

学位論文

東北地方太平洋沿岸北部海岸クロマツ林の立木形態構造と  
個体成長に関する研究

Studies on the stand structures and growth of *Pinus thunbergii*  
forest at the pacific coast of the northern Tohoku region.

岩手大学大学院連合農学研究科

生物環境科学専攻（山形大学）

白旗 学

## 目 次

### 第1章 序 論

1.1 研究の背景と目的	1
1.2 本論文の構成	3

### 第2章 地上 LiDAR による立木の形態解析 —岩手県大船渡市吉浜地区—

2.1 調査地と調査方法	5
2.1.1 調査対象地	5
2.1.2 調査区	6
2.1.3 使用した地上 LiDAR	6
2.1.4 点群データの処理方法	7
2.2 結果と考察	8
2.2.1 地上LiDARによる個体形状測定の有用性	8
2.2.2 地上LiDARによる個体形状	10
2.3 小 括	12
図 表	13

### 第3章 立木の肥大成長の経過 —岩手県大船渡市吉浜地区—

3.1 材料と方法	32
3.2 結果と考察	32
3.2.1 津波前後における林分の平均的な肥大成長の推移	32
3.2.2 津波前後における各個体の肥大成長量の推移	34
3.2.3 調査区内における 2015 年の個体肥大成長量と樹冠幅	36
3.3 小 括	36
図 表	38

### 第4章 高齢クロマツ林における樹冠形態と肥大成長 —青森県八戸市市川地区—

4.1 調査地と調査方法	47
4.1.1 調査地	47
4.1.2 調査方法	48
4.2 結果と考察	49
4.2.1 樹冠パラメーターと胸高直径	49
4.2.2 高齢クロマツ個体の肥大成長の推移	50
4.3 小 括	51
図 表	53

第5章 結 論 .....66

摘 要 .....70

引用文献 .....73

謝辞

## 第 1 章 序論

### 1. 1 研究の背景と目的

海岸林は、潮害、飛砂・飛塩、風害から地域の生活環境を保全し災害を防ぐ機能を持っている。津波に対する被害軽減も期待される機能であり、これらの機能を発揮する森林は、防風保安林、飛砂防備保安林、潮害防備保安林など、各種の保安林として指定され、維持管理がおこなわれている。このような海岸林は、地域に暮らす住民にとって生活圏に密着した身近な森林であり、白砂青松に代表されるように海岸の景観を形作る重要な存在として、また地域の環境を守る大切な存在として、住民みずからが維持管理にたずさわることも多い（小田，2003）。

このような背景を持つため、海岸域に植栽されたクロマツ林は、防風や飛砂防止機能を前提として、江戸時代初期から全国的に造成されてきた経緯がある（小田，2003）。東北地方では太平洋沿岸、また日本海沿岸の砂浜、磯浜や崖浜に広くクロマツ林が造成されている。これらクロマツを主とする海岸林のうち、東北地方太平洋沿岸では、2011年3月東北地方太平洋沖地震による津波で海岸林は大きな被害を受けた。青森県から福島県に至る津波被害の全体像は、東北森林科学会による各県の緊急調査報告（野堀，2011）に示されている。海岸林被害に関する速報的研究は多数あるが、詳細なデータ分析に基づいた研究としては、青森県については佐藤ら（2012）、岩手県については星野（2012）、本田・林田（2015）、宮城県については寺本ら（2012）、山中ら（2012，2013）、Aoyama et al.（2012）、渡部ら（2014）が指摘できるが、クロマツ林に限定すると岩手県における報告事例はみられない。一方、津波被害後5年が経過したが、津波前後の海岸林に関する研究は、齋藤ら（2014）による植栽後の立地環境の推移に関する研究があるものの事例が少なく、クロマツ海岸林の津波前後の変化に着目した研究事例は見当たらない。海岸域では津波被害を免れて残存しているクロマツ林は少な

くなく、今後の海岸林の維持管理には残存しているクロマツ林の役割が大きいとされる（南ら，2013）。

海岸林における樹木は内陸部の樹木に比べて非常に厳しい生育環境にあり，内陸部の樹木とは成長特性が異なる。そのため，海岸林を再生していくうえで植栽樹種の種特性を把握することが大事である。現在，海岸林再生作業は，破壊された海岸林の再植栽の占める割合が多く，苗木の活着や初期成長等の初期保育の部分が中心である。しかし将来的にみた場合，間伐による本数調整を主とした成林後の保育も同じように重要である。北東北地域では，1993年に発生した昭和三陸津波を契機として植栽された林分が多く（松岡，1992），十分な調査がされないまま今回の被害を受けたこともあり，特に成林後の成長に関するデータの集積が不十分である。一般に，海岸防災林の機能を発揮するには根が深くまで張り，形状比が低く胸高直径の大きい個体の方が望ましい（小田，1992）。肥大成長は樹冠の葉の光合成による同化産物でおこなわれるため，樹冠葉量と強い関係を持つ。そのため，肥大成長を予測する際，樹冠の形状の判断が重要である（藤森，2006）

LiDAR（Light Detection And Ranging）による森林の測定は，主に航空機 LiDAR によるリモートセンシング分野で盛んに利用されている（秋山，2014）。航空機 LiDAR は，上空から照射したレーザーの反射によって測量をおこなうため，樹冠などで遮られた下層部の計測はできない。逆に地上 LiDAR は，地上からの照射になるため，地表面の測定が可能になる。従来，地上構造物や地形の測量に用いられており，可搬性，価格などの面で，最近急速に普及しつつある。森林の分野では，大政ら（2002）により紹介されて以後，その軽量性を生かして林分の葉群量，森林群落の構造計測や毎木調査への適用がおこなわれてきた（Hosoi and Omasa，2006；Hosoi and Omasa，2009；Hosoi et al.,2010；加藤ら，2014 など）。測定自体は機器が自動で全周スキャンをおこなうが，得られた膨大な点群データをどのように解析するか，という点が問題となる。

Hosoi and Omasa (2006) は、空間を 3 次元 Voxel 化し、それぞれの Voxel に存在する葉群によるレーザーの反射強度から、森林内の葉面積密度分布を 3D モデリングする Voxel 法を開発し、その方法を用いた地上 LiDAR による森林・樹木の 3 次元葉群解析に関する研究がおこなわれている (Hosoi and Omasa, 2009 ; Zande et al.,2009 など)。一方、林業では収穫物は幹であり、その蓄積を把握し管理することが重要であることから、中村(2013) は 3D レーザースキャナーによる毎木調査と幹の曲がりの評価・デジタルドキュメント化による森林資源管理システムを構築し、実用化をはかっている。また、最近では育種の際の個体形状評価 (平岡ら, 2015) にも応用されている。地上部から地上 LiDAR, 上空からはドローンなどを用いて空中 LiDAR で測定し、両者を合成することでそれぞれの弱点を解消した方法 (加藤, 2014) も考案されており、林分構造そのもののデジタル化が身近になってきた。そこで本研究では、独特な形態を持つ高齢クロマツ海岸林において、個体の形状評価をおこない成長との関係を明らかにすることとあわせて、形状評価にあたり地上 LiDAR による測定を適用し、その有用性やデータ処理の際の問題点を同時に探ることとした。

## 1. 2 本論文の構成

本研究では大規模な津波被害を受けた岩手県大船渡市吉浜地区で倒壊を免れたクロマツ林を対象として、第 2 章では地上 LiDAR により森林構造をデジタル化して計測をおこない、手法の妥当性を含め、個体形状の把握、津波による浸水被害の程度を推測する。第 3 章では、津波前後の肥大成長量を測定し、浸水による影響の有無、現在の肥大成長特性を検討する。第 4 章では、前章とは異なる青森県八戸市市川地区の高齢クロマツ林で、樹冠の形態と肥大成長に着目し、肥大成長に影響をおよぼす樹冠部の指標となるものは何かを検討した。また、成長錐コアから過去の肥大成長履歴を調べ、樹冠形態との関係について検討をおこなう。

以上から、今まで詳細な成育情報が少なかった北東北太平洋側地域の海岸クロマツ林について、津波被害を受けた後に倒壊を免れた林分の成長経過を明らかにするとともに、健全性の維持や将来につながる海岸林の造成の指針を提示するものである。

## 第2章 地上 LiDAR による立木の形態解析 —岩手県大船渡市吉浜地区—

高齢クロマツ個体は、樹高 20m を超える個体が多く、海陸風の影響を受け幹の傾斜、樹冠偏奇という特有の形態を示す。従来そのような個体の樹冠形状を地上から正確に測定するのは困難であった。そこで本研究では、最近開発された地上 LiDAR による形状測定を森林に適用し、岩手県大船渡市吉浜地区の残存クロマツ林で、森林のデジタル化をおこないその有用性を検討するとともに、林分内の個体形状の測定をおこない、個体形状の把握、津波による浸水被害の程度を調べた。

### 2. 1 調査地と調査方法

#### 2. 1. 1 調査対象地

調査対象地は岩手県有防潮林本郷事業区(岩手県大船渡市吉浜地区;北緯 39.149 度, 東経 141.839 度 : Garmin Map64s 使用) のクロマツ海岸林である (図 2.1, 図 2.2)。調査地から約 13km 離れた大船渡特別気象観測所 (大船渡合同庁舎敷地内) における気象データによると、2006~2010 年の 5 年間の年平均気温 11.6℃, 最低日平均気温 7.8℃, 同最高気温 16.3℃, 平均年降水量 1617mm であった。調査対象地は、花崗岩を基盤とした海岸段丘上にあり、未熟な真砂土を母材とする比較的未発達な土壌であった (図 2.3)。

調査対象地の林分は、岩手県の森林簿によると 1941 年に防潮保安林の指定を受けている。吉浜地区は明治三陸津波 (1896 年)、昭和三陸地震津波 (1933 年) でも壊滅的な津波被害を受けており、記録にはないものの昭和三陸地震津波以降に造成がはじまったものと考えられ、林齢は 2013 年で約 80 年程度と判断される。震災前まで調査対象地の林分の南側には、海岸線に沿って 1960 年から潮害防備保安林として造成事業がはじまった大船渡市有林が存在していたが、震災による津波によって前面の防潮堤および後背部の農地用防潮堤とともに全壊流出している。震災による津波は、吉浜湾の

侵入高 17.2m（成美堂出版部，2011）とされており，内陸部への遡上高は 16.8m の地点まで到達していたという地域住民の証言がある（森と緑の研究所，2012）。調査地は高いところでも海面から 10m 程度の場所であり，完全に浸水したと思われる。林分が流出せずに残った理由は，流出した南側の市有林は地盤高 1～2m 程度の低地にあり，前線部が海水浴場として使用されていた砂浜，後背部は農用地で未固結堆積物地盤が多かったのに対し，調査地を含む林分は 5m～10m と高く，また花崗岩を基盤とする強固な海岸段丘上にあつたためと考えられる。

## 2. 1. 2 調査区

調査対象地の林分は，北側の林縁部にアカマツ数本があり，南西部にはケヤキ，ハンノキ等の広葉樹が少数混在していた。林床にはヤブツバキがよくみられたが，調査開始時点では，ほとんどの株は枯死状態だった。2013 年 10 月に調査対象地のうちクロマツを中心とする東側部分に調査区を設定した（図 2.4）。調査区の長さは 140m，林帯幅は最大で 35m，面積は 0.344ha，立木密度は 970 本/ha であった。2014 年 4 月，直径巻尺で胸高直径，超音波式測高器（Vertex IV，ハグロフ社）で樹高，コンパスにより立木位置を測定した。図 2.5 に調査区内個体の胸高直径と樹高の頻度分布を示す。

調査対象地の林分の南側でなるべく上部に樹冠が存在しない位置に簡易型自動気象観測システム（Em50，Decagon 社）を設置して気象観測をおこなった（図 2.6）。使用したセンサー類は，サーミスタ気温センサー，静電容量型湿度センサー，シリコンフォトダイオード全天日射計，転倒マス型雨量計，カップ式風向・風速計であり，10 分間隔でデータロガーに記録した。システムは単 3 乾電池 5 本で 8～12 ヶ月駆動可能であった。測定は 2014 年 3 月に開始し，約 1 か月に一度データを回収した。

## 2. 1. 3 使用した地上 LiDAR

使用した地上 LiDAR である 3D レーザースキャナ（Trimble TX5）について，諸元

を表 2.1 に、実機を図 2.8 に示す。本機種は、中距離型に分類される機種であり、計測範囲はカタログ上 120m であるが、設置位置からビームが到達した点の位置座標を取得するので、枝や幹などで遮られてしまったものは測定できない。そのため、調査対象地内で機器を移動し、複数の点で測定をおこないデータを合成（レジストレーション）する必要がある。各点でスキヤニングする際、基準球を画像に写しこみ、それを基準として座標を合わせた（図 2.8）。中村（2014）によると、通常的人工林で林分のデジタル化をおこなう場合、本機種では、実際のレーザー到達距離を考慮して 50m 間隔でスキヤニングをおこなえば十分実用的なデータが得られるとしているが、今回は詳細な樹冠部の測定を目的としたため、さらに短い 20~30m 間隔で機器を移動し、延べ 13 か所で測定をおこなった。測定は、2014 年 5 月 19 日におこなった。本研究では、現地での 3D スキヤニングと得られた点群データの処理として個体の抽出と位置、胸高直径を含む、高さ 10cm ごとの幹の中心座標と直径の算出までを株式会社 woodinfo に委託した。

#### 2. 1. 4 点群データの処理方法

点群データは、測定点から発射したレーザーが到達した 1 点につき  $x$ ,  $y$ ,  $z$  座標, RGB 値, 反射強度を一組とするデータセットである（図 2.9）。今回の測定では、各測定点で約 7500 万~1 億 1000 万点, 合成後は約 13 億点の点群データが得られた。この点群データから遠藤ら（2012）, 中村(2013)の方法に従い, 個体判別, 個体の位置座標, 胸高直径, 樹高を求めた。まず, 点群データの下部で面的つながりを持つデータから数値標高モデル（Digital Elevation Model）を生成する。次に DEM の上方 1.3m の水平面で円弧状の点群データを抽出し各個体と判別し, 円形近似をして胸高直径と中心座標を求める。その点群データと垂直方向に 10cm ごとにつながりを持つ円弧状のデータ群を抽出し同様に直径, 中心座標を求め, 各個体の幹のデジタル情報化をおこなった（図 2.10 右下を参照）。以上の処理は, 林内 3D デジタルスキャン解析ソフト

(Digital Forest, 株式会社 woodinfo) でおこなった (図 2.10)。デジタル情報化された個体ナンバーは、ソフトによりナンバリングされており、現実の個体ナンバーとは異なっているため、点群データから求めた各個体の位置座標と、現実の林分においてコンパス測量で求めた位置座標を図面上で照らしあわせ、点群データ上の個体が、実際どの個体に該当するかを判定し、個体の特定をおこなった。

このソフトでは、さらに各個体を中心とする 4m メッシュで点群データを切り分け、それぞれのメッシュの鉛直方向でもっとも高い観測点を先端と判断し、DEM との差から樹高としている。しかし調査地では樹幹が傾斜している個体が多く、隣の個体が 4m メッシュ内に入ってきて先端を誤判別することが多かった。また、樹冠の正確な測定をおこなうためにも、個体ごとの点群データを切り出して抽出する必要があった。しかし、これは点群エディタと呼ばれる種類の専用ソフトによる完全な手作業とならざるをえず、調査区のすべての個体についておこなうのは膨大な時間が必要であった。そのため、今回は後述する成長バンド測定個体である 59 本について抽出をおこなった。なお前節で述べた点群データのデジタルドキュメント化に加え、この個体抽出作業も株式会社 woodinfo に委託した。

切り出した個体の点群データを専用のビューアソフト (Pointools View, Bentley 社, フリーソフト) を使って樹高、樹冠部の測定をおこなった (図 2.11)。それぞれの個体の点群データファイルをソフトで読み込み、コンピューター画面上で樹冠を判定し直方体をあてはめ、出力される各点の xyz 座標から樹高、枝下高、東西南北 4 方向の樹冠幅および樹冠中心部の座標、樹冠長を求めた (図 2.12)。

## 2. 2 結果と考察

### 2. 2. 1 地上 LiDAR による個体形状測定の有用性

図 2.13 に点群データによってデジタル化された調査対象区を示す。表示ソフトである Pointools View は、点群データ処理ソフトウェアの中でユーザー数が多い Bentley

社の Pointools シリーズのビューアソフトとして、フリーで配布されている。この種類のソフトは、膨大な点群データを一般的なパーソナルコンピューターの限られたリソースで扱うために独自フォーマットでデータを取り扱っている。pod フォーマットと呼ばれる独自の点群フォーマットだが、フォーマットコンバーターソフトも同時に配布されており、各社の 3D レーザースキャナのデータフォーマットや ASCII 形式フォーマットから作成することができる。画像は点群データの集まりであり、視点を移動することで林内・林外様々な方向から林分を見ることが可能である。図 2.12 で示したように、地上からの測定ではわかりにくい直上からみた樹冠の判定など、有用性は高い。なお、野外における測定に要した時間は、1 点につき機器の移動・調整を含めて 15 分程度であり、全体（13 点）の測定は 3 時間弱で終了した。測定で感知した個体は、調査区外の個体もあわせて約 590 本（面積約 0.6ha）であった。

地上 LiDAR による調査では、基本的に周囲測量、毎木調査は必要なく、点群データから立木位置および形状の精密な測定が可能である。しかし、個体として判断された立木は、ソフト上でナンバリングされるため、画像上の個体が実際にどの個体であるかは、別途コンパスによって測量した位置図と照らし合わせて判断した。両者の水平面上の誤差の頻度分布を図 2.14 に示す。差は  $0.43 \pm 0.30\text{m}$ （平均±標準偏差）であり、ほとんどの個体で 1m 以内であった。中村（2013）は下層植生が少なく直立した個体が多いスギ人工林で同様の測定をおこなった時、位置の差が  $19.8 \pm 0.14\text{cm}$  と報告している。本研究の場合、根元にポールをたてて測量しており、コンパスによる位置座標自体に直径分の誤差が生じやすい事、傾斜している個体が多いため、胸高位置と根元位置のずれが大きくなることを考えると、充分実用的な範囲にあると判断された。図 2.15 に立木位置と 3D レーザースキャナ測定点を示す。

