林の林冠上縁が描く曲線の形状について. 日林北支講 21 : 21
-22
- ・———— 1974 留萌海岸で観測した冬季の空中塩分量と波浪との関係. 日林北支講 22 : 184
-186
- ・遠藤泰造・増田久夫・鈴木孝雄・吉武 孝 1977 環境緑化法. 林業試験場 : 179-206
- ・石川政幸・松岡広雄・佐伯正夫・河合英二 1982 海岸林の横断形と空中塩分の捕捉機能につい
て. 日林関東支論 34 : 241-242
- ・松岡広推・佐伯正夫 1984 クロマツ海岸林の林分密度と空中塩分捕捉効果 (I) 実測例. 日
林関東支論 36 : 187-188
- ・————・———— 1984 クロマツ海岸林の林分密度と空中塩分捕捉効果 (II) 林分密度と捕
捉塩分量について. 日林関東支論 36 : 189-190
- ・————・山野井克己 1989 間伐材を利用した防風柵の施工と効果 日林論 100 : 693-694
- 倉内一二 1956 塩風害と海岸林. 日生態会誌 5 : 123-127
- 松井善喜 1952 北海道北部海岸砂丘林の実態とその育成にたいする二, 三の考察. 68pp 旭川営林局
- 松岡広推・工藤哲也・山野井克己 1989 間伐材防風柵による塩風防止機能. 日林論 100 : 689-690
- ・河合英二 1982 海岸防災林の林形について. 日林論 93 : 447-448
- 宮木雅美 1985 カシワの更新に関するネズミ類 (I) - 堅果およびネズミ類の堅果の消失過程 -. 日林論
96 : 371-372

- ・斎藤 満 1988 ナラ類の堅果の散布様式. 北海道の林木育種 31 : 36-39
- 宮内 宏・益子義明 1987 樹木の潮風害発生機構に関する研究 (II). 日林論 98 : 621-622
- 農業気象ハンドブック編集委員会 1969 農業気象ハンドブック 600pp 養賢堂
- 農林水産技術会議 1987 環境変化に対応した海岸林の環境保全機能の維持強化技術の確立に関する研究. 研究成果 185 : 144pp
- 道士裕司・清和研二・菊沢喜八郎 1989 イタヤカエデの環境因子の違いによる発芽と稚苗の生長について. 昭和63年度道林研論 38 : 106-107
- 流れの可視化ハンドブック編集委員会 1982 流れの可視化ハンドブック. 377pp 朝倉
- 中西信行 1978 治山事業における植栽樹種について. 治山技論集 57-107. 北海道林務部治山課
- 新島善直 1940 カシハの造林学的研究. 北試北支報 13 : 1-113
- 小笠原左代市 1971 カンキツの潮風害とその対策に関する研究. 山口農試特研報 1-143
- 小川 章・松平 昇・飯塚 修 1976 北海道胆振, 日高太平洋沿岸の緑化技術に関する研究 (2) -潮風影響下の林分における葉中塩分と土壤中塩分-. 王子紙林木育報 3 : 129-134
- 小川紀一郎・東 三郎 1981 カシワ, ミズナラ種子の秋期発根現象. 日林論 92 : 407-408
- 沖中 健・賤機高康・堀口正昭・小林達明 1989 臨海埋立地における緑化樹の潮風害の季節変化. 千葉大園学報 42 : 129-137
- 大角泰夫 1986 広葉樹材を育てる. 林改善双 94 : 58-70
- 斉藤新一郎 1984 寒冷地方の海岸平野における防災林の造成方法に関する研究. 北林試報 22 : 131-235
- 坂本知己・増田久夫 1983 石狩海岸林前線部におけるイタヤカエデ若枝の枯死. 日林北支講 31 : 54-56
- ・———・斉藤武史 1984 紋別海岸林におけるアカエゾマツの生長. 日林北支講 22 : 240-243
- ・———・——— 1984 イタヤカエデ梢頭の枯死現象 -石狩海岸の事例-. 緑化工技術 10 : 16-22
- ・———・——— 1985 風速と風送塩分量からみた海岸林成立環境に関する砂丘の評価. 日林論 96 : 577-578
- ・———・——— 1985 石狩海岸林におけるカシワの生長に関する考察. 日林北支講 33 : 182-184
- ・———・——— 1986 海岸林前線部におけるカシワ着葉塩分量の季節変化. 日林北支論 34 : 175-177
- ・———・吉武 孝 1987 海岸林伐開による積雪分布の変化とその影響. 日林北支論 35 : 178-180
- ・———・——— 1988 着葉塩分量からみた海岸林伐開の影響. 日林北支論 36 : 196-198
- SALISUBURY, R. 1805 An account of Salt. Linn. Soc. London 8 : 286-290 (Boyce より)
- 佐藤一絃・馬場繁幸 1985 ヤエヤマヒルギの移植に関する若干の考察. 日林論 96 : 567-568
- 清和研二 1989 広葉樹5種の播種場所別の生存経過. 北林技研論 38 : 98-99
- 新村義昭・伊藤重右衛門 1976 治山用広葉樹の育成法の研究. 北林試報 14 : 77-85
- 新村義昭・浅井達弘・薄井五郎 1982 道北地方の天然生海岸林の育成と生存条件-カシワ・ミズナラ

