

学位論文

重量値による収量-密度図の構築

Construction of the Yield-Density diagram by
using total tree weight

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)

瀧 誠志郎

第1章 序論.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.1.1 これまでの密度管理手法と最多密度の考え方.....	1
1.1.2 現代の森林管理の考え方.....	3
1.2 研究目的.....	4
1.3 研究の進め方.....	5
1.4 本研究の意義.....	7
第2章 調査地・材料と方法.....	8
2.1 調査地概況.....	8
2.1.1 山形県庄内地方における海岸クロマツ林.....	8
2.1.2 モンゴル北部フブスグル地方におけるシベリアカラマツ天然林.....	9
2.2 調査方法.....	12
2.2.1 樹幹解析のための試料採取.....	12
2.2.2 試料の調整と軟X線デンシトメトリー法による年輪解析.....	12
2.2.3 毎木調査.....	13
2.2.4 採取試料重量値の算出と重量式の作成.....	13
2.3 収量-密度図の作成方法.....	15
2.4 林齢別 Y-N 曲線の導入方法.....	20
第3章 海岸クロマツ林の結果と考察.....	21
3.1 結果.....	21
3.1.1 樹幹解析および年輪解析.....	21
3.1.2 毎木調査.....	22
3.1.3 胸高直径と樹高の相対成長関係.....	24
3.1.4 重量式.....	26
3.1.5 収量-密度図.....	28
3.2 考察.....	35

3.2.1	重量値による収量-密度図と収量-密度図からみた海岸クロマツ林の概況	35
3.2.2	材線虫被害木除伐を想定した森林動態シミュレーション	43
第4章	カラマツ天然林の結果と考察.....	55
4.1	結果	55
4.1.1	樹幹解析および年輪解析.....	55
4.1.2	毎木調査.....	56
4.1.3	胸高直径と樹高の相対成長関係.....	56
4.1.4	重量式.....	60
4.1.5	収量-密度図	62
4.2	考察.....	67
4.2.1	重量値による収量-密度図と収量-密度図からみたモンゴルカラマツ林の概況	67
4.2.2	森林火災によるバイオマス減少とその後の森林動態シミュレーション	71
第5章	結論.....	86
	おわりに	88
	謝辞	89
	引用文献.....	90
	摘要	97
	SUMMARY.....	100
	本研究内容の主な掲載論文等.....	102
	付 図.....	103

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 これまでの密度管理手法と最多密度の考え方

昭和30年代以降、拡大造林政策によって製材・合板用原木として多くの針葉樹が植栽され、人工林が造成された（猪瀬 1997）。ところが、国産材需要の低迷の影響を受けて密度管理や間伐等の森林保育が行われない森林が増加したことにより、針葉樹人工林は過密状態となり、成長阻害や病虫害の発生など健全性に問題が生じている（藤森 2005）。

これまでわが国では、木材生産に特化した単位面積当たりの幹材積値(収量)を指標とした密度管理や収穫予測に関する研究が行われ、それらが利用されてきた。例えば、林分収穫表（石橋ら 2006）、密度管理図（安藤 1966, 1968a, 1968b, 1982, 真鍋 1982）、収量-密度図（菊沢 1983a）、システム収穫表（木平 1995, 白石 2005, 八坂ら 2011）、である。これらのうち、我が国では主に、収穫表と密度管理図が使用されている。

これらの異なる密度管理手法に関して、八坂ら（2011）は次のようにまとめている。「林分収穫表では、平均的な本数密度で推移した場合の平均直径、林分材積などの予測ができる。ただし、間伐率や間伐時期を変えたときの収穫予測はできない。これに対し、密度管理図では、様々な強度の間伐を実施した時の上層高、平均直径、林分材積などの予測が可能である。一方、収量-密度図では上層高、平均直径、林分材積だけでなく（直径）階級分布も含めた収穫予測ができる。」（括弧内は筆者による）

一方、システム収穫表について白石（2005）は次のように定義している。「様々な状態にある林分について、様々な施業がなされた場合に対応して、将来の成長変化を予測することができる仕組みを持ったコンピュータープログラムの総称である」。このシステムについて松本ら（2011）は、「様々な樹種や地域に適

用範囲を拡張し得る可能性を備えているものの、現段階では対象とする樹種や地域が一部の適用範囲に限られており、個別林分の状況を十分に反映できない」としている。そこで、より汎用性を高めるために様々な樹種と地域に応じた成長パラメータをあらかじめシステムに組み込み、さらに Excel マクロへの移植を行い報告している（松本 2011）。ここで挙げた密度管理手法は、すべて収量として幹材積合計を扱うものばかりである。

これらの密度管理に共通する点として、最多密度曲線の存在が挙げられる。これは、吉良らによる平均個体重と最大個体群密度（単位面積あたりの個体数）との関係は傾きが $-3/2$ （単位面積あたりの現存量（収量）の場合 $-1/2$ ）に近い値をとることから、自然間引きの $-3/2$ 乗則と呼ばれている（吉良 1957）。只木らは、幹の生重量と体積の比が $1/1$ であったとして、この法則を幹材積に応用している（四手井・只木 1962）。ところが、現存量すなわち生物体量（バイオマス）とは、生物学辞典によると「ある時点に任意の空間内に生存する生物体の量を、重量ないしエネルギー量で示した指標」とある（八杉ら 2002）。このことから、これまでの密度管理手法では、体積を扱っていたのであって現存量や生物体量（バイオマス）を扱っていたわけではないことが明らかである。