比較的孤立状態にある幹部の判定に比べ、樹冠部は枝葉が混み合い、ソフトウェア的に処理をおこなう場合、隣接木の梢端を誤判定しやすく（戸田ら，2009；平岡ら，2015），樹高を求める際に問題となってくる。特に海岸林クロマツは高密度植栽かつ斜

立した個体が多く、根元の直上に梢端が存在しないため、ソフトウェア的に梢端を求めることは難しいと思われる。本研究では、点群データから個体データを手作業で切り出した 3D 情報から胸高直径と樹高を読み取ったが、これらを実測したデータと比較したところ、両者には高い相関が認められた（図 2.16, 図 2.17）。また、t 検定（両側検定、有意水準 0.05）で調べたところ、胸高直径については  $t=0.29$ ,  $p=0.78$ , 樹高についても  $t=0.14$ ,  $p=0.88$  で有意な差は認められなかった。同様のシステムを利用した既存の報告（中村, 2013, 平岡ら, 2015）でも高い相関を示している。以上から、今回の地上 LiDAR による測定は充分正確であり、測定木について樹高、枝下高や樹冠幅は、地上 LiDAR 情報から読み取った値を用いることができると結論付けられた。一方で、膨大な点群データから個体データを切り出す際は手作業となり、現状では高価な専用ソフトが必要になる点が問題点としてあげられる。

## 2. 2. 2 地上 LiDAR による個体形状

地上 LiDAR で得られた樹冠の点群データを直接表現すると個々の樹木の位置関係やサイズが把握しにくくなるので、3D データから読み取った樹冠データ ( $n=59$ ) を利用し森林構造の 3 次元表示・樹冠投影図シミュレーターソフト Forest Windows (Nobori,1998) を用いて単純化した鳥瞰図を作成した（図 2.18）。この図では、南東側から北西側に俯角 20 度で見下ろした鳥瞰図を示している。図の個体は、根元の xyz 座標、胸高直径、樹高、樹冠を直方体で当てはめた時の東西および南北方向の幅、樹冠長、樹冠中心の水平面投影座標を基に描画した。図に示した個体の概況を表 2.2 に示す。幹材積は、瀧ら (2016) による宮城県海岸クロマツ林の材積式(1)を用いて求めた。平均幹材積と立木密度 (970 本/ha) から森林蓄積を推定したところ、森林蓄積は  $468.5\text{m}^3/\text{ha}$  であった。

$$V_{\text{st}}=0.0000403 \cdot (D^2H)^{0.940} \quad (1)$$

$V_{st}$ =単木幹材積( $m^3$ )

D =胸高直径(cm)

H =樹高(m)

図 2.19 に測定個体の樹冠投影図を示す。各個体の東西方向と南北方向の樹冠幅を対応のある t 検定（両側検定，有意水準 0.05）で調べたところ， $t=-1.77$ ， $p=0.08$  で有意差は認められなかった。調査対象地は南東側が海に面していたが，図 2.19 よりほとんどの個体の樹冠は根元位置の南東部にあり，幹が海側に傾いていることがわかる。瀧ら（2016）による宮城県石巻市渡波のクロマツ海岸林の調査では，幹は僅かに西側，すなわち内陸側に傾斜していたことが述べられている。一方，東北地方日本海沿岸の山形県で野堀ら（2004）が調査したクロマツ林では幹の傾斜が東方向となっており，日本海からの強い季節風の影響であることを示している。風向が幹の傾斜に与える影響を調べるため，調査地における気象観測データから，2014 年 4 月～2015 年 3 月の 1 年間における風配図を図 2.20 に示す。この林分は年間を通し，海陸風の影響を強く受けており，西～西北西，東～東南東 2 方向を中心とする風向成分が多く，そのうち前者（陸風）の頻度が高いことが幹の傾斜に影響していると考えられる。また，南東側が海に面して開けており，日射の影響もあると思われる。

岩手県によると吉浜湾の津波侵入高は 17.2m と記録されている（成美堂出版部，2011）が，測定個体のクロマツの根元高は海面から 5.8~8.8m の高さであり，各個体は 8.4~11.4m 浸水したと考えられる。実際の浸水高は不明であるが，いくつかの個体でその高さの幹に傷がみられ，清水・佐藤（2014）による津波侵入高のシミュレーション結果とも一致している。津波被害ではクロマツの樹冠が浸水すると倒伏しやすいことが知られている（佐藤ら，2012）が，測定個体の中でもっとも枝下が低かった個体の枝下高は海面から 13.6m であった。Forest Window では，高さを変化させて林分の水平断層図をみることができる。海面高さ 17.2m における測定木の水平断層図を図

2.21 に示す。図より津波浸水高の 17.2m では東側 3 個体の樹冠下部が浸水しており、図より下層の 1 個体（梢端高 17.1m）とともに 4 個体が浸水したと考えられる。

### 2. 3 小 括

岩手県大船渡市吉浜地区の 80 年生クロマツ海岸林について地上 LiDAR による個体形状の測定をおこないその有効性を検討するとともに、そのデータから 2011 年東北地方太平洋沖地震津波による浸水被害について分析した。地上 LiDAR を使用することで短時間に林分の個体形状をデジタルデータ化が可能なこと、得られたデータをパーソナルコンピュータ上で解析することで、高い精度で個体の位置情報とともに形状を測定できることがわかった。測定の結果、この林分におけるクロマツ個体は海側に向かって一様な傾斜状態にあり、主に風の影響と思われること、林分全体に浸水はあったものの、樹冠まで浸水した個体は少ないと判断された。



図 2.1 調査対象地の近景

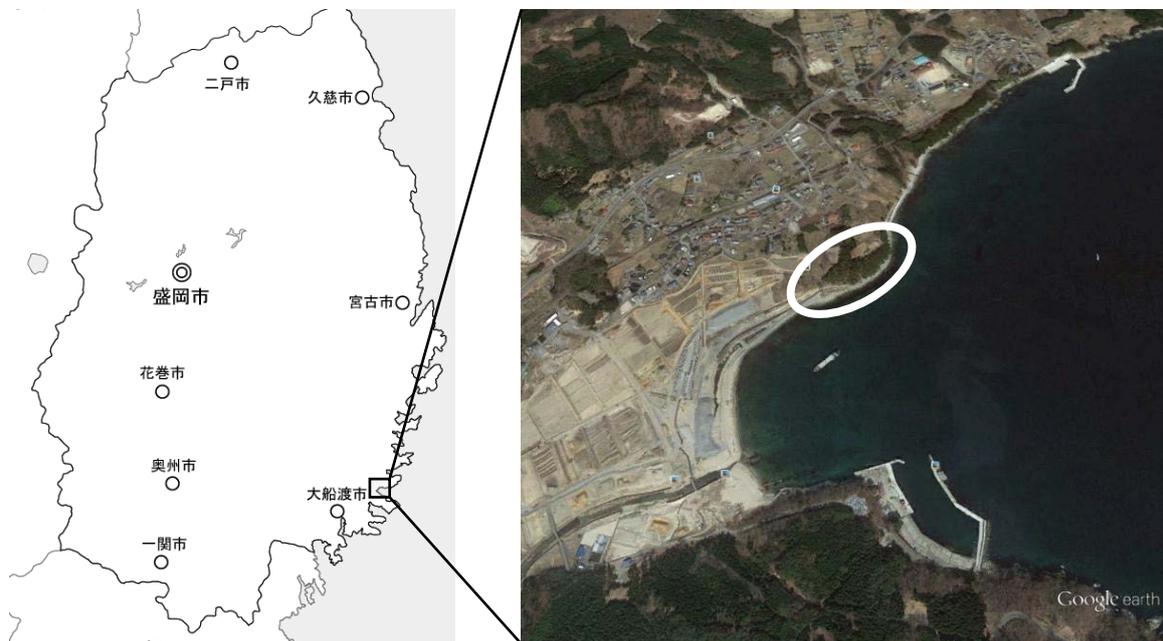


図 2.2 調査対象地の位置と遠景（白線内が調査対象地）  
遠景の撮影日は 2015/10/14



図 2.3 調査対象地の土壌  
上写真は調査対象地の北東部海岸側より，下写真は中央部で試孔を  
作成して撮影



図 2.4 調査対象地と調査区

点線内が調査対象地，赤枠が調査区，白丸は気象観測機器設置位置

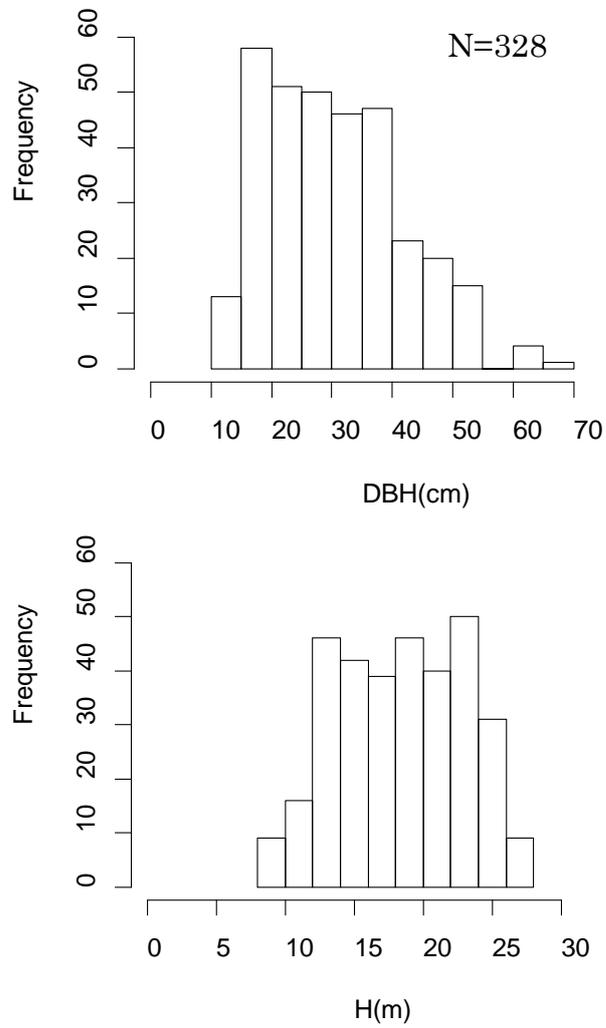


図 2.5 調査区内個体の胸高直径と樹高の頻度分布



図 2.6 気象観測システム  
設置位置は図 2.4 を参照

表 2.1 3D レーザースキャナ諸元

計測距離	0.6m-120m
スキャン範囲	垂直300° 水平360°
測定精度	±2mm@25m (反射率10%)
スキャンスピード	122,000/244,000/488,000/976,000(点/秒)
分解能	0.009° (水平, 垂直)
レーザー波長	905nm(Class 3R)
ビーム拡散	0.19mrad (0.011° )
ビーム径	3mm
レーザータイプ	位相差方式
内蔵カメラ	70 メガピクセル(カラー)
重量	5kg

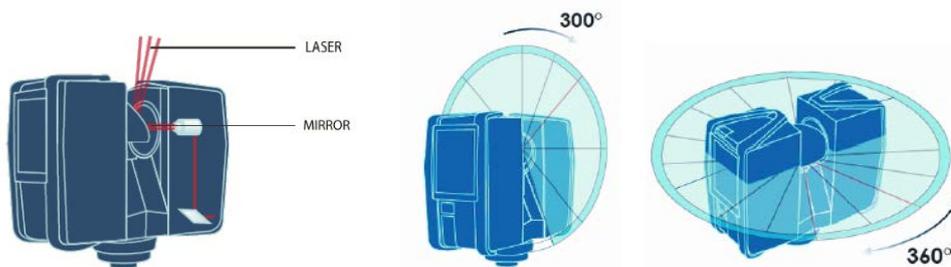


図 2.7 使用した 3D レーザースキャナ (Trimble, TX5)  
 (図は Trimble TX5 User's Manual より抜粋)



図 2.8 基準球と実際の測定の様子

上写真：基準球 下写真：実際の測定（機器スキャニングセット中）

X	Y	Z	R	G	B	反射強度
-36.6918	-31.1912	-4.24663	177	209	124	0.447266
-54.8042	-28.905	-3.20433	210	224	253	0.443344
-36.4659	-31.8902	-4.33843	191	204	150	0.3806
-43.5761	-34.4837	-4.43763	154	174	105	0.4104
-36.0454	-37.349	-4.60933	255	255	255	0.353928
-37.9398	-36.2624	-4.51713	255	255	255	0.444916
-36.2165	-28.3058	-3.77683	162	175	115	0.250015
-40.2867	-34.6571	-4.50663	250	250	248	0.421387
-37.1373	-34.1078	-4.60433	208	216	171	0.250015
-38.2683	-37.2714	-4.54183	255	255	255	0.321777
-36.408	-31.7787	-4.33873	168	178	118	0.480209
-34.7239	-28.3956	-3.90683	155	178	106	0.342957
-41.9571	-36.0352	-4.49023	255	255	255	0.363342
-36.6721	-35.5336	-4.61623	246	246	246	0.335114
-41.5166	-37.5165	-4.53883	255	255	255	0.293549
:	:	:	:	:	:	:

図 2.9 3D レーザースキャナによってえられた点群データの例

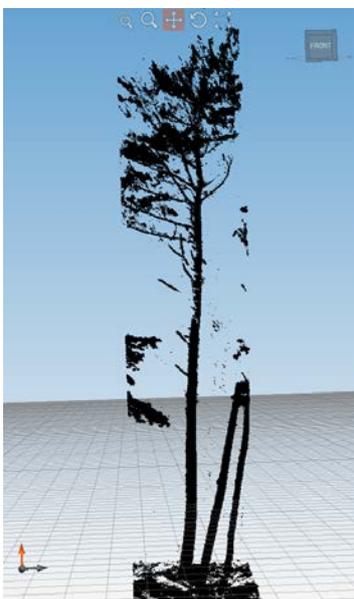
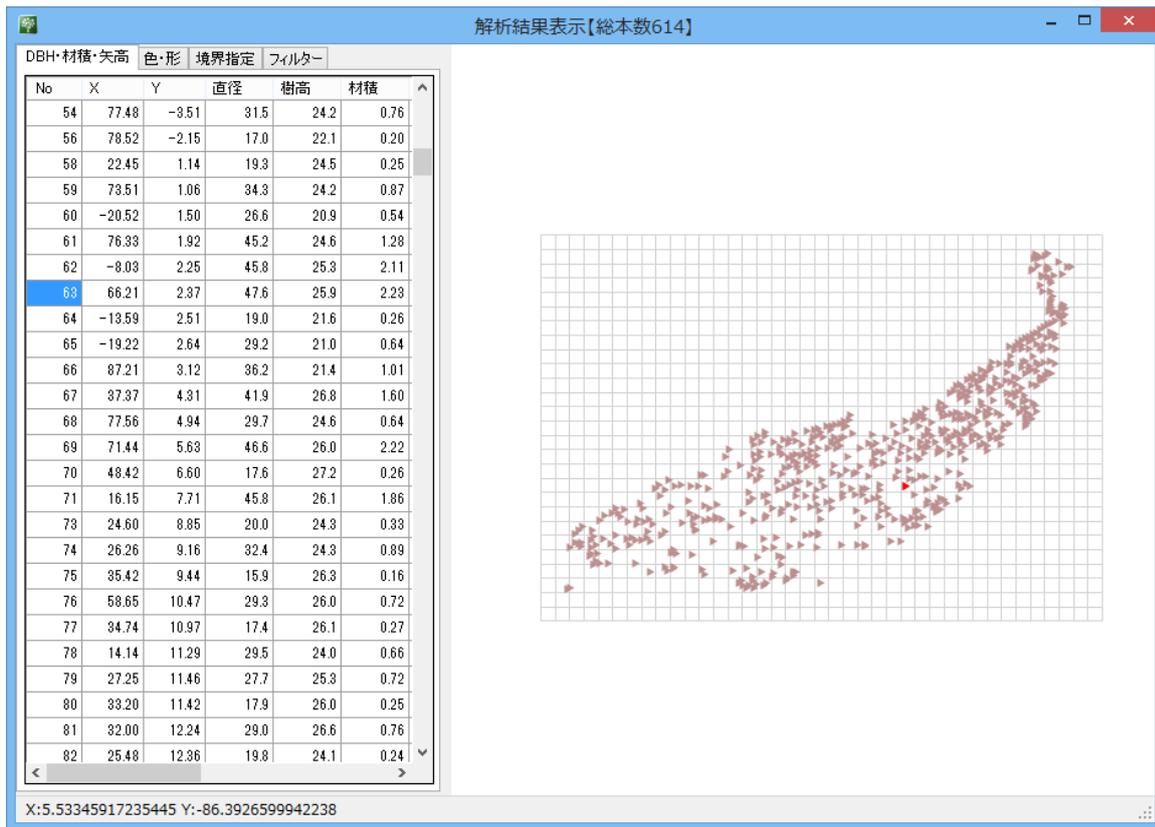


図 2.10 林内 3D デジタルスキャン解析ソフト Digital Forest による森林のデジタルドキュメント化  
 上：個体位置と位置・個体諸量，下左：個体 3D 表示，下右：幹形状（10cm 間隔で中心座標と直径を測定している）。