- 新条が形成される部位と芽の死亡時期－. 北方林業 34 : 274-276
- 1986 海岸部と内陸部でのカシワ・ミズナラの肥大生長の違い (I) —アルミバンド式デンドロメーターの使用例—. 日林北支講 34 : 178-181
- ・浅井達弘 1986 道北地方の天然生海岸林の生育と生存条件 (3) —飛来塩分量とその葉痕部への付着・侵入過程—. 北方林業 38 : 152-156
- 1988 北海道北部の海岸林におけるコナラ属樹木2種の生存様式に関する研究. 74pp
- 鈴木 清 1981 湘南海岸砂防林における飛砂の実態. 神林試報 7 : 39-54
- 1984 湘南海岸砂防林の生長と林形に関する風洞実験. 10 : 24-35
- 高橋邦秀・小池孝良・藤村好子 1989 林内環境に順化させた落葉広葉樹苗の光合成・蒸散速度. 日林北支論 37 : 9-11
- 竹山壽夫 1950 海岸に於ける風速の分布と変動について. 治山事業参資 (2) 64-87
- 玉手三葉寿・佐藤 正・樫山徳治・高橋亀久松 1957 防風林による海風中の塩分減少効果に関する研究 (II). 林試研報 第100号 : 55-82.
- 館脇 操 1955 汎針広混交林帯. 北方林業 7 : 240-244
- 寺沢和彦・薄井五郎・江州克弘 1989 道央地方におけるミズナラ二次林の林分構造と立地条件. 北林試研報. 26 : 97-106
- 鳥羽良昭・田中正昭 1969 塩害に関する基礎的研究 (第1報) —海塩粒子の生成と陸上への輸送モデル— 京大防災研報 10B : 1-12
- 内田茂男 1950 海岸における空中塩分の測定について. 防災林に関する調査報告. 治山事業参資 (2) : 56-64. 林野庁
- 薄井五郎 1989 海岸から0-500mにおける平坦地形上の飛来塩分垂直分布の再現. 日林講 100 : 685-686
- ・成田俊司・柳井清治・清水 一 1983 昭和56年台風15号による太平洋岸地域の保安林が受けた塩風害 光珠内季報 55 : 7-11
- ・清水 一 1985 北海道石狩海岸における飛来塩分の高度分布. 96日林講 : 571-574
- ・———— 1986 海岸段丘ふきんの飛来塩分の分布. 北林試報 24 : 13-20
- ・————・新村義昭・浅井達弘 1988 北海道の海浜における風衝林形の形成モデル. 70 : 日林誌 309-314
- 山口恵一郎・小谷 晶 1953 北海道. 日本地理大系 5. 地誌

付表-1 飛来塩分の高度分布再現のプログラム (石狩)

```

1' simulation of salt spray      28-29/NOV/1984   Ishikari
2 CONSOLE ,, 0, 1 : SCREEN 3 : CLS 3 : DEFINT N, M, I, A
5   T=17000      : DT=5      : H=3000 : DH=12, 5
6   N=T/DT      : M=H/DH    : ' N ... TIME   ノ ケイサンカンスウ   M ... タカサ ノ ケイサンカイスウ
7   DD=DT/(DH*DH) : BB=DT/(2*DH) : G=5
10 DIM W(M+2) , X(M+20), CL (M+20), SP (10, 251), Y(10, 10)
15 FOR I=0 TO 235
16 IF I>24 THEN W(I)=3982.64*(I*12.5)^(-.815856) : X(I)=W(I) : '84/11/28-29
17 IF I<25 THEN W(I)=38+9/100*(300-12.5*I) : X(I)=W(I)
18 IF I<16 THEN W(I)=47+10/100*(200-12.5*I) : X(I)=W(I)
20 NEXT I
21 FOR I=0 TO 235 : SP (0, I) =X(I) : NEXT I : FOR I=0 TO 80 STEP 4 :
LPRINT
SP (0, I), : NEXT I : LPRINT
50 A=A+1
51 IF A<361 THEN GOSUB 5000
53 IF A>360 THEN GOSUB 5000
60 IF A=360 THEN GOTO 680
61 IF A=1080 THEN GOTO 680
62 IF A=1800 THEN GOTO 680
64 IF A=2520 THEN GOTO 680
70 IF A=2521 GOTO 1000
80 ERASE X : DIM X(M+10)