重量値は、材積に容積密度を乗じることで算出されるが、深沢・大谷（1972）や野堀ら（2010）によると樹齢の増加に伴い樹幹内容積密度が変動することがわかっている。その他にも同様の報告が多数存在する（深沢 1967, 野堀ら 1988, Minato et al. 1989, Hishinuma et al. 1992, 飯塚ら 2001）。このことから、これまでの密度管理手法では、本来重量値で示されるべき現存量について、変動する容積密度を加味せずに直接幹材積に応用してきたことになる。最多密度の考え方を森林管理に利用するのであれば、現存量すなわち生物体量（バイオマス）として扱う必要があり、さらに、容積密度も加味された重量値を用いるほうが妥当だと考える。そこで本研究では、森林の現存量すなわちバイオマス

を重量値として扱うものとする。

なお本研究では、八坂らがまとめた様々な密度管理手法の中で、直径階級分布の把握が可能である収量-密度図に着目した。収量-密度図は、Y-N 曲線、B ポイント線、最多密度曲線、等限界直径線の各曲線を両対数グラフで示したものである。密度管理図とよく似ているが、収量-密度図における Y-N 曲線は直径級の大きいものから積算していることが特徴であり、一つの林分を一本の Y-N 曲線で示す。Y-N 曲線に対する二本の接線の交点から垂線を下し、Y-N 曲線と交わる点を B ポイントと呼ぶ。B ポイントは、一本の Y-N 曲線に対して一義的に一つの B ポイントが定まる。このことから、各 Y-N 曲線の相互の位置関係を示す点として林分構造を比較することができる（菊沢 1983a）。また、各林分が最多密度に達している時の B ポイントを結んだ線が B ポイント線である。そして、各林分の積算重量値の中で最も右上側に位置する林分を通り、B ポイント線に平行な線が最多密度曲線である。したがって、最多密度曲線は便宜的に構築された線といえるが、この時の傾きは $-3/2$ （単位面積あたりの現存量（収量）の場合 $-1/2$ ）に近い値をとるとされている。

1.1.2 現代の森林管理の考え方

現在の社会的要請として森林生態系の保全・修復や生物多様性の維持といった、これまでの木材生産機能以外の多様な機能を発揮させる持続可能な森林管理が求められている（野々田 2008）。特に、地球温暖化防止京都会議（COP3）が開催された 1997 年以降、森林を炭素吸収源とした上で、森林の炭素固定機能が注目されるようになった。これを受けて、間伐と炭素固定との関係として、間伐林と無間伐林の炭素固定量を比較するといった研究が報告されている（高宮 2001, 片倉 2001, 高宮 2002）。しかし、炭素吸収源として森林を評価し、炭

素蓄積を目的とする密度管理について提唱された例はみられない。

木材生産以外に炭素吸収源としても森林を管理していくことを考えるならば、これまでの幹材積によるものとは別に、次世代型の密度管理の一つとして重量値に着目した新たな森林の密度管理の考え方や手法が必要である。

ところで、樹木の炭素重量について、右田らによれば、木材はほとんどリグニンとセルロースからなっており、これらの元素組成のうち樹種の種類を問わずに炭素は約 41～51%であるとされている（右田ら 1973）。したがって、樹木の炭素重量は、重量値に炭素含有率として 0.5 を乗じることで容易に算出することができる。このことから、IPCC では樹種を問わず一律に 0.5 を乗じる手法を示している（IPCC 2003, 日本国 2008）。炭素含有率についてはさらなる今後の研究が俟たれるが、本研究では、バイオマスについての研究であるため、あえて炭素換算をせずに、重量値のまま研究を進めることとした。

1.2 研究目的

森林の持つ多面的機能を考え、森林を適正に評価・管理していくためには、これまでの幹材積によるものだけでは十分とはいえない。そこで本研究では、特に炭素吸収源としての森林の機能に着目し、それを評価するために、これまでの幹材積を指標とした密度管理手法ではなく、新しい概念として樹木の重量値を指標にした収量-密度図の提案・構築することを一つの目的とした。ここでは樹幹解析と年輪解析を組み合わせ、年輪毎に容積密度を算出した後、年輪毎の重量値を算出した。なお調査地は、山形県庄内地方における海岸砂丘地に植栽されたクロマツ (*Pinus thunbergii*) 海岸林（以下海岸クロマツ林）とした。ここは、原則的に無間伐で管理されており、初期植栽密度も大きく、最多密度に達している可能性があることから、収量-密度図の構築に適していると考えた。