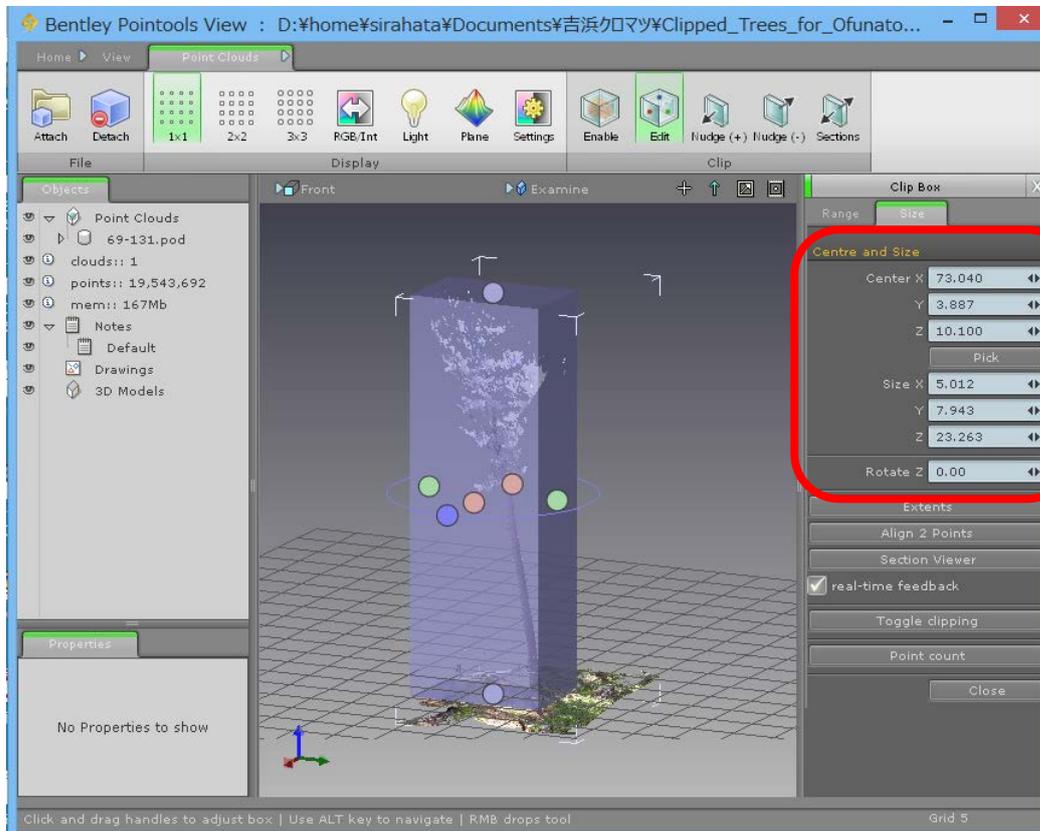


図 2.11 個体の点群データの測定 (Pointtools View 使用)

点群データに直方体（紫色の部分）をあてはめると、中心座標、直方体のサイズと北からの回転角度が出力される（赤枠部分）。図は、樹高の測定。

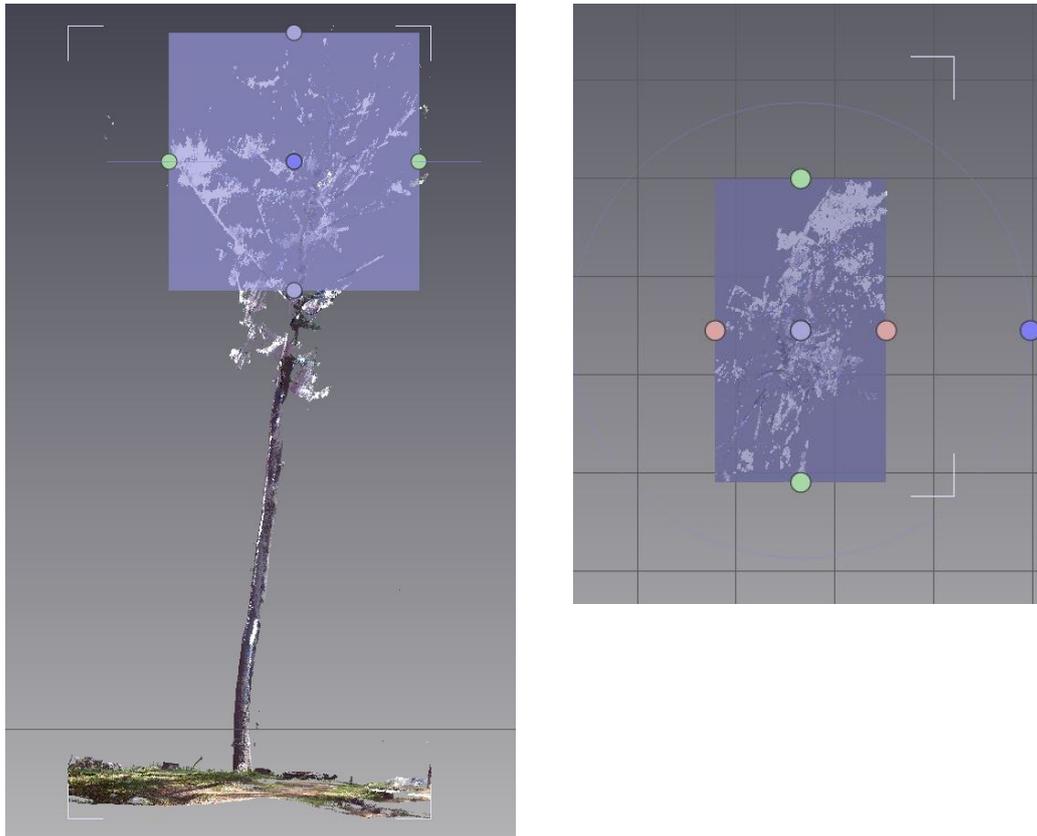


図 2.12 点群データから抽出された個体と樹冠計測  
樹冠部分に直方体（紫色の部分）をあてはめた。左：側面，右：上面

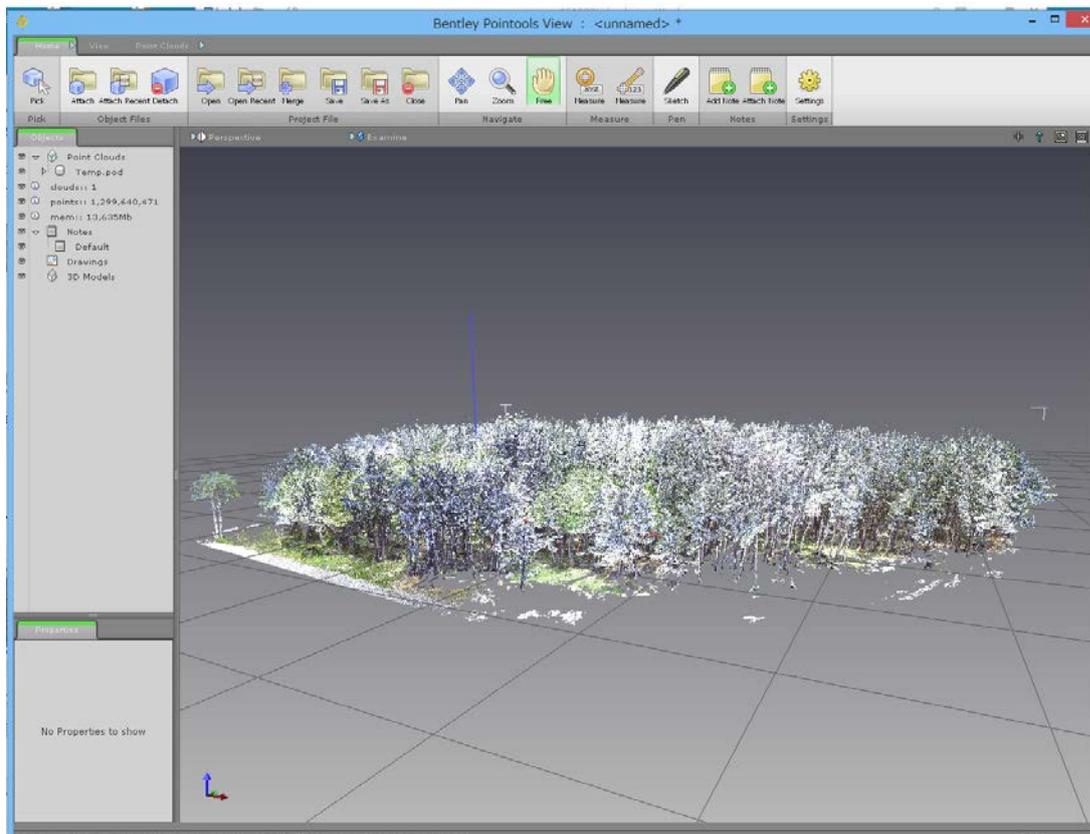


図 2.13 デジタル化された調査対象区（南東側からの視点）

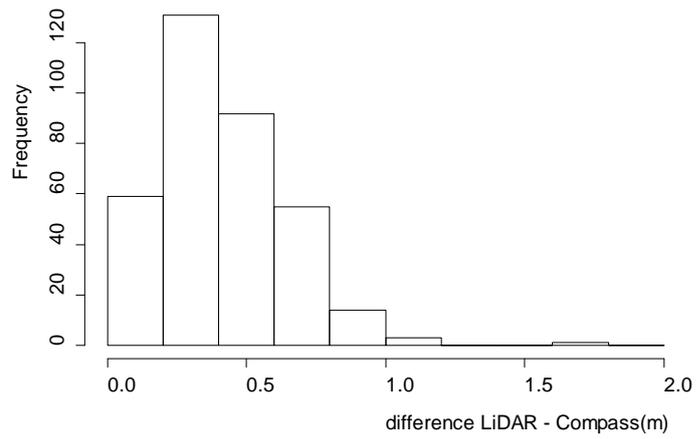


図 2.14 地上 LiDAR とコンパス測量で求めた立木位置の差の  
頻度分布

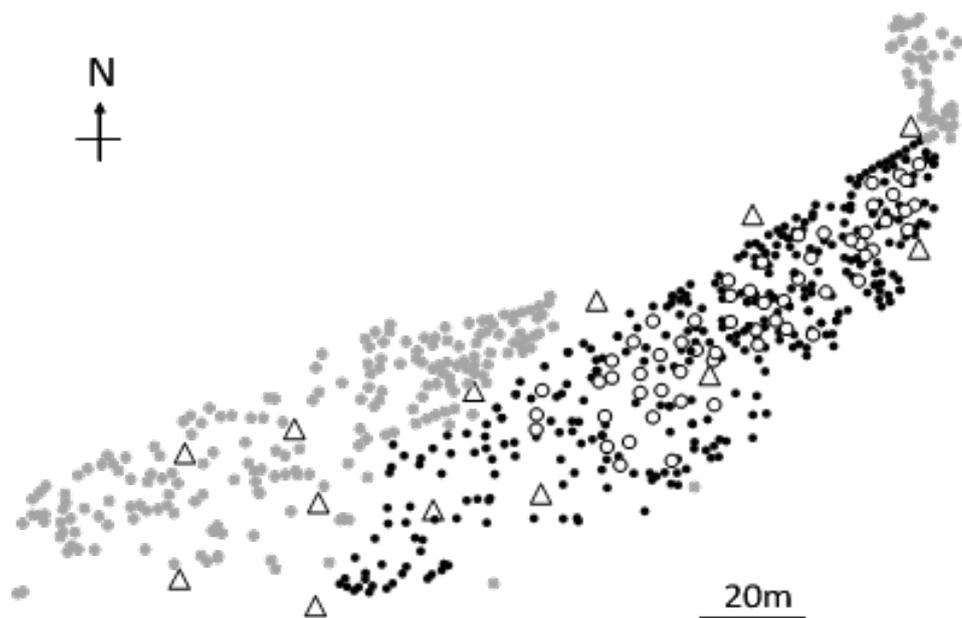


図 2.15 立木位置と 3D レーザースキャナ測定点

- : 調査区個体,
- : 肥大成長測定個体
- : 調査区外個体
- △ : 3D レーザースキャナ設置位置

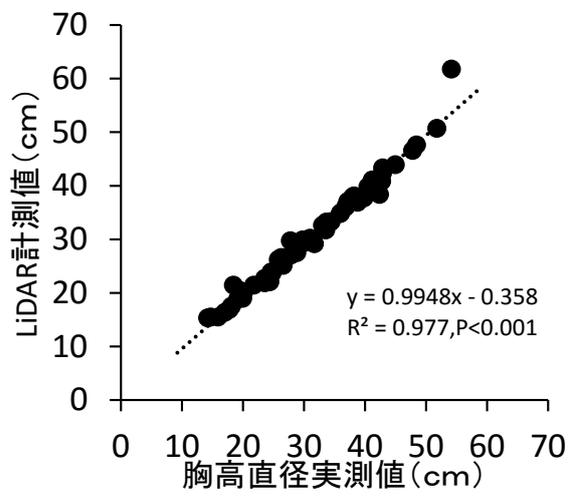


図 2.16 胸高直径の実測値と LiDAR 計測値

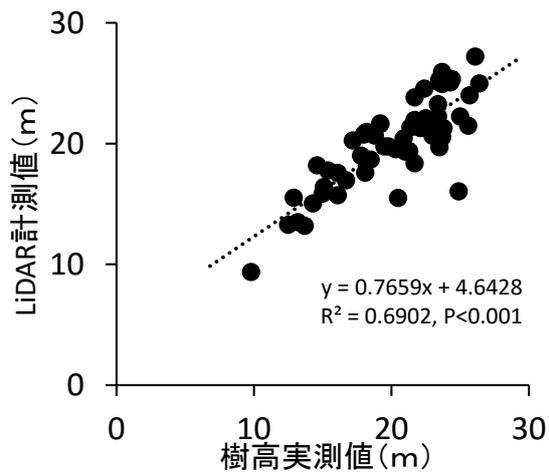


図 2.17 樹高の実測値と LiDAR 計測値

表 2.2 LiDAR 測定木の概要

	DBH (cm)	樹高 (m)	枝下高 (m)	幹材積 (m <sup>3</sup> )
平均値	30.4	20.2	14.4	0.483
標準偏差	9.9	3.7	2.8	0.347
最小値	15.3	9.4	5.8	0.056
最大値	61.8	27.2	19.5	1.846

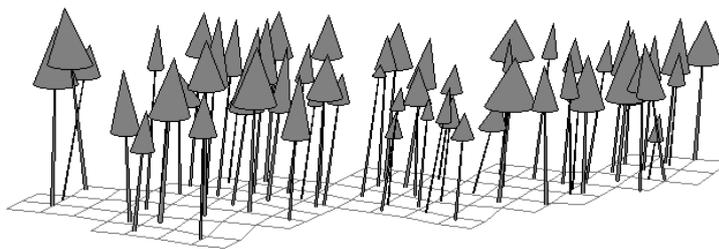
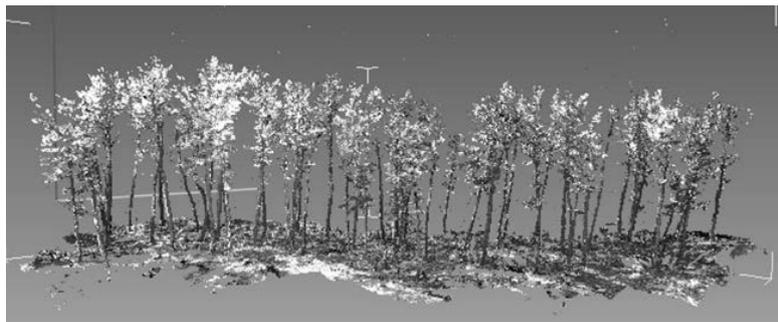


図 2.18 測定個体の鳥瞰図  
(上は LiDAR, 下は Forest Window による)

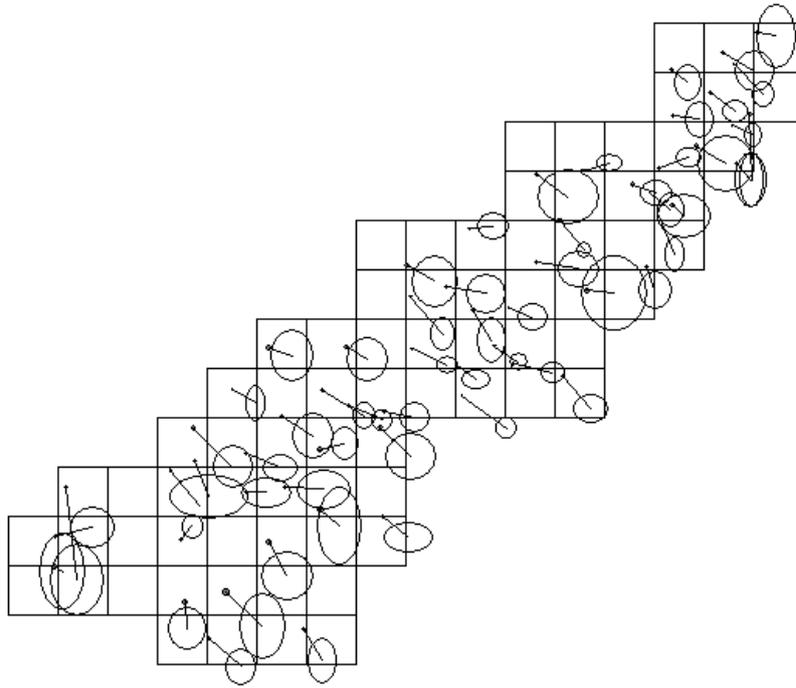


図 2.19 測定個体の樹冠投影図 (メッシュは 5m)

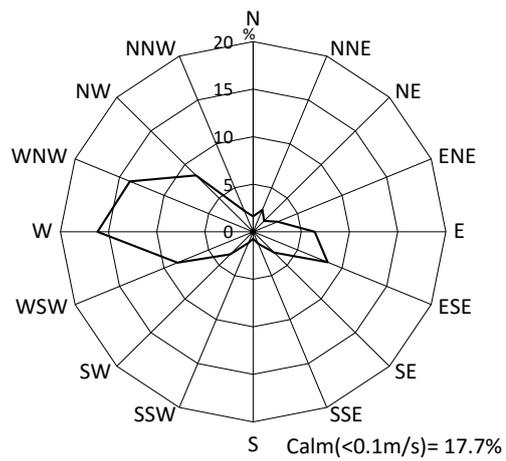


図 2.20 調査林分の風配図.  
(2014年4月～2015年3月, 10分間隔データより作成)