```



```

90 FOR I=1 TO 235 : X(I)=CL (I) : GOTO 50
680 J=A/360 : FOR I=1 TO 100 : SP(J, I)=CL (I) : NEXT I
681 LPRINT : LPRINT : SP(J, 0)=0 : LOCATE 2, 10 : LPRINT A/20; : LPRINT " m" :
FOR I=0 TO 80 STEP 4 : LPRINT SP (J, I), : NEXT I : GOTO 80
1000 LOCATE 23, 19
1001 PRINT " dH= "; DH, : PRINT " dT= "; DT, : FOR J=0 TO 7 : FOR I =
0 TO 150 : LINE (80+G*I, 5*SP (J, I)) - (80+G*I+G, 5*SP (J, I+1)) : NEXT I, J :
LINE (80, 0) - (500, 0) : LINE (80, 0) - (80, 300) : FOR QQ=1 TO 12 : PSET (78, 5
*5*QQ) : NEXT QQ
1002 FOR Q=1 TO 9 : PSET (80+G/12. 5*100*Q, 2) : NEXT Q
2000 FOR J=1 TO 5 : FOR I=1 TO 9 : READ Y (J, I) : CIRCLE (80+40*I , 5*Y (J,
I)), 2, 2 : NEXT I, J
2002 DATA 57, 47, 38, 29, 26. 5, 23, 20, 18, 15, 54, 47, 38. 5, 31, 27, 23. 2, 20, 18, 15. 5, 31, 34,
33, 31, 27. 5, 24. 5, 21. 5, 19, 16. 4, 23, 27, 27, 26. 3, 24, 21. 9, 20, 18, 16. 9, 19, 22, 23. 2, 23,
21, 19, 17, 16 , 14. 5, '11/28-29イシカリ
5000 FOR I=1 TO 235 : D=. 32*I : IF D>15 THEN D=15. 5
5010 X (0) =0 : IF I<32 THEN B=-. 008
5020 CL (I) =D*DD* (X (I+1) -2*X (I-1)) +X (I) -BB*B*(X(I+1)-X(I-1)) : NEXT I :
RETURN
6000 FOR I=1 TO 235 : D=. 45*I : IF D>15 THEN D=15. 5
6010 X (0) =0 : IF I<32 THEN B=-. 026
6020 CL(I)=D*DD*(X(I+1)-2*X (I) +X (I-1) )+X(I)-BB*B* (X (I+1) -X (I-1)) : NEXT I :
RETURN

```

付表-2 風衝林形の形成過程のプログラム (天塩)

```

1 CONSOLE ,, 0, 1 : COLOR 5 : ' 天塩 砂丘 SAVE = テシオ FIN
5 ' テシオ ノ カシワ サキュウ . スタート ハ ジメン. アトハ 5年 ゴト. ケイスウ A, B, C ト
クニ C ハ CL ノ ナイ スナジノ レンネン シンチョオリヨオ
10 CLS 3 : T9=71 : L9=8500 : H=1 : X=100
20 N=T9/H : M=L9/X
30 DIM W (M+1, N)
40 G=600/M : F=0
60 FOR I= 1 TO 85 : READ W(I, 0) : NEXT I
70 SCREEN 3 : FOR J=0 TO N
80 W (85, J) =92+610. 724-517. 098*. 874692 ^ (J/5-1) : W (0, J) = 352. 33593#-298. 32153
#. 874692 ^ (J/5-1) : NEXT
88 FOR J=0 TO N-1
90 IF (J-F) <>0 THEN GOTO 210
110 FOR I=0 TO M-1
120 LINE (G*I, 100-1*W (I, J)) - (G*I+G, 100-. 1*W (I+1, J)), 3
140 NEXT I
150 F=F+10 : W(0, 0)=0
210 FOR I=1 TO M-1
220 D=3000 : B=15 : C=- ((W (0, J+1) -W (0, J)) + ((W (85, J+1) -W (85, J)) - (W(0, J
+1)-W(0, J))) *I/85
228 IF I>28 THEN B=2
230 Q=W (I+1, J) -2*W (I, J) +W (I-1, J)
232 IF I>25 THEN IF I<35 THEN C=. 75*C
233 IF I>45 THEN IF I<55 THEN C=. 7*C
235 IF I>30 THEN IF Q>0 THEN D=1000 : 'B=1
240 W(I, J+1)=D*H/ (X*X) *Q+W (I, J) -B*H/ (2*X) * (W(I+1, J)-W(I-1, J)) -C*H
245 IF W (I, J+1) <W (I, J) THEN W (I, J+1) =W (I, J)
250 NEXT I, J
255 LINE (0, 102) - (590, 102) : LOCATE 25, 6 : PRINT "30 40 50
85M"
260 FOR I= 0 TO 85 STEP 5 : PRINT W(I, 70), : NEXT I
1000 DATA 0, 0, 0, 1, 1, 3, 6, 9, 12, 18, 26, 35, 45, 58, 75, 92, 110, 130, 160, 179,
210, 231, 263, 293, 315, 335, 357, 364, 373, 365, 340, 315, 280, 243, 220, 200, 190, 180, 180,
188, 193, 200, 212, 222, 240, 260, 280, 300, 314, 320, 328, 320, 300, 280, 255, 228, 200, 175, 160
1010 DATA 140, 122, 108, 100, 100, 100, 100, 102, 108, 120, 128, 138, 134, 128, 115, 113, 110,
108, 108, 108 108, 108, 108 , 108, 108, 108, 108, 108, 108
1020 LOCATE 0, 10 : LIST 232-235

```