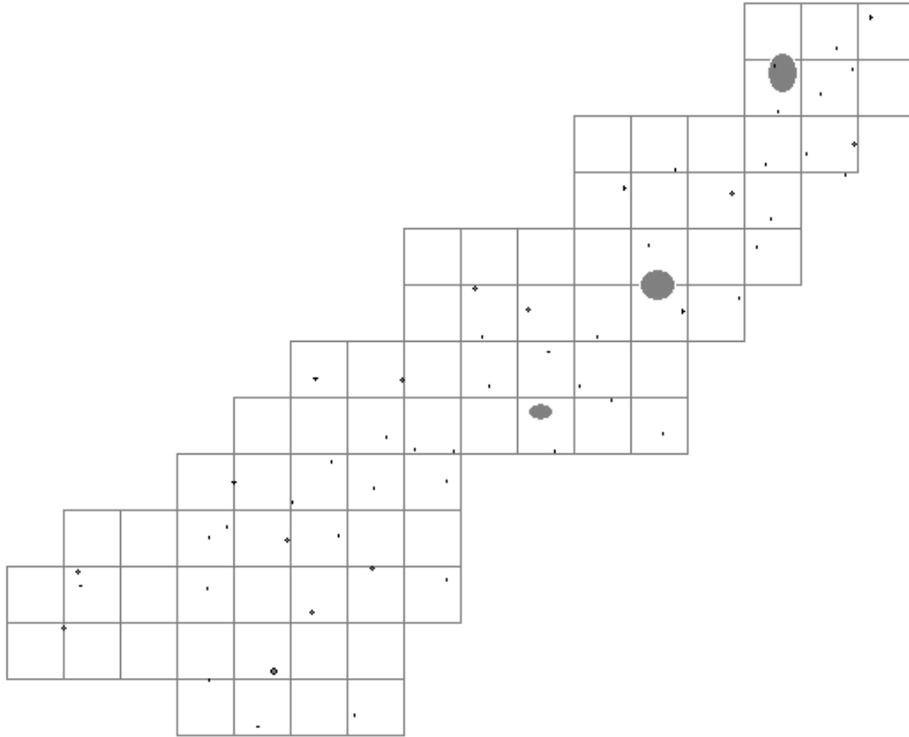


図 2.21 海面高さ 17.2m における測定木の水平断層図  
(メッシュは 5m)

### 第3章 立木の肥大成長の経過 —岩手県大船渡市吉浜地区—

本章では第2章と同じ岩手県大船渡市吉浜地区における海岸クロマツ林の肥大成長の経過を調べ、特に津波被害前後の肥大成長に着目して検討をおこなう。また、地上LiDARを用いた測定から得た樹冠形状と、胸高直径、肥大成長の関係について考察をおこなう。

#### 3.1 材料と方法

調査地は第2章と同様であるので対象地の説明は省略する。ここでは、肥大成長の経過を把握するため、調査区から各胸高直径階を含み、なるべく位置が偏らないよう59本を選定した(図3.1)。選定した個体について、2013年10月に成長バンド(アルミ板とバネによる自作)を設置し、1か月間隔で幹周囲長の増分から半径成長量を測定した(図3.2)。2014年9月に成長錐を用いて成長バンドの5cm上の部位から年輪コアを採取し、年輪幅を読み取った(図3.3)。年輪コアの採取方位は、斜面上部(北西側)から1方向である。

#### 3.2 結果と考察

##### 3.2.1 津波前後における林分の平均的な肥大成長の推移

調査個体59本のうち、2014年夏に完全枯死した1個体と、成長バンドが何らかの理由で緩んだ可能性のある(極端に成長量が高い)1個体を除く、57個体を解析対象とした。そして、肥大成長の指標として、胸高部の年輪幅(mm, 年輪コアによる)または半径成長量(mm, 成長バンドによる)を用いた。後者については、期間平均で1年当たりに換算すれば、前者と同じ指標とみなせる。

まず、2011年3月に発生した津波被害の前後4年間ずつの肥大成長量として、2007年春から2010年の秋までと、2011年春から2014年秋までの年輪幅を、年輪コアの

計測値から比較した。対応のある t 検定（片側検定，有意水準 0.05）で調べたところ， $t=-1.93$ ， $p=0.03$  で有意差が認められ，2011 年から 2014 年までの肥大成長量が低かった（表 3.1）。

津波被害により調査個体全体について肥大成長量が低下した可能性もあるものの，林齢の増加に伴う成長量の低下および密度効果の可能性も考えられる。一般に，針葉樹人工林における肥大成長量は若齢期に最大となった後，林齢の増加とともに減少する（南雲・箕輪，1990）。これはクロマツ海岸林でも同様である（増谷ら，1995；藤原ら，2007）。調査林分の優勢木（樹高上位 5 本）においても，年輪幅は若齢期である 1950 年頃には 3mm 前後と広いものの，時間の経過とともに減少し，2000 年以降には 1mm 前後となった（図 3.4）。

また，調査個体を含む調査区におけるクロマツの立木密度は 970 本/ha であり，その相対幹距は 15.3%であった。相対幹距は混み合い度指標であり，その値が低いほど混み合い度が高く（南雲・箕輪，1990），アカマツ・カラマツ林では 20%未満で自然間引きが生じる過密状態になるとされている（國崎，2014）。この基準を適用すれば，当該クロマツ林は自然間引きが常態化している超過密林であり，肥大成長は密度効果により抑制されていると推察される。実際，2007 年から 2010 年までと 2011 年から 2014 年までの半径成長量を平均年輪幅に換算すると，57 個体の平均ではいずれの期間でも 1mm 未満であった（表 3.1）。年輪幅 1mm 未満は，針葉樹人工林では一般的に成長不良と位置づけられる（増谷ら，1995；國崎，2015）。このように，林齢の増加に伴う成長量の減少に加えて，超過密状態に由来する光を巡る個体間競争の激化により，最近の平均年輪幅が狭くなっていると考えられる。そうした状況下で，2007 年から 2010 年までと，2011 年から 2014 年までの平均年輪幅の差は 0.16mm に過ぎないことから（表 3.1），調査個体を平均レベルで見ると，肥大成長減少に及ぼす津波被害の影響はほとんどないと推察される。

次に、個体集団レベルにおける最近の肥大成長特性を調べるに先立ち、年輪コアに基づく 2011 年から 2014 年までの 4 年間の年輪幅を 2 年当りに換算した値と、成長バンドによる 2014 年 3 月から 2015 年 10 月までの 2 年間の半径成長量を比較した。対応のある t 検定（両側検定，有意水準 0.05）で調べたところ， $t=-0.21$ ， $p=0.84$  で有意差は認められなかった（表 3.1）。年輪コアによる津波被害後の平均半径成長量と成長バンドによる最近 2 年間の平均半径成長量は同様の値であるため，最近の肥大成長量として成長バンドによる半径成長量を用いることとした。2014 年 3 月の胸高直径を期首胸高直径とし，成長バンドによる最近 2 年間の半径成長量との関係を調べたところ（図 3.5）， $r=0.73$ ， $p<0.001$  で有意な正の相関が認められた。

また，分位点回帰（Koenker, 2005）により半径成長量の下限の指標として 1%分位点の回帰直線を求めたところ，胸高直径 31.0cm で半径成長量が 0mm になると推定された（図 3.5）。なお，樹冠浸水個体はいずれも浸水していない個体と同様に成長しており津波被害による影響を受けていないと推察される。

### 3. 2. 2 津波前後における各個体の肥大成長量の推移

前節では津波前後数年間の林分の平均的な肥大成長量について論じたが，本節ではさらに詳細に個体の肥大成長を年度別に検討する。

図 3.6 に成長バンドによる直近 2 年間（2014，2015 年）の胸高直径の変化について 2 個体を例として示す。いずれも肥大成長は 5 月頃に開始され，その後急激に成長した後，9 月頃に成長速度が低下し，再度 11 月頃までわずかに成長する。大畠ら（1977）によると京都のクロマツの肥大成長の季節変化も，成長開始時期と夏の成長停止時期が 1 か月程度早いものの，同じように年 2 回の成長期が認められることを報告しており，クロマツの一般的な肥大成長特性と考えられる。2014 年と 2015 年の年肥大成長量は，それぞれ No95 が 0.158cm，0.247cm，No213 が 0.108cm，0.227cm と 2015 年の成長量が大きくなっていた。測定した 57 個体について，津波後の各年における年肥

大成長量を被災前の値と比較した。成長バンドによる測定値は 2014 年、2015 年だけであるため、それ以前の肥大成長については、年輪コアによる年輪幅を用い半径成長量に換算して震災前 3 年間（2008～2010 年）の平均値と比較した（図 3.7）。なお、測定個体の中には、測定期間中ほとんど成長がみられなかった個体があり、2014～2015 年の 2 年間で半径成長が 0.02mm 以下の個体（8 個体）は除いた。図中の点線は 1:1 のラインを示しており、点線より上に散布する個体は震災前よりも大きな成長量を持つ個体である。図より震災 3 年後の 2013 年に震災前に比べ成長量が低下する個体が増加している傾向がみられた。一方で 2015 年は、それ以前にくらべ肥大成長量が良くなっている個体が明らかに増加していた。また、測定方法が成長バンドにかわった 2014 年以降の値をみても、2014 年にくらべ 2015 年に肥大成長量が増大している個体が多くなっていることが明らかであった。年輪幅と気象の関係について、様々な地域、樹種で多くの研究がおこなわれており、降水量（高橋，1977；野堀，1994；藤原，1997；など）、気温（野堀，1991；野堀 1994；藤原，1997 など）の影響が認められているが、影響がある気象要因とその時期は、研究により前年、当該年を含め、異なった結果がえられている場合が多い。野田（2006）の総説によると、早春の気温が正の寄与を示すことが多くの結果で共通しているとされる。Nabeshima et al.（2015）は、ミズナラで春先の気温が早材部の発達を通して個体の肥大成長を左右することを指摘している。大船渡気象観測所の過去の気象データを調べたが欠測などもあり、本研究でははっきりした関係を示すことはできなかった。

気象要因以外に、クロマツは規定芽を前年のうちに形成するため、環境要因の影響が翌年以降あらわれる事が指摘されている（畑野・佐々木，1987）。また、高齢個体ではサイズが大きいため、浸水ストレスによる生理活性の低下が肥大成長に現れるまで時間がかかることもありえる。この点に関しては、今後さらに研究を進める必要がある。

### 3. 2. 3 調査区内における 2015 年の個体肥大成長量と樹冠幅

図 3.8 に測定個体の 2014 年と 2015 年の半径成長量と LiDAR によって測定した樹冠幅（2014 年 5 月）について、調査区内の分布を示す。また、2014 年と 2015 年の半径成長量の差をわかりやすく示すため、両者の半径成長量の差を計算し、同様に図 3.9 に示す。図 3.8 より、肥大成長量大きい個体（大きな塗りつぶし赤丸）は、特に 2015 年で顕著であるが、測定個体群（赤）の南側、中央、北部付近の 3 カ所に集中する傾向がみられる。2015 年に成長量が増加した個体も同様である（図 3.9）。クロマツは過湿に弱い樹種であり地下水位が高い立地では成長不良となる（小田，2001）。しかし、本調査区は、中央部分が多少凹状ではあるが傾斜はゆるやかで、北側は調査区内でもっとも海面高が高い部位である。調査地の土壌は花崗岩を母材としており（図 2.3）水はけは良好であったため、地下水位以外の立地の影響があるものと考えられる。一方、肥大成長量大きい個体および 2015 年に増加した個体は大きな樹冠幅（赤線による円）を持つものが多いが、大きな樹冠幅でありながら肥大成長量小さい個体もあり、関係は複雑と思われる。

### 3. 3 小 括

当初、津波被害の影響は何らかの形で肥大成長に影響を及ぼしていることを想定していたが、今回の調査では林分の平均レベルでみた場合、肥大成長量に津波の影響は認められないことが明らかとなった。また、現在の肥大成長量は胸高直径と正の相関関係があることがわかった。すなわち、津波被害後も肥大成長は継続しており、胸高直径の大きな個体ほど肥大成長が大きい傾向があり、健全性の低下は小さいと考えられた。

当該クロマツ林は超過密状態にあることから、クロマツ林の健全性を高めるにあたり、今後、間伐を実施するのであれば、肥大成長の持続が期待される胸高直径 31cm 以上の個体を中心に残存木を選定していくのが良いと考えられる。一方で、個体別にみた

場合，胸高直径が大きくても相対的に肥大成長量が小さい個体，またその逆のパターンの個体があった。それぞれの林内の位置を調べたところ，肥大成長量の大きな個体が場所によって集中している傾向が認められ，立地の影響が示唆された。

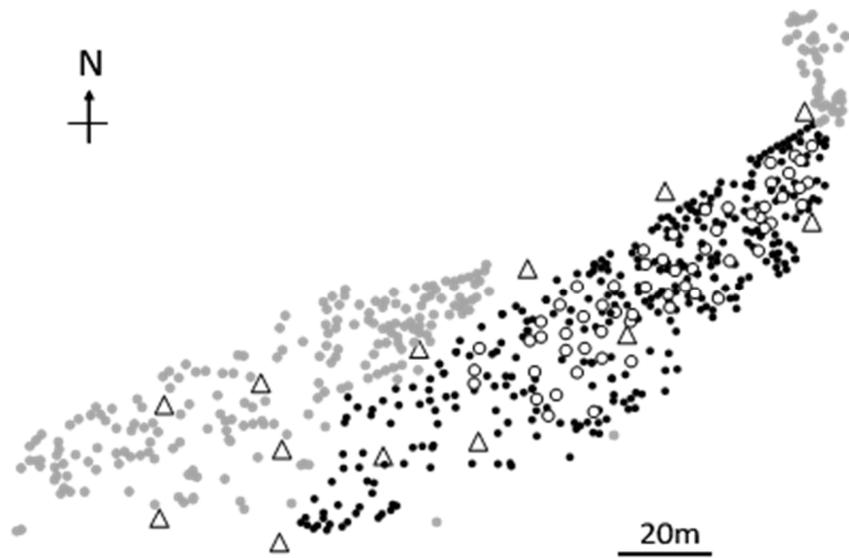


図 3.1 立木位置と 3D レーザースキャナ測定点

- : 調査区個体
- : 肥大成長測定個体
- : 調査区外個体
- △ : 3D レーザースキャナ設置位置

※本図は，図 2.15 と同じものである



図 3.2 成長バンドによる肥大成長の連続測定



図 3.3 年輪コアによる肥大成長経過の測定

表 3.1 津波被害前後の胸高部平均年輪幅

調査方法	調査期間 (年)	平均(mm)±標準偏差 (SD)
年輪コア	2007～2010	0.83±0.57
年輪コア	2011～2014	0.67±0.56
成長バンド	2014～2015	0.66±0.53

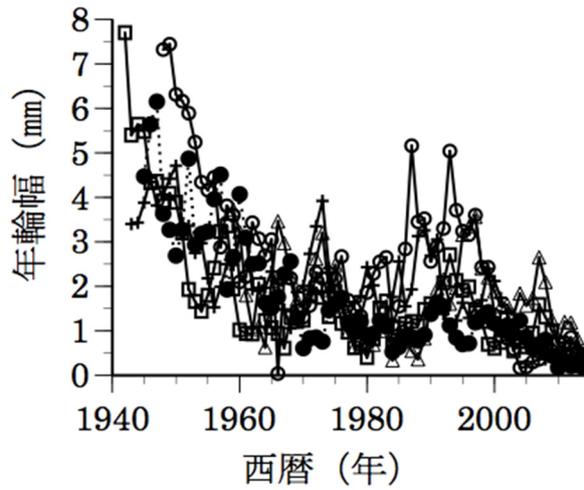


図 3.4 優勢木 5 本における胸高部年輪幅の経年変化

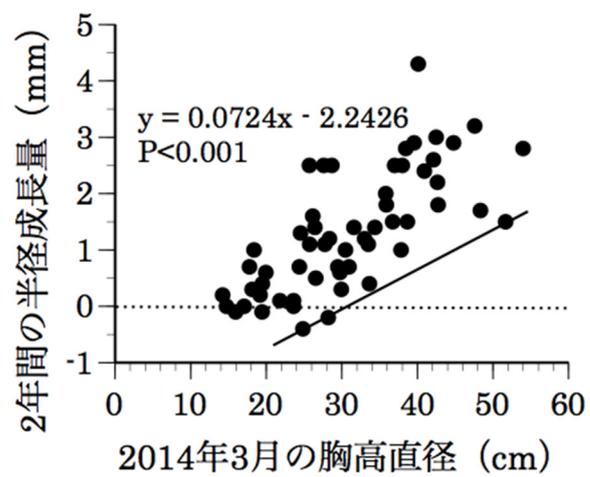


図 3.5 期首胸高直径と最近の胸高半径成長量の関係.  
 (点線は成長量 0mm を, 実線は 1%分位点の回帰直線を表す)

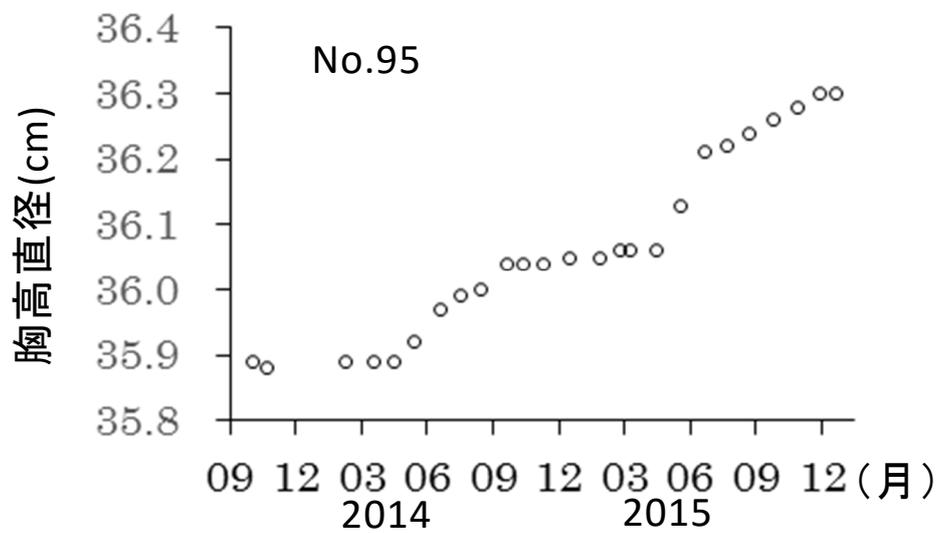
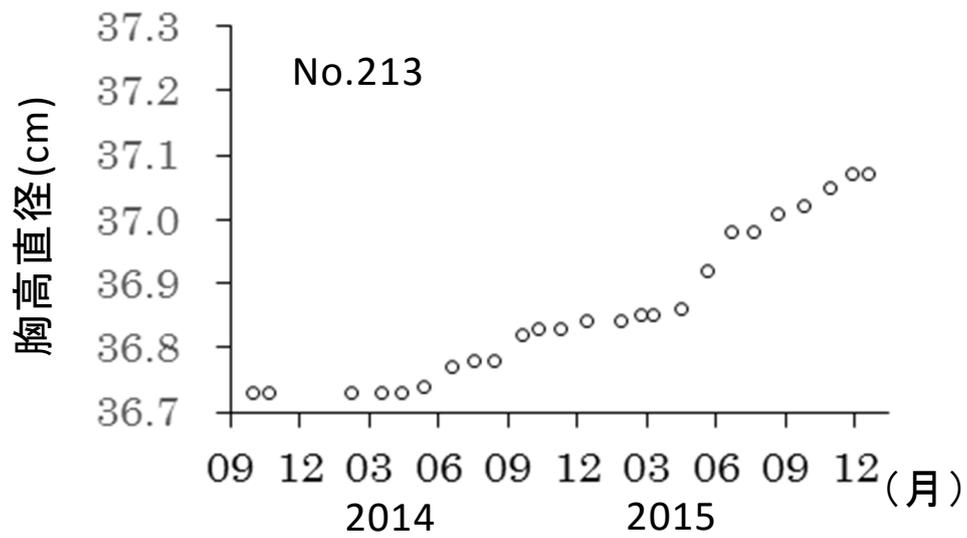


図 3.6 成長バンドによる直径成長の例

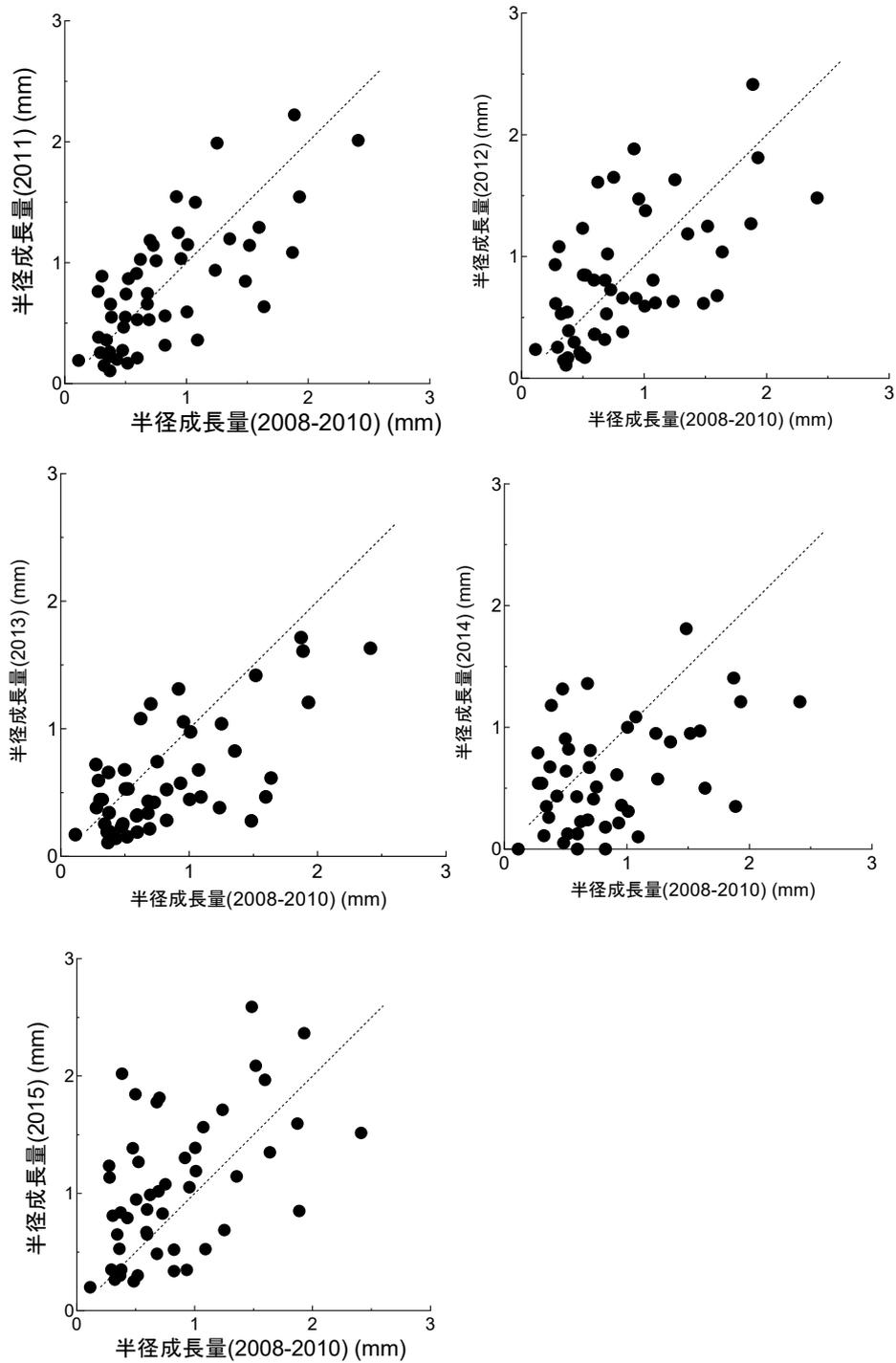


図 3.7 震災前胸高部位半径成長量に対する 2011~2015 年の成長量  
 (2014-2015 にかけて成長量<0.02mm の個体を除く。実線は 1:1  
 の直線)

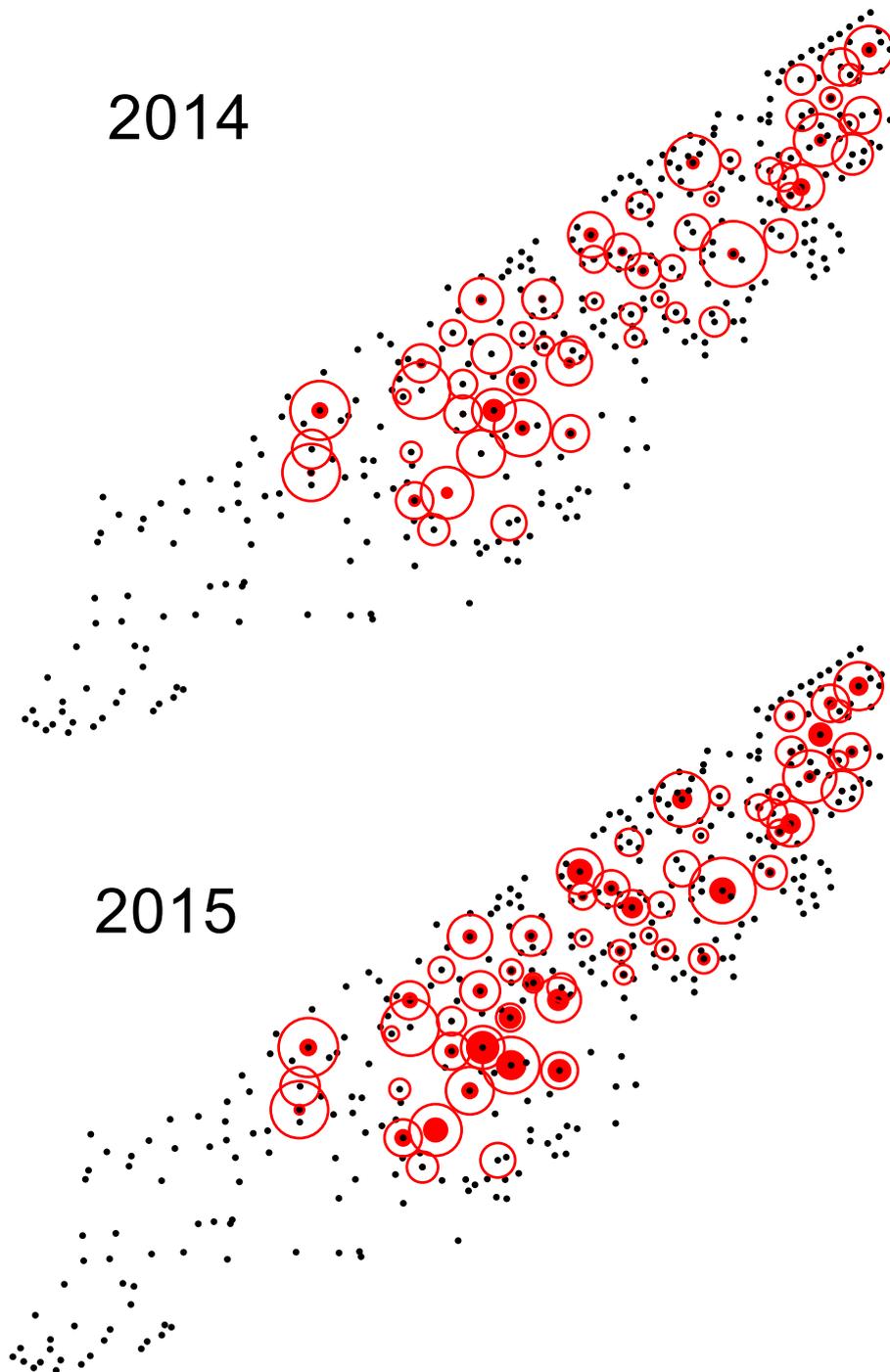


図 3.8 調査区の胸高部位半径成長量と樹冠幅

赤点はそれぞれの年の半径成長量に比例，赤丸は樹冠幅（2014年5月測定）に比例。黒点は測定木以外の個体を表す。

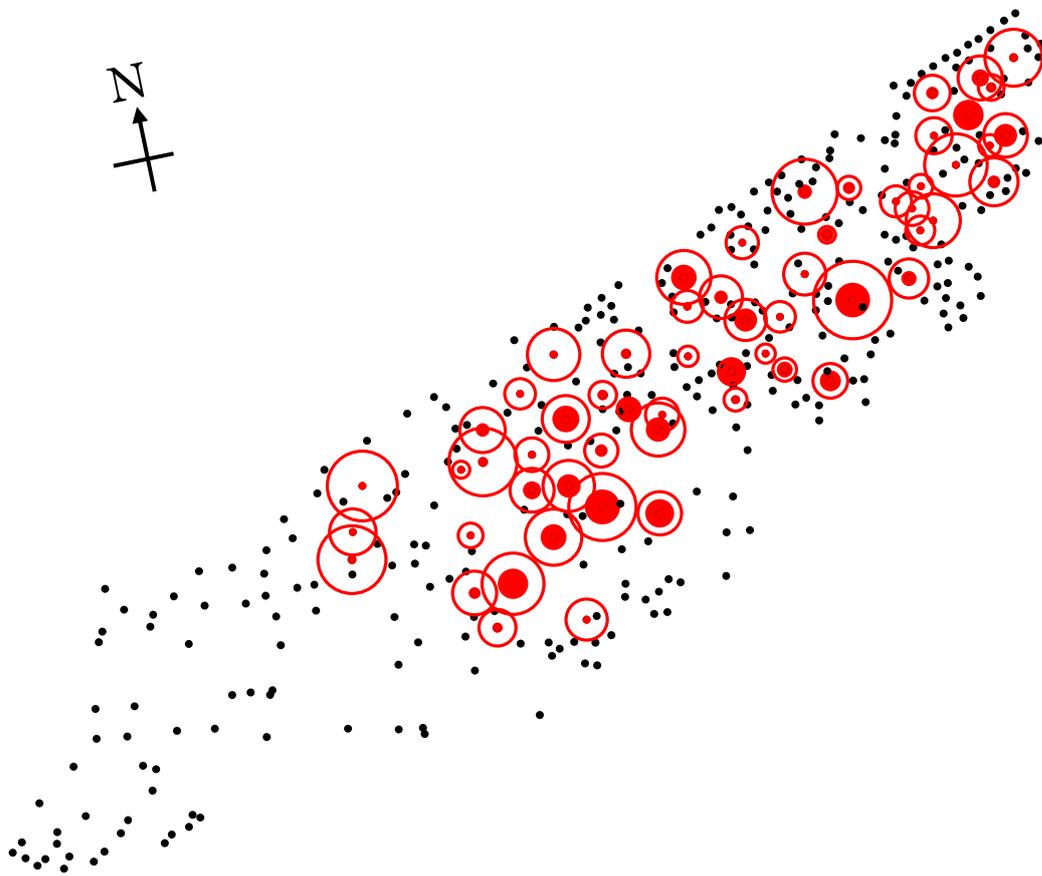


図 3.9 2014 年に対する 2015 年の胸高部位半径成長増加量と樹冠幅

赤点は 2014 年と 2015 年の半径成長量の差に比例（大きいほど成長が増加していることを示す），赤丸，黒点は図 3.8 と同様。

## 第4章 高齢クロマツ林における樹冠形態と肥大成長

### －青森県八戸市市川地区－

大船渡市吉浜地区以外の残存海岸林として、青森県八戸市市川地区の残存高齢クロマツ林で成長錐による肥大成長経過を調べた。また、樹冠形状として、地上からの観測による従来通りのやり方で、樹冠幅、樹冠長および葉密度の測定をおこない、それらの樹冠諸量が肥大成長量におよぼす影響を調べた。さらに、林分内各個体の肥大成長を標準化し、林分全体の肥大成長の推移を検討した。

#### 4.1 調査地と調査方法

##### 4.1.1 調査地

本研究は、青森県八戸市市川町のクロマツ防潮林でおこなった（図 4.1）。調査地を含む林分では津波直後に坂本ら（2012）によって被害の調査がおこなわれている。それによると、被災前の海岸林は、延長約 3km、林帯幅は 100～350m であり、昭和三陸津波（昭和 8 年）直後に国の補助事業によって潮害防備林として造成したとされている（若江，1961）。津波の高さは 3～4 m 程度、海岸林を通過した津波の浸水高も 3～4 m 程度であった。林帯の背後は住宅地となっており、地上 3.3 m まで浸水したが、流失した家屋はなかった。この海岸林は、市川船溜の近くの海側林縁を除いてほぼ原形をとどめた状態が残ったが、北側を中心にクロマツの赤枯れが被災当年に発生しており、2014 年 4 月の調査開始時には海側の低地において一部クロマツの枯死がみられた。

2014 年 5 月に調査区を設定した。調査区の大きさは 30m×50m で、市川船溜まりから約 500m 程度の場所に位置しており、林分の中では後背地に近い場

所であった。下草が繁茂しており，ヤナギ類，ニワトコ，ツタウルシがよく見られた（図 4.2）。土壌は深さ 120cm 程度まで典型的な砂質土であり，津波による堆積土砂は 10cm 程度，地下水位は 90～110cm であった（図 4.3）。

#### 4. 1. 2 調査方法

調査区を設定後，直径巻尺により胸高直径，超音波式測高器により樹高を測定し，デジタルコンパス（Impusle200，レーザーテクノロジー社）で周囲測量と毎木位置図を作成した。林分の概要を表 4.1 に，胸高直径と樹高の頻度分布を図 4.4，立木位置図を図 4.5 に示す。

樹冠の計測は，全立木について，樹冠底高，樹冠幅，葉密度を測定した。樹冠底高は，樹冠の輪郭を形作り，かつ樹冠葉群が著しく不連続とならない最下層の生存枝の高さを超音波式測高器で測定した。樹冠幅は，樹冠を真下から見上げ，最大幅と最小幅を測定し，両者の平均樹冠幅を求めた。葉密度については，目視により 3 段階で評価した（図 4.6）。測定は，2014 年 11 月に実施した。

肥大成長経過を調べるため，2014 年 8 月に成長錐を用いて，調査区内の全個体からコアを採取した（図 4.7）。採取した年輪コアは，木工用ボンドで添え木に貼り付けて固定し，年輪を読み取りやすくなるよう表面をカンナがけした。その後，スキャナによって画像をパーソナルコンピュータに取り込み，年輪測定ソフト（DendroMeasure）を用いて年輪幅を測定した（図 4.7）。なお，年輪コアは 2 方向から採取し，平均値を用いた。

年輪コアからえられた年輪幅の時系列変化は，個体サイズや個体の立地間差を反映し，そのままでは林分全体の傾向を捉えづらい。そのため，本研究では 3 次スプライン関数を用いて年輪幅の時系列変化から傾向曲線を作成し，推定された年輪成長幅に対する実際の値の比をとることで年輪成長幅指

数を求めた（図 4.8）。使用したスプライン関数のフィルターは、 $0.67 \times$ 年輪数 $\times 0.5$ である。これらの計算は、統計ソフト R3.1.2（R core Team, 2013）の dplR パッケージ（Bunn, 2008）でおこなった。また、他の統計計算も同じ R を使用した。

## 4. 2 結果と考察

### 4. 2. 1 樹冠パラメーターと胸高直径

樹冠を表すパラメーターとして、平均樹冠幅、樹冠長、葉密度を用い、胸高直径に及ぼす影響を調べた。胸高直径を従属変数、各樹冠パラメーターを独立変数として、ダミー変数を用いた重回帰分析をおこなった。さらに赤池情報量規準（AIC）を用いたモデル選択をおこなった。その結果、平均樹冠幅と樹冠長のモデルが選択された（AIC：237.5）。胸高直径とそれぞれのパラメーターの散布図を図 4.9 に、要素間の相関係数を表 4.2 に、選択された重回帰モデルの回帰係数について表 4.3 に示す。選択されたモデルの回帰係数、また図 4.9 から明らかなように、樹冠幅が胸高直径に大きな影響を与えていた。一般に、樹木の成長は樹冠葉の光合成によっておこなわれるため、個体の葉量が間伐木の選定の際の判断要素となる（四手井, 1963）。高齢林の取り扱いの際、着葉量の指標として樹冠長率が用いられる事が多い（藤森, 2006; 千葉, 2009）。國崎ら（2014）は、アカマツの葉量を目視で指数化し、地上部サイズ指標との関連性を調べた結果、若齢林では樹冠長率が説明変数のひとつとして選択されたが高齢林では選択されなかった。また、正木ら（2011）は、140年生のアカマツの胸高直径成長量に地上部サイズ指標の関係が小さい事を示している。島田（2011）は、三重県の高齢スギ・ヒノキ林で、着葉量指標のひとつとして樹冠幅が利用できることを示している。本林分は海岸クロマツ林としては成熟した高齢林であり、樹冠長よりも樹冠幅が

個体葉量に影響が大きいのではないかとと思われる。

#### 4. 2. 2 高齢クロマツ個体の肥大成長の推移

この林分は植栽して以来特に施業がおこなわれた訳ではないため、高密度状態のまま推移してきたと考えられる。被圧により肥大成長が停止した個体が存在した場合、その停止年がわからないと各年輪がいつ形成されたかが判断できない。そこで、採取したコアのうち、髄を含んでいる試料について、胸高直径と年輪数の関係を調べた（図 4.10）。図より、胸高部位における最大の年輪数は 75 年と推定された。しかし個体によっては、年輪数が 20 年以上少ないものがあり、成林後に天然更新によって新たに発生したと思われる個体や、すでに肥大成長停止が生じたと思われるものもみられた。そこで各個体の胸高に達した年数は不明であるが、一般的なクロマツの成長からみて 5 年とし、70～75 年の年輪数を持つ 30 個体を対象に、造成後現在まで成長停止がないものとして解析をおこなった（図 4.10 点線より上の個体）。選んだ 30 個体について、樹冠幅と胸高直径の関係を図 4.11 に示す。両者には有意な相関がみられた。図 4.10、図 4.11 より、成長停止がなかった個体であっても、胸高直径は 24～46cm、樹冠幅は 1.2～5.5m と様々なサイズがあった。そこで今回は、樹冠幅の中央値 3.5m を境に樹冠幅が大きいグループと小さいグループに分けた（図 4.11）。それぞれの年輪幅指数の時系列変化をグループごとに平均し、標準化年輪曲線を作成した（図 4.12）。標準化年輪曲線は、個体の大小や被陰などの個体間差による要因を除いた、相対的な年輪成長幅を表す。図 4.13 は、両者の比較をするため、図 4.12 を重ねて示したものである。植栽後、両者はほぼ同調していたが、林齢 45～55 年頃に増減がずれる傾向がみられた。この時期は樹冠閉鎖の時期に相当し、競争による密度効果が生じたと考えられ、間伐等の保育作業をおこなう必要があるこ

とを示している。

図 4.13 において、震災前後の標準化年輪曲線の変化をみると、両グループとも震災があった 2011 年以降は肥大成長が低い傾向を示していたが、減少傾向は 2009 年に始まっており、必ずしも震災による浸水の影響とは言いきれない。震災前後の肥大成長量の変化をさらに詳しく調べるため、図 3.7 に示した吉浜地区と同様に、半径成長量について震災前 3 年間（2008～2010 年）の年平均値と 2011 年から 2013 年の関係を図 4.14 に示した（赤丸が市川地区）。なお、2014 年の値に関しては、8 月に年輪コアを採取したため示していない。2011 年に比べ、2012 年、2013 年は、ほとんどの個体が震災前の肥大成長量を下回っており、この低下に浸水の影響が関与していると仮定すると、市川地区では、肥大成長に浸水の影響が生じるのは翌年以降であったことを示唆している。浸水は成長開始前の 3 月に発生しているが、両地区とも浸水当年の低下は小さく、その影響は次年度以降現れると考えるのはよいのではないか。吉浜地区では、肥大成長の低下は市川地区よりも 1 年遅い 2013 年からであった。この違いが両林分の立地の違いを反映している可能性が考えられるが、図 4.13 に示した現在までの肥大成長のトレンドから長期的な変動を考慮する必要があるため、現時点では詳しく論じることはできない。今後さらに肥大成長経過を追跡して調べていく必要がある。

#### 4. 3 小 括

大船渡市吉浜地区以外の残存海岸林として、青森県八戸市市川地区の残存高齢クロマツ林で樹冠諸量と胸高直径の関係を調べた。胸高直径を従属変数、樹冠幅、樹冠長、葉密度を説明変数としてダミー変数を使った重回帰分析をおこなったところ、樹冠幅、樹冠長のモデルが選択され、特に樹冠幅の影響が大きかった。そこで、樹冠幅が大きい個体と小さい個体に分け、過去の肥大成長量

について、相対的な肥大成長量をあらわす標準化した年輪幅指数を求め、それぞれの平均値の時系列変化を調べた。その結果、植栽後、両者はほぼ同調していたが、林齢 45～55 年頃に、増減がずれる傾向がみられた。この時期は樹冠閉鎖の時期に相当し、競争による密度効果が生じたと推察され、間伐等の保育作業をおこなう必要があることを示している。震災前後の肥大成長量は、市川地区では震災翌年の 2012 年に低下している傾向がみられた。しかし、標準化年輪曲線の経過をみると、両者とも 2009 年頃から低下しており、2011～2013 年にかけてもその傾向の延長線上であったため、津波による影響と判断するのは注意が必要だと考えられる。



図 4.1 調査林分の位置



図 4.2 調査林分の近景



図 4.3 調査林分の土壌断面（下部に滞水がみられる）

表 4.1 調査林分の概要

本数 (本)	平均樹高 (m)	平均胸高直径 (cm)	平均形状比	本数密度 (本/ha)
108	22.41	31.27	74	720

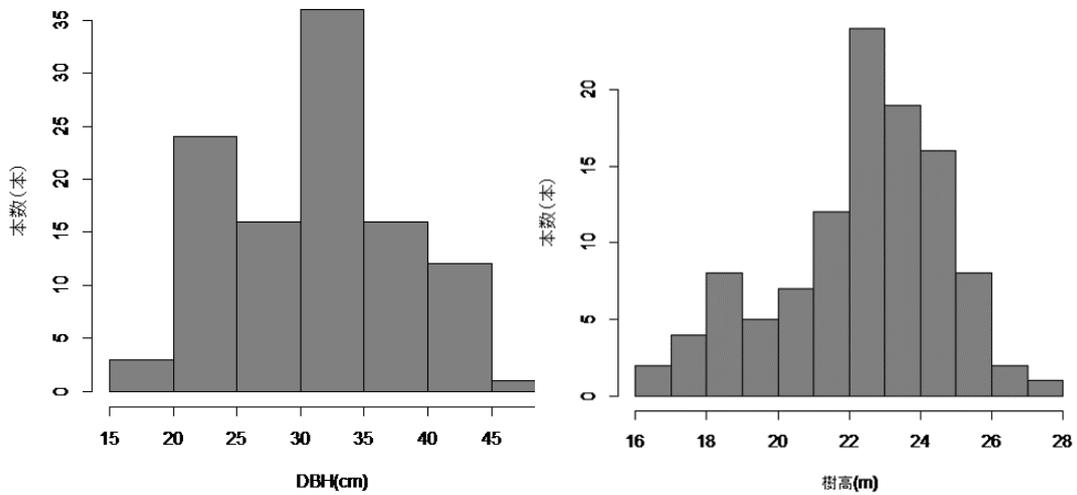


図 4.4 胸高直径と樹高の頻度分布

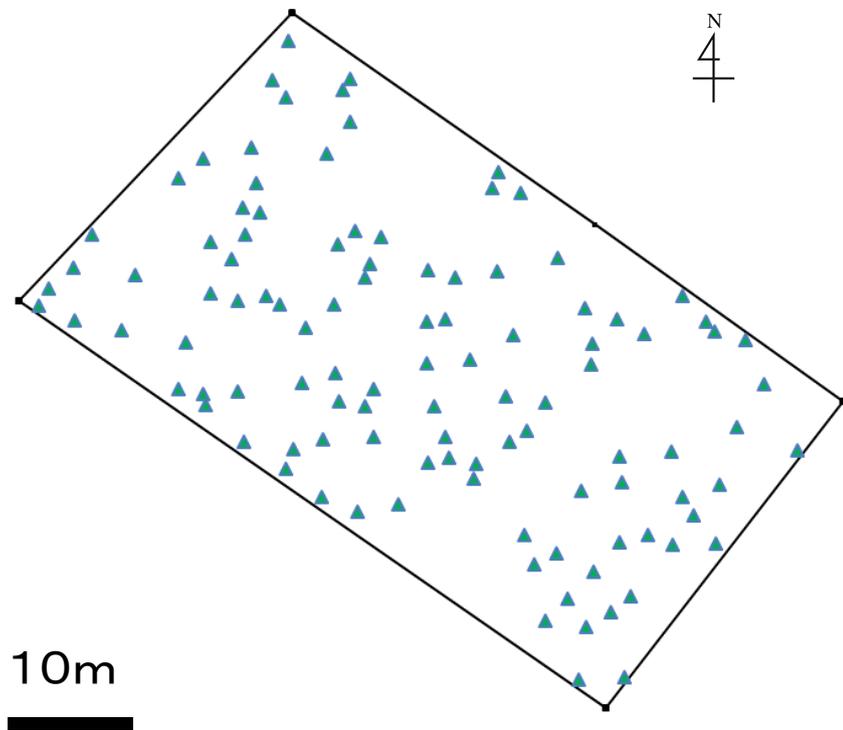


図 4.5 立木位置図



葉密度 3



葉密度 2



葉密度 1

図 4.6 葉密度の判定の例

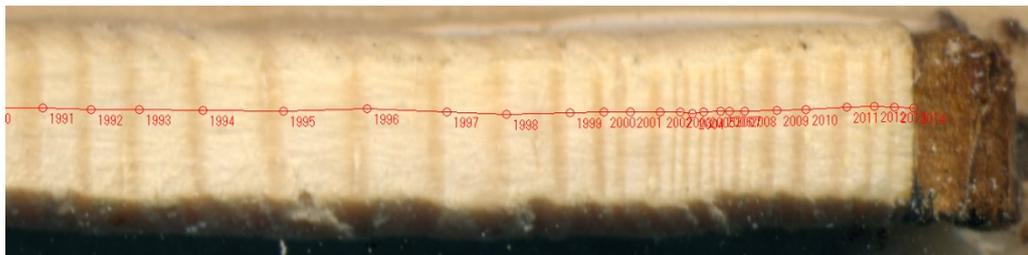


図 4.7 成長錐による年輪コア採取と DendroMeasure による年輪幅測定

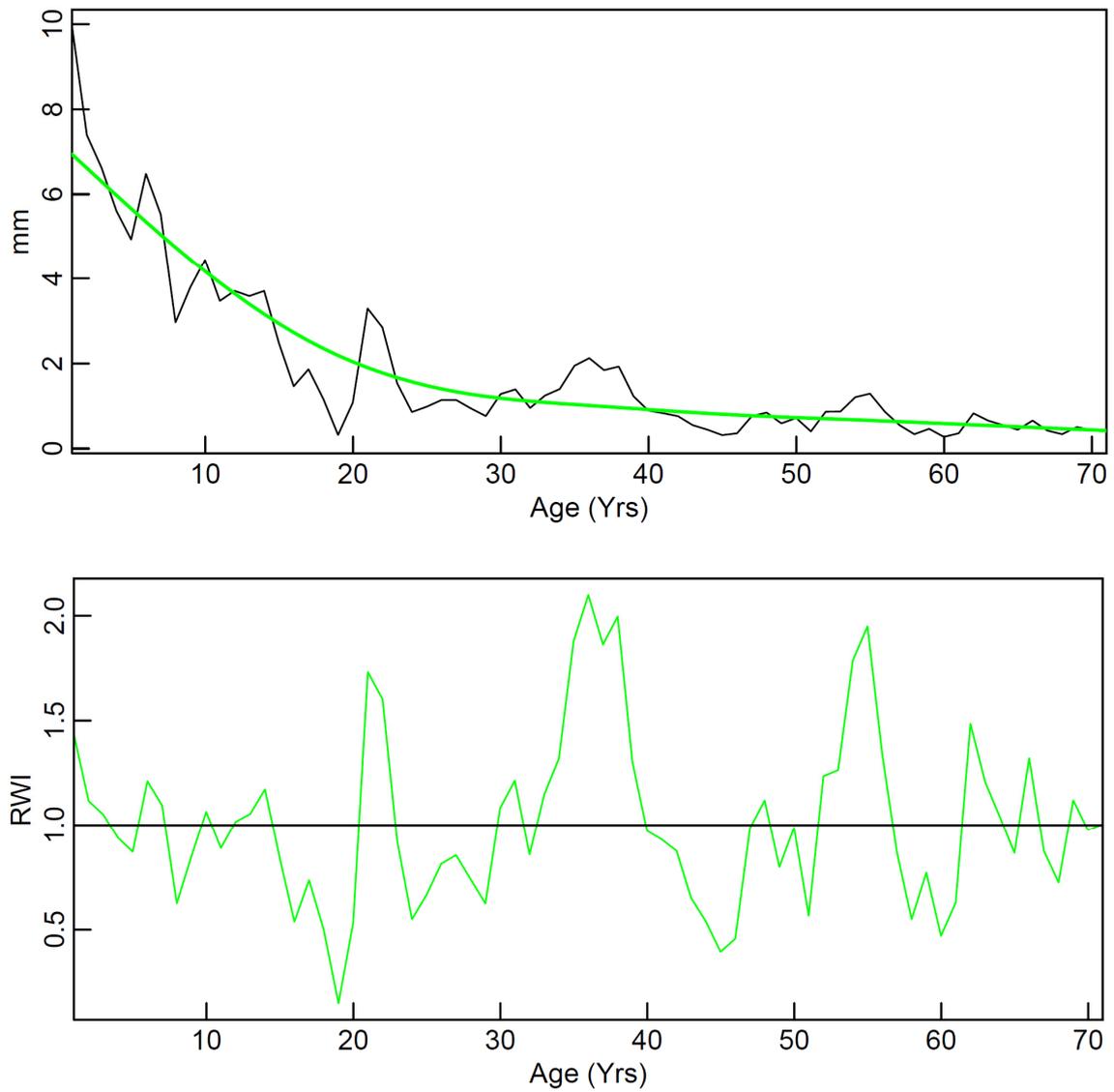


図 4.8 年輪幅の標準化

上図：年輪幅の経時変化，緑線はあてはめたスプライン曲線

下図：標準化された年輪曲線 (RWI)

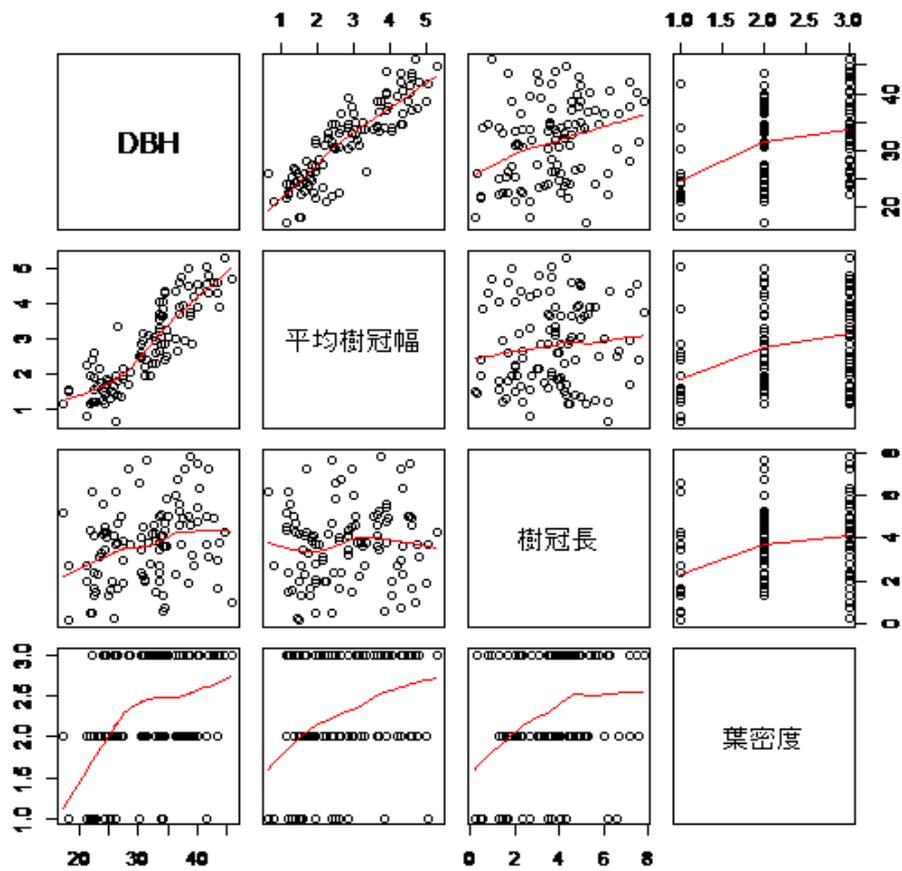


図 4.9 胸高直径と樹冠形状パラメーターの散布図  
 (図中の線は平滑化曲線)

表 4.2 要素間の相関係数

	胸高直径	平均樹冠幅	樹冠長	葉密度
胸高直径	—	0.88	0.28	0.4
平均樹冠幅	0.88	—	0.1	0.32
樹冠長	0.28	0.1	—	0.27
葉密度	0.4	0.32	0.27	—

表 4.3 選択されたモデルの回帰係数

従属変数	標準偏回帰係数	標準誤差	t値	P値
平均樹冠幅	0.85798	0.04415	19.432	2E-16***
樹冠長	0.19177	0.04415	4.343	3.35e-05***

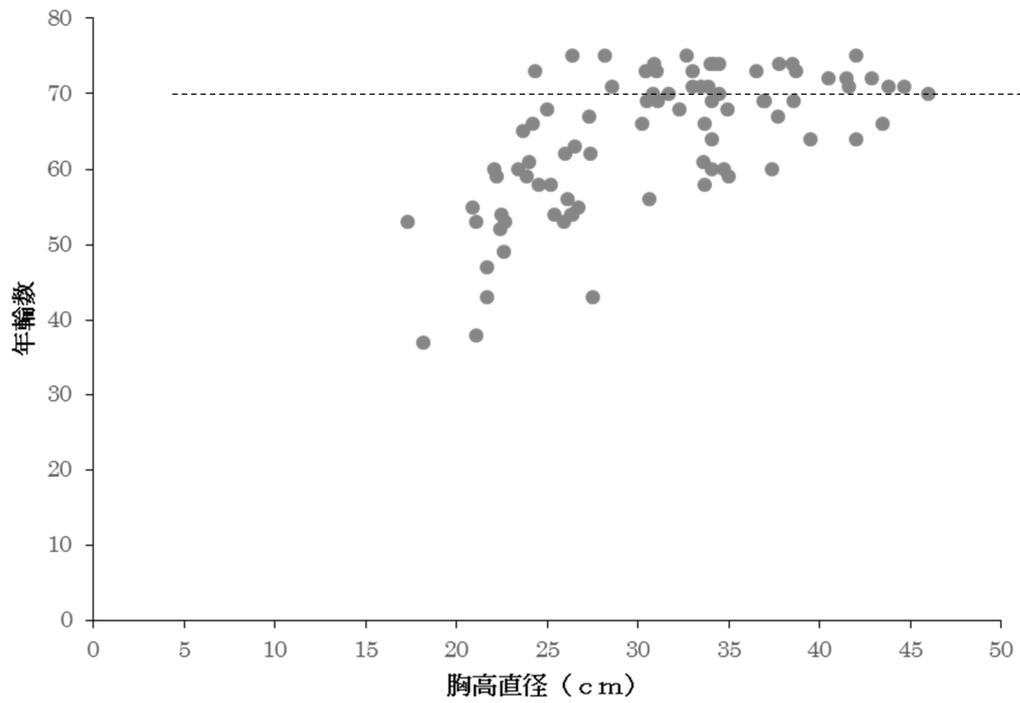


図 4.10 胸高直径と年輪数

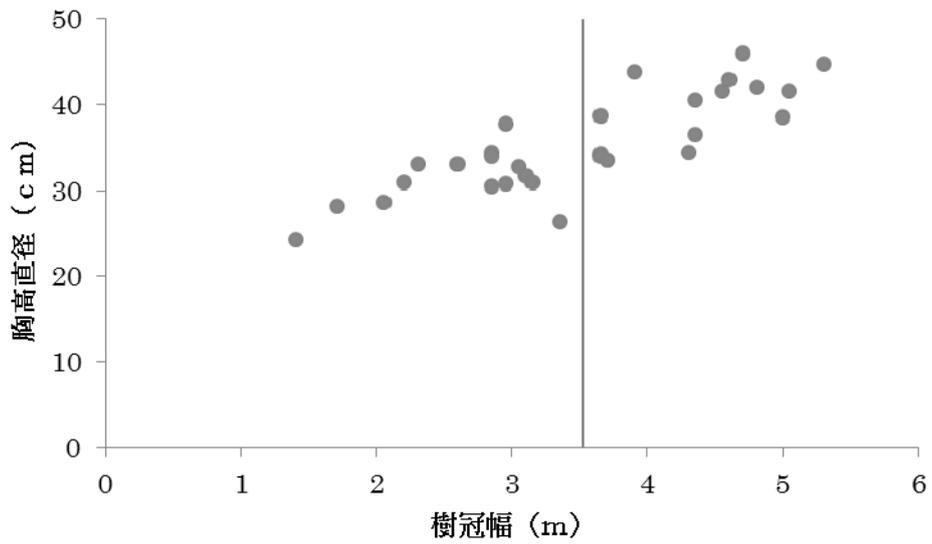


図 4.11 成長継続個体 (n=30) の樹冠幅と胸高直径の関係  
縦線は樹冠幅の中央値 (3.5m) を示す

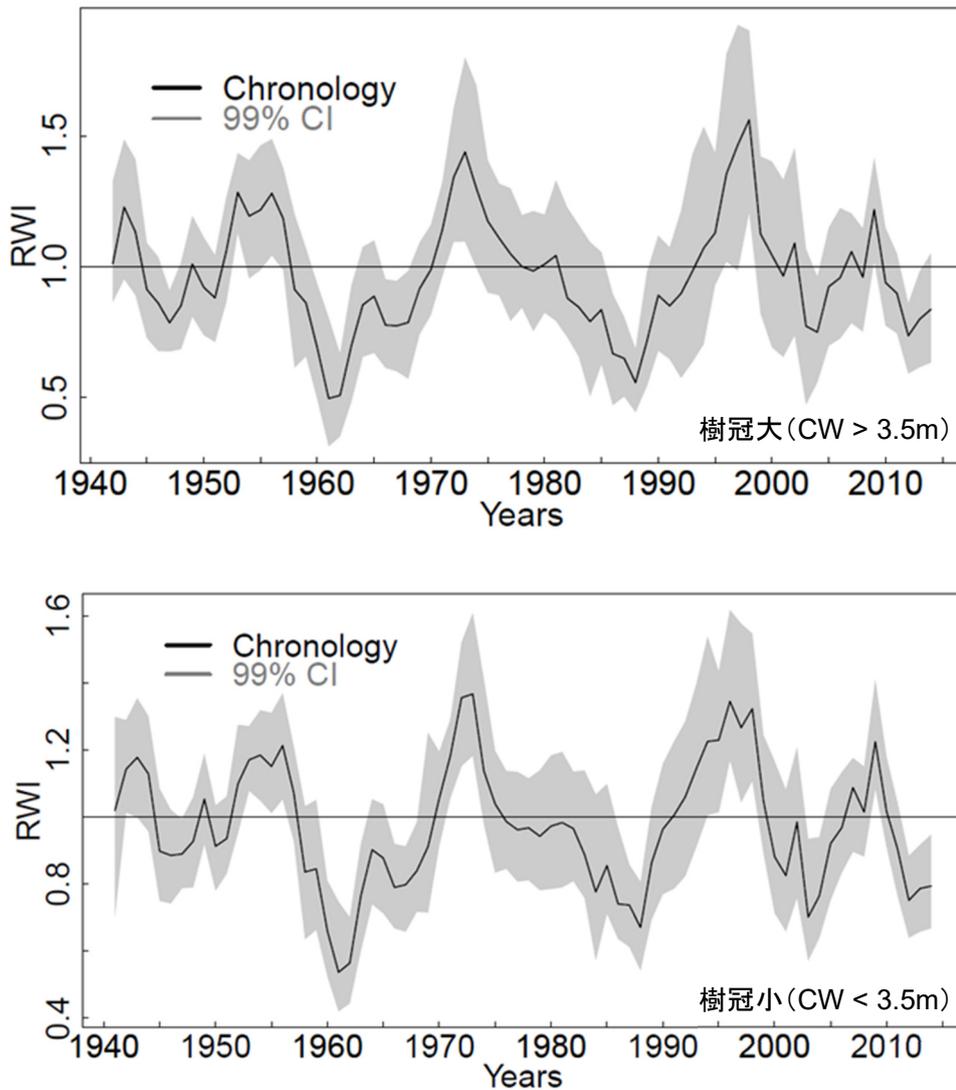


図 4.12 樹冠幅が大きい個体と小さい個体の標準化年輪曲線  
 個体数はそれぞれ n=15。網掛け部分は、ブートストラップ法  
 による 99%信頼区間を示す。

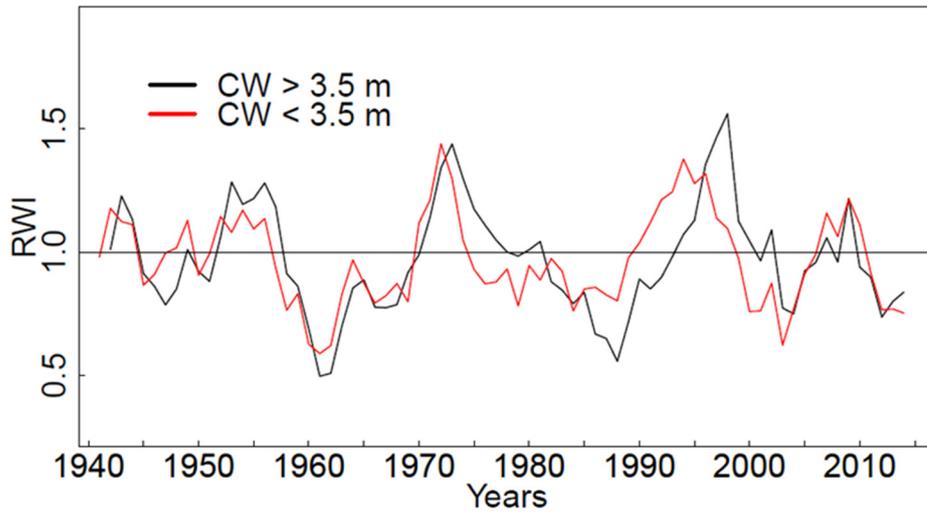


図 4-13 樹冠幅別の標準化年輪曲線  
 (図 4.12 を重ね書きしたもの)

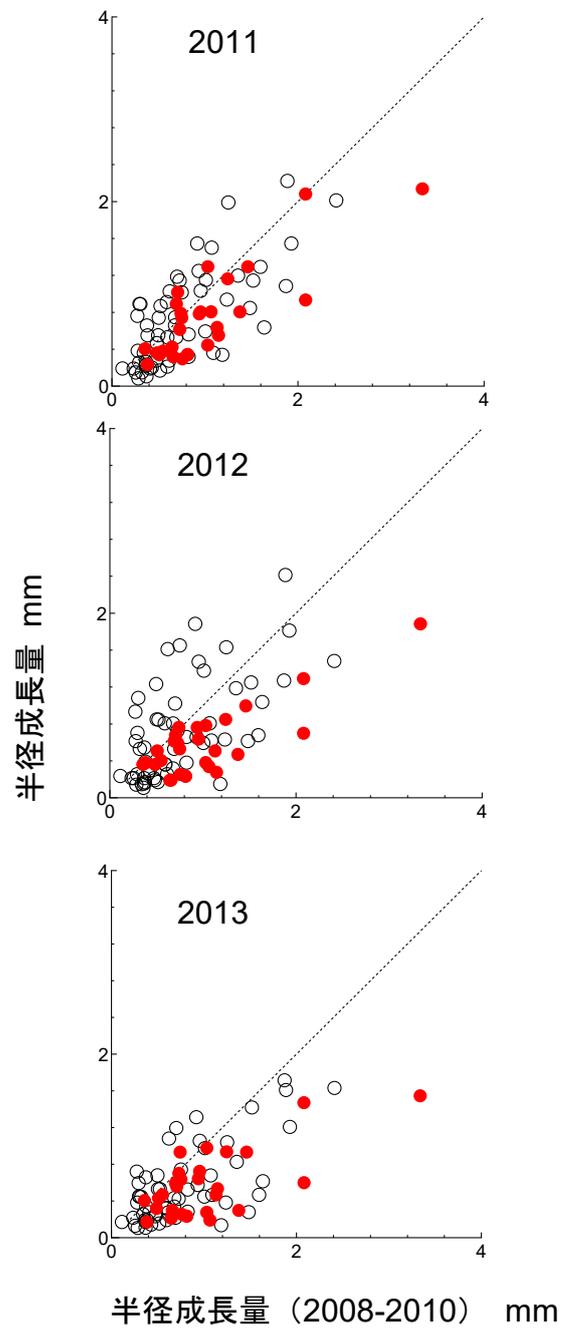


図 4.14 市川地区における震災前に対する震災後の胸高部位半径成長量  
 実線は 1:1, 赤：市川地区, 中抜き：吉浜地区 (図 3.7 より)

## 第5章 結論

### 地上 LiDAR による樹形測定

今回使用した地上 LiDAR は、可搬性、測定スピード、測定精度とも、樹形測定にあたり十分な機能を持っていたといえる。問題点としてあげられるのは、機器、ソフト類のコストが高いことである。機器は別としても、今回のように傾斜した個体が多く混み合った林冠を持つ林分の点群データから個体を抜き出す際には、手作業でおこなわざるを得ず、その際に必要な点群エディタソフトも高額である。点群データは膨大なデータ量であるので、それを扱えるソフトは高価にならざるを得ない。もっとも最近になって、主に航空 LiDAR を対象としてはいるが、LiDAR の点群データ解析のフリーソフトが使われるようになってきており、今後の展開が期待できる。

今回個体データの抜き出しを含めた地上 LiDAR による測定の外部委託費は、40 万円程度であった。大船渡市吉浜地区クロマツ林で、地上 LiDAR 測定とは別に実施した胸高直径と樹高の毎木調査と個体位置のコンパス測量に要した時間は、毎木調査 2 日、コンパス測量 2 日の計 4 日間であった。また、市川地区での毎木・形状測定は、108 本の個体について、胸高直径と樹高、個体位置の測量で 4 日半、樹冠測定に 2 日半の計 7 日であった。地上 LiDAR による測定は、わずか 3 時間であり、3D レーザースキャナーの操作に 1 人、基準球の移動に 1~3 人で、2, 3 人いれば測定ができる。さらに、一度デジタル化すれば、地上からの測定に比べパーソナルコンピュータ上で正確な樹冠測定ができる。また例えば Hosoi and Omasa(2009)が示したように、点群データから葉密度の空間分布情報を得ることも可能であるため、今後の解析によってより詳細な個体データを取得できる。よって、将来性を含めて考えると、トータルコストの面でも大きなメリットがあると判断される。

### 津波前後の肥大成長量の変化

本研究では、林分の平均レベルでみた場合、大船渡市吉浜地区海岸林（吉浜海岸林）と八戸市市川地区海岸林（市川海岸林）いずれも、長期的なトレンドを考慮すると林分平均値では、単純に肥大成長が低下したとはいえないと考えられた。一方で、個体別に詳しくみた場合、震災前 3 年間の平均肥大成長量に対して、吉浜海岸林では浸水後 3 年目、4 年目に低下した個体が多く、5 年目になって成長が再び上昇していた。また、市川地区でも震災当年ではなく翌年から低下する傾向がみられた。夏季までにシュート伸長を停止し、翌年の冬芽の形成を開始するいわゆる固定成長のクロマツのフェノロジーを考えると、環境の影響は当年ではなく、翌年以降の成長にあらわれてくることが充分予想される。一方、この低下が浸水の影響だとした場合、その後どのように回復するか、というデータは、今後の海岸林の取り扱いを考えるうえで重要なものとなる。図 4.13 から市川海岸林でも 2014 年に年輪幅指数の増加の傾向が認められる。吉浜海岸林でみられた 2015 年の増加が回復であるかどうか、両林分での追跡調査が必要である。その場合、海岸林特有の環境に対する個体成長の特性を正しく評価する必要がある。

#### 大船渡市吉浜地区海岸林と八戸市市川地区海岸林の比較と今後の管理

クロマツ個体は、いずれも一定の方向に傾斜していたが、その方向は吉浜海岸林では海側、市川海岸林では内陸側であった。市川海岸林では気象観測データはないが、調査の際は強い風が吹いている事が多く、風の影響によるものと思われる。2.2.2 で考察したように、多くの海岸林では内陸側に傾斜するが多いが、吉浜地区は地形的要因により風向パターンが異なっていると考えられる。Nagashima and Hikosaka (2012) は、植物群落でみられる背ぞろい現象には、個体のおかれた光環境だけではなく、風の当たり方などの隣接個体の存在による物理的環境が影響することを指摘している。クロマツの長期的な個体成長、個体形状を考える場合、海岸林環境特有の塩風の影響について充分考慮する必要があるといえる。

吉浜海岸林と市川海岸林は、両林分とも昭和三陸地震津波（1933年）後、ほぼ同時期に植栽された林分である。それぞれの立地について、吉浜海岸林は海に面した花崗岩母材の強固な地盤であり、海面からの高さもあり、水の停滞は起こしにくい立地と考えられる（図 2.1～2.3）。一方、市川海岸林は、海岸線から約 500m 内陸部で、砂質土壌に植栽された典型的な海岸林であり、また、地下水位は 100cm ほどの深さであった（図 4.1～4.3）。現在の立木密度は、吉浜海岸林が 970 本/ha、市川海岸林が 720 本/ha であった。両林分の胸高直径、樹高の頻度分布（図 2.5、図 4.4）を比較すると、吉浜海岸林はいずれも分散が大きく、胸高直径は弱い L 字型、樹高は明確なピークは見られず 15m から 25m まで一様に分布していた。それに対し、市川海岸林では胸高直径は中央にピークを示す分布となり、樹高は 20～25m に明確なピークを持つ頻度分布であった。頻度分布の解析にはいくつかの分布指標が使用されるが、一般的にサイズの偏り、不均質性を示すものとして、それぞれ歪度と尖度があげられる。胸高直径について、吉浜海岸林では市川海岸林に比べ小さい方に偏っている（正の歪度）。國崎（2001）によると、胸高直径分布の歪度は競争と自己間引きによって変動し、競争の増加によって負から正へ増加し、その後自己間引きが生じる段階に至っても増加が続く。しかしさらなる自己間引きの激化によって枯損個体が増えると減少するという、歪度増減仮説を提唱している。市川海岸林では立木密度が低く、樹高が低い個体が少ない事、現在の立木状態の観察から植栽時の間隔から判断すると多くの個体が消滅していると考えられることから、市川海岸林では自己間引きが相当進んだ段階にあると考えられる。市川海岸林は、内陸部にあることで海陸風の影響が弱いこと、下層植生の発達をみても土壌条件が良い事から、植栽後高い個体成長量を示し、吉浜海岸林に比べ密度効果が早く表れたのではないかと考えられる。すなわち、吉浜海岸林では、肥大成長に影響を与える因子が密度効果以外、例えば塩風や土壌の不均一性などが存在する可能性があると思われる。一方で、市川海岸林の地下水位が 1m 程度と高いことは問題である。小田（2001）は、クロマツ根系の発達は地下水位の影響を強く受け、地上部

成長を規制することを明らかにし、健全なクロマツの樹齢(x年)と根系の深さ(y cm)について  $y = 2.1x + 11.6$  の関係式を導いた。80年生の場合、180cmとなり、市川海岸林では明らかに危険な状態である。実際に根返りや傾いた個体もみられ、今後は、倒伏の危険性を考慮した管理が必要である。以上のことから考えると、市川海岸林は、吉浜海岸林に比べて充分発達しきった段階ではあるものの、これ以上の樹高成長などのサイズ増加は期待できないと思われる。今後の管理にあたっては、倒伏の危険性を重視し、危険性の大きいと思われる個体を中心に、サイズを目安に林分一律に選木していけばよいと思われる。吉浜海岸林では、高密度による競争効果の低減のため、今後成長量増加が期待できる個体を残していくことが重要である。その際、現在のサイズはひとつの目安となるが、林内の微地形も考慮したより細かい選木基準を使用する必要がある。そのためには、デジタル化されたデータをさらに解析し、葉密度の空間分布をはじめとするより細かい樹冠形状と個体成長の関係を検討する必要がある。

## 摘 要

2011 年の東日本大震災によって東北地方太平洋沿岸の海岸林の多くは壊滅的な打撃を受けたが、浸水被害を受けながらも枯死をまぬがれて残存した海岸林も少数ながら存在しており、それらの林分の確実な保全に対する地域住民の要求は強い。クロマツは我が国の海岸林の主要植栽樹種であり、高い耐塩性から残存海岸林の多くはクロマツ林である。東北地方太平洋沿岸北部の海岸林は、昭和三陸地震津波（1933 年）で大被害を受けた後、集中的に植栽された林分が多く、被害を受けた時点で林齢 70 年を超える高齢林が多数を占めていた。しかし南東北地域や東北日本海側地域に比べ、この地域のクロマツ林の成長を詳細に調べた例はほとんどみあたらない。本研究では、同地域における残存した高齢クロマツ個体の浸水被害前後の成育状況を調べ、個体形状、特に樹冠部の形状との関係を明らかにすることで、今後の維持管理に必要な知見を得ることを目的とした。

高齢クロマツ個体は、樹高 20m を超える個体が多く、海陸風の影響を受け幹の傾斜、樹冠偏奇という特有の形態を示す。従来そのような個体の樹冠形状を地上から正確に測定するのは困難であった。そこで本研究では、最近開発された地上 LiDAR による形状測定を森林に適用し、岩手県大船渡市吉浜地区の残存クロマツ林で、森林のデジタル化をおこないその有用性を検討するとともに、林分内の個体形状の測定をおこなった。今回使用した地上 LiDAR は、中距離型 3D レーザースキャナーである。林内で 20~30m 間隔で測器を移動させ、各点でスキャニングをおこなって得られた点群データを合成して個体形状をデジタル化した。パーソナルコンピュータ上で処理をして得られた個体の位置座標、胸高直径、樹高を、実測したものと比較した結果、両者はよく一致しており、高い精度の測定が可能と判断された。現地での測定に要する時間は、1 測定点あたり機器の移動・調整も含めて約 15 分程度、約 590 本（約 0.6ha）の測定

がわずか3時間で終了しており、高い実用性が認められた。

林分から偏りの無いように59個体を選び、2013年10月に成長バンドを設置して肥大成長の連続測定をおこなった。その個体について点群データを切り出し、パーソナルコンピュータ上で樹冠幅、樹冠長と位置座標を測定した。デジタル化したデータによる測定は、空間内で視点を自由にとることができるため、高所にある樹冠でも正確な測定が可能であった。各個体の樹冠形状を調べた結果、樹冠幅の東西方向、南北方向の違いに全体で有意な傾向はみられないこと、ほとんどの個体が海側に傾斜しており、これは風の影響であることが明らかになった。また、精密な樹冠位置が求められたことから、今回の津波により樹冠部まで浸水した個体を正確に推定することができた。

成長バンドを設置した個体について、さらに成長錐により年輪コアを採取し、両方の結果から津波前後の肥大成長量の変化を検討した。当初、津波被害の影響は何らかの形で肥大成長に影響をおよぼしていることを想定していたが、林分の平均レベルでみた場合、肥大成長量に津波の影響が表れているとは言えないことが明らかとなった。また、直近2年間(2014, 2015年)の肥大成長量は2014年の期首胸高直径と有意な正の相関関係があり、本林分では胸高直径31cm以上の個体であれば正の成長を期待できることを示した。これは、今後間伐をおこなう際、成長が期待できる個体の選抜基準として考えることができる。一方で、個体別にみた場合、胸高直径が大きくても相対的に肥大成長量が小さい個体、またその逆のパターンの個体があった。それぞれの林内の位置を調べたところ、肥大成長量の大きな個体が場所によって集中している傾向が認められ、立地の影響が示唆された。

大船渡市吉浜地区以外の残存海岸林として、青森県八戸市市川地区の残存高齢クロマツ林で成長錐による肥大成長経過、従来通り地上からマニュアルで樹冠幅、樹冠長

および目視により葉密度の測定をおこない、樹冠諸量が肥大成長量におよぼす影響を検討した。胸高直径を従属変数、樹冠幅、樹冠長、葉密度を説明変数としてダミー変数を使った重回帰分析をおこなったところ、樹冠幅、樹冠長のモデルが選択され、特に樹冠幅の影響が大きかった。そこで、樹冠幅が大きい個体と小さい個体に分け、過去の肥大成長量について、相対的な肥大成長量をあらわす標準化した年輪幅指数を求め、それぞれの平均値の時系列変化を調べた。その結果、植栽後、両者はほぼ同調していたが、林齢 45～55 年頃に、増減がずれる傾向がみられた。この時期は樹冠閉鎖の時期に相当し、競争による密度効果が生じたと推察され、間伐等の保育作業をおこなう必要があることを示している。また、肥大成長量は、両者とも 2009 年頃から低下しており、2011～2013 年にかけて、その傾向の延長線上であった。そのため、この地域においても浸水による影響は長期的にみて高いとはいえないと考えられた。

吉浜海岸林と市川海岸林について津波前後の肥大成長量を年度別、個体別に詳しく見た場合、吉浜地区では津波 2 年後、市川地区では津波翌年の肥大成長量に低下の傾向があった。現在のサイズ分布からみて、同じ林齢であっても、吉浜地区では競争状態が続いているのに対し、市川地区の方が林分の発達段階が進んでいることが示唆された。吉浜地区では、樹冠サイズを目安にしつつ、林内の微地形を考慮して現在の競争緩和を目的とした管理が必要と考えられるが、市川地区では成長回復よりも倒伏危険性を重視した管理の必要性があると考えた。

## 引用文献

秋山幸秀 (2014) : 1. 航空レーザ (LIDAR) . 加藤正人編「森林リモートセンシング第4版 基礎から応用まで」, 日本林業調査会, 東京, 128-132.

Aoyama S., Asaka T., Kudou K. and Iwashita K. (2012): Tsunami Damage in the Arahama Coastal Forest Interpreted from ALOS Data, Journal of the Japanese Society of Coastal Forest, 11(2), 53-58.

浅野敏之・三谷敏博・三嶋俊樹(2007) : 海岸林の幹直径の分布特性と津波による樹木倒伏率. 海岸工学論文集 54, 土木学会, 1376-1380.

Bunn A. G. (2008): A dendrochronology program library in R (dplR). Dendrochronologia 26, 115-124.

千葉幸広 (2009) : 長伐期への道筋を考える (II) 樹冠長を目安とした高齢林の管理. 森林技術 802, 11-17.

遠藤貴宏, 中村裕幸, 澤田義人, 沢田治雄(2012) : 地上 LiDAR による樹幹太さの推定に関する研究, 生産研究, 64(4), 585-589.

藤森隆郎(2006) : 長伐期施業の意義と課題. 「長伐期林を解き明かす. 全林協編, 全林協, 東京」, 12-32.

藤原道郎・岩崎寛・大藪崇司・澤田佳宏 (2007) : 名勝に指定されている海岸クロマツ林におけるクロマツ大径木の樹齢と年輪成長, 海岸林学会誌, 6 (2) , 19-22.

藤原新二(1997) : クロマツの肥大成長と年輪構造 (I) 高知地方の気候因子と年輪幅および晩材幅との関係. 森林計画学会誌 28, 23-28.

畑野健一, 佐々木恵彦編 (1987) : 樹木の生長と環境. 養賢堂, 東京, 383pp.

平岡 裕一郎, 高橋 誠, 渡辺 敦史 (2015) : 林木育種における地上 LiDAR 計測の応用, 日本森林学会誌, 97(6), 290-295.

- 本田詩織・林田光祐（2015）：三陸南部の津波浸水地における広葉樹6種のサイズと樹冠の浸水程度が個体の樹冠の衰退程度に及ぼす影響，海岸林学会誌，14（1），13-20.
- 星野大介（2012）：東北地方太平洋沖地震津波による岩手県沿岸の海岸林と集落の被害状況，日本森林学会誌，94(5)，243-246.
- Hosoi F., Nakai Y. and Omasa K.(2010): Estimation and error analysis of woody canopy leaf area density profiles using 3-D airborne and ground-based scanning Lidar remote-sensing techniques. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(5), 2215—2223.
- Hosoi F., and Omasa K.(2009): Estimating vertical leaf area density profiles of tree canopies using three-dimensional portable lidar imaging. *In Laser scanning 2009, IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 3/W8, Bretar F, Pierrot-Deseilligny, M., Vosselman, G.(eds.)*, 152-157.
- Hosoi F., and Omasa K.(2006): Voxel-Based 3-D Modeling of Individual Trees for estimating Leaf Area Density Using High-Resolution Portable Scanning Lidar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(12), 3610-3618.
- 加藤 顕・石井弘明・榎木 勉・大澤 晃・小林達明・梅木 清・佐々木剛・松英恵吾（2014）：レーザーリモートセンシングの森林生態学への応用. 日本森林学会誌，96(3)，168-181.
- Koenker R.（2005）：Quantile regression, Cambridge University Press, 366pp.
- 國崎貴嗣（2001）：樹木同齢単純林における胸高直径分布とその動態—針葉樹を中心として—，森林計画学会誌，35，31-45..
- 國崎貴嗣（2014）：過密なカラマツ，アカマツ人工林における簡便な密度管理指標の探索，岩手大学農学部演習林報告，45，25-36.
- 國崎貴嗣・関原英美子・山崎 遥・白旗 学（2014）アカマツ林木の地上部サイズと葉量指数との関係：若齢林と高齢林の比較. 岩手大学農学部演習林報告 45，37-45.
- 國崎貴嗣（2015）：スギ若齢人工林における劣勢木の本数割合の変化，岩手大学農学部演習林報告，46，1-10.

松岡廣雄（1992）：主要海岸林の実態 2. 東北地方. 村井 宏・石川政幸・遠藤治郎・只木良也編  
「日本の海岸林 多面的な環境機能とその活用」, ソフトサイエンス社, 東京, 97-122.

正木 隆・森 茂太・梶本卓也・相澤州平・池田重人・八木橋勉・柴田銃江・櫃間 岳（2011）：  
高齢・高密度のアカマツ林の間伐は個体の成長を改善するか. 日本森林学会誌 93, 48-57.

増谷利博・柿原道喜・國崎貴嗣（1995）：樹幹解析による海岸クロマツ老齢木の成長特性, 九州  
大学農学部学芸雑誌, 49, 179-189.

南佳織・野堀嘉裕・瀧誠志郎（2013）：宮城県海岸クロマツ林の再生までの期間予測と構造シミュレーション, 東北森林科学会第 18 回大会要旨集, 18.

森と緑の研究所（2012）平成 23 年度 東日本大震災による岩手県内海岸林の津波被災状況と再生  
についての調査研究, 175p, 森と緑の研究所, 盛岡

Nabeshima E., Kubo T., Yasue K., Hiura T., and Funada R.(2015) Changes in radial growth of  
earlywood in *Quercus crispula* between 1970 and 2004 reflect climate changes. *Trees* 29,  
1273-1281.

Nagashima H., Hikosaka K.(2012) Not only light quality but also mechanical stimuli are  
involved in height convergence in crowded *Chenopodium album* stands. *New Phytologist*,  
195, 803-811.

南雲秀次郎・箕輪光博（1990）：測樹学, 地球社, 243pp.

中村裕幸(2013)：地上型レーザスキャナによる森林情報のデジタルドキュメント化. 2013 年度精密  
工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 643-644.

中村裕幸(2014)：3D レーザスキャナによる森林のサイバーフィールド構築. 2014 年度精密工  
学会春季大会学術講演会講演論文集, 373-374.

野堀嘉裕(1991)：軟 X 線写真による造林木の容積密度解析 (III) - 苫小牧地方のアカエゾマツに  
おける年輪情報と気候情報の関係. 第 102 回日本林学会論文集, 527-528.

野堀嘉裕(1994)：軟 X 線デンシトメトリーによる苫小牧地方アカエゾマツ造林木 194 個体におけ

- る年輪情報と気候情報の関係. 日本林学会誌 76, 89-94.
- Nobori Y. (1998): Development of the tree-dimensional computer graphics system for forest stand structures. *Journal of forest Planning*, 4, 83-87.
- 野堀嘉裕・宮城正明・伊藤 聡 (2004) : 山形県北部の海岸クロマツ林内に樹下植栽されたタブノキの成長, 東北森林科学会誌, 9(1), 1-5.
- 野堀嘉裕 (2011) : 特別セッション「東北地方の森林・林業における東日本大震災の被害の現状と復興への取組み」, 東北森林科学会誌, 16(2), 44-49.
- 野田真人 (2006) : 日本の年輪解析研究の現状と展望. 日本木材学会誌 52, 271-276.
- 小田隆則 (1992) : 保育・密度管理・更新技術. 村井 宏・石川政幸・遠藤治郎・只木良也編「日本の海岸林 多面的な環境機能とその活用」, ソフトサイエンス社, 東京, 395-408.
- 小田隆則 (2001) : 海岸砂丘低湿地における植栽木根系の滞水反応と樹林帯造成法に関する研究. 千葉県森林研究センター特別研究報告 3, 1-78.
- 小田隆則 (2003) : 海岸林をつくった人々ー白砂青松の誕生. 北斗出版, 東京, 254pp.
- 大畠誠一・田中弘之・藤本博次・中井 勇 (1977) : マツ属の肥大生長の季節変化. 京都大学農学部演習林報告 49, 20-29.
- 大政謙次・浦野 豊・小熊宏之・藤沼康実 (2002) : 可搬型 Scanning Lidar データを用いたカラマツ林の樹林マッピングと胸高直径及びバイオマスの推定. 日本リモートセンシング学会誌, 22(5), 550-557.
- R Core Team (2013). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- 齋藤武史・村井 宏・照井 隆一 (2014) : 三陸北部の津波被災海岸林跡地に開設した植栽試験地における土壌の凍結過程と被覆工による緩和効果, 東北森林科学会誌, 19(1), 18-21.

- 坂本知己・新山馨・中村克典・小谷英司・平井敬三・齋藤武史・木村公樹・今 純一（2012）：  
東北地方太平洋沖地震津波における海岸林の漂流物補足効果－青森県八戸市市川町の事例  
－．海岸林学会誌 11, 65-70.
- 佐藤創・鳥田宏行・真坂一彦・阿部友幸・野口宏典・木村公樹・坂本知己（2012）：東北地方太  
平洋沖地震津波によるクロマツ海岸林被害と林分構造の関係，海岸林学会誌，11(2)，41-45.
- 成美堂出版編集部(2011)：地図で読む東日本大震災，成美堂出版，95pp.
- 四手井綱英(1963)：アカマツ林の造成－基礎と実際，地球出版，326pp.
- 島田博匡(2011)：三重県の高齢人工林における今日協直径，樹高，樹冠幅の関係－大径材生産を目  
指した密度管理技術の検討－．三重県林業研究所報告 3, 19-26.
- 清水収・佐藤太一郎（2014）：東北地方太平洋沖地震津波で被災した海岸林の流失と非流失を分  
けた地形条件の解析－今後予想される大津波に対して海岸林が流失し難い地形条件とは－，海  
岸林学会誌，13（2），37-44.
- 高橋宏明（1977）：スギ林の直径成長（IV）直径成長と気象 into の相関．日本林学会誌 53, 315-  
318.
- 瀧誠志郎・南佳織・白旗学・野堀嘉裕（2016）：宮城県のクロマツ海岸林における収量・密度図の  
構築，東北森林科学会誌，印刷中.
- 寺本行芳・浅野敏之・林健二郎・多田毅・今井健太郎・坂本知己（2012）：2011年東北地方太平  
洋地震津波発生後の宮城県名取市閑上浜における海岸林被害と残土盛土による海岸林の被害  
軽減効果，海岸林学会誌，11(1)，11-18.
- 戸田健太郎・中村彰宏・大藪崇司・前中久行（2009）：地上型レーザスキャナを用いた3次元環境  
計測における樹高の推定．日本緑化工学会誌，35(1)，69-74.
- 山中啓介・藤原道郎・林田光祐・後藤義明・鈴木覚・宮前崇・井上章二・坂本知己（2012）：平  
成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震で発生した津波が仙台市井土地区の海岸林に及ぼし  
た影響－防潮堤と海岸クロマツ林の被害との関係－，海岸林学会誌，11(1)，19-25.

山中啓介・藤原道郎・林田光祐・後藤義明・鈴木寛・宮前崇・井上章二・小谷英司・坂本知己(2013) :  
平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震で発生した津波が宮城県仙台市井土地区の海岸林  
に及ぼした影響 (II) -アカマツ・クロマツ大径木で構成される海岸林の被害状況-, 海岸林  
学会誌, 12(1), 1-7.

若江則忠 (1961) 日本の海岸林, 地球出版, 東京.

渡部公一・海老名寛・古川和史・堀米英明・大築和彦・上野満・宮下智弘・坂本知己(2014) : 2011  
年東北地方太平洋沖地震津波による仙台平野の海岸林被害と地下水深度及び立木サイズとの  
関係, 海岸林学会誌, 13(1), 41-45.

Zande D., Mereu S., Nadezhdina N., Cermak J., Muys B., Coppin P. and Manes F.(2009): 3D  
upscaling of transpiration from leaf to tree using ground-based LiDAR: Application on a  
Mediterranean Holm oak (*Quercus ilex* L.) tree. Agricultural and Forest Meteorology 149,  
1573-1583.

## 謝辞

本研究は、岩手大学大学院連合農学研究科 野堀嘉裕教授（山形大学）、國崎貴嗣准教授（岩手大学）、森 茂太教授（山形大学）の指導の下でとりまとめることができた。放送大学岩手学習センター 橋本良二教授には、研究開始のきっかけを与えてくださり、初期の1年半の間ご指導をいただき、その後もかわらぬご指導と温かい励ましを常にいただいた。岩手大学大学院連合農学研究科 石田 清准教授（弘前大学）には、多くの有益なご助言をいただいた。

岩手県沿岸広域振興局農林部大船渡農林振興センター森林保全課の皆様には、貴重な試験地の使用許可および資料の提供をいただいた。一般社団法人市川海岸保安林協会の田村氏には、貴重な試験地の使用許可をいただいた。

日本森林技術協会東北事務所 沼宮内信之博士には、長きにわたり有益なご意見と温かい励ましをいただいた。

岩手大学農学部共生環境課程造林学研究室の学生の皆様には、様々な意見、援助をいただき、日常の研究生活を送る中で多くの励ましをいただいた。特に西城孝太氏、菅野編美氏、宮本祥太氏、石井智朗氏、先崎亜里沙氏には現地調査、データ収集および解析の際、多大なご協力をいただいた。

岩手大学農学部森林科学科教員の皆様には、研究遂行にあたり多くのサポートをいただいた。

以上の方々の温かいご協力に心から感謝いたします。

最後にいつも支えてくれた妻と子供たちに心より感謝する。