つぎに、重量値による収量-密度図の普遍性(汎用性)を検証する必要がある。そこで、緯度経度や気候帯の異なる地域においてクロマツ以外の樹種を使って重量値を指標とする収量-密度図を構築することを二つ目の目的とした。調査地は、モンゴル北部フブスグル地方のシベリアカラマツ (*Larix sibirica*) 天然林(以下モンゴルカラマツ林)とした。ここは、天然林であることから、最多密度に達した森林が多く存在することが考えられるため、収量-密度図が構築できると考えた。

最後に、収量-密度図上で森林構造の変化に伴うバイオマスの変動シミュレーションを行うことを三つ目の目的とした。海岸クロマツ林では材線虫被害、モンゴルカラマツ林では森林火災をそれぞれ毎年の本数密度の減少要因とした。また、樹幹解析と年輪解析による直径・樹高成長などの相対成長関係から経年成長を算出することで、現実に近いシミュレーションを行った。

1.3 研究の進め方

本研究では、大きく以下の4つのステップからなっている。

1) 相対成長理論式の作成

重量値による収量-密度図を作成する上で、厳密な重量式を作成する必要がある。そこで、樹幹解析の要領で直径階毎に試料を採取した。続いて、軟X線デンシトメトリー法による年輪解析を行い、年輪毎に高さ方向別に年輪幅・重量値・容積密度を解析・算出した。樹高成長や重量成長について、直径値や樹齢との相対成長理論式を作成した。

2) 毎木調査

最多密度曲線をもとめるためには、できるだけ最多密度に達した林分データが必要となる。また、自然間引きが起こっており、初期密度が大きい必要がある。さらに、各Y-N曲線同士の収量-密度図上での広がりも必要である。

そこで、最多密度に達しており、様々な本数密度の諸林分で毎木調査を行った。

3) 収量-密度図の作成

毎木調査データにおける各個体の直径値と樹高値を基に、相対成長理論式を用いて個体別重量を算出することで重量値を使った収量-密度図を作成した。なお、収量-密度図上の各曲線に使用される係数は、最小二乗法を自動で行う Microsoft 社製の Excel2010 のソルバー機能を使用した(石原 2001, 芳賀 2003)。なお、海岸クロマツ林では、林齢別に Y-N 曲線を算出した。

4) 収量-密度図を使った森林動態シミュレーション

海岸クロマツ林では、材線虫被害木の除伐が毎年行われている。本研究では、2011 年度の除伐対象木データを用いた。シミュレーションした内容は、除伐による 1 年後のバイオマス減少量の算出と、林分重量成長量を加味した 1 年毎のバイオマス増減量 (5 年後まで) の算出である。モンゴルカラマツ林におけるシミュレーションでは、森林火災によるバイオマス増減について行った。森林火災によって焼失する可能性がある個体の樹高を仮定した上で、これを基準にして森林火災の規模を小・中・大規模の 3 パターンに分類し、それぞれのパターンについて林分重量成長を加味したシミュレーションを行った。シミュレーション結果は、それぞれ数値データだけでなく収量-密度図上での Y-N 曲線の移動を図示し、直径階別本数分布による林分構造の変化も示した。なお、本研究中の直径階別本数分布図は、収量-密度図の Y-N 曲線とあわせて横軸の直径階は左右反転してある。したがって、左側に直径級の大きい個体、右側に小さい個体となっている。

以上のことから、本論では第 2 章で調査地の概況や材料と方法について述べている。第 3 章は、庄内地方における海岸クロマツ林に関する結果と考察について示した。考察では、材線虫被害木の伐採による森林動態シミュレーション

を行った。第4章は、モンゴルのカラマツ林に関する結果と考察について示した。考察では、森林火災による森林の動態をシミュレーションした。第5章は、本研究の結論をまとめた。

1.4 本研究の意義

本研究では、温暖化問題において森林の炭素吸収源としての機能に着目した。温暖化問題や持続可能な森林管理を考える際、温室効果ガスの削減は必要であるが、炭素吸収源としての森林が実際にどのくらい炭素を吸収しているのか正確な現状の把握は最優先課題といえる。ところが、これまでの幹材積から炭素重量値へ換算する手法は、論理的に構築された手法とはいえない。そこで、これまでほとんど評価されてこなかった森林の炭素固定機能を、重量値による収量-密度図を使った密度管理という新しい概念・手法で適正に評価することが本研究の一つ目の意義である。さらに、重量値による収量-密度図を使った林分構造についてのシミュレーションシステムを構築することで、重量値による森林の動態解析を行うことが本研究の二つ目の意義である。そして、これが次世代型の森林評価・管理方法の一つになると考えている。

第2章 調査地・材料と方法

2.1 調査地概況

2.1.1 山形県庄内地方における海岸クロマツ林

図1は庄内地方の砂丘地に植栽されたクロマツ (*Pinus thunbergii*) 海岸林 (以下海岸クロマツ林と記載) を示している。これは、環境省が提供する自然環境保全基礎調査植生調査のデータから、ArcGIS10 を使用して抽出した。調査地の写真を図2に示した。

庄内における海岸クロマツ林は、300年以上前から防風林として植林・保護されてきた (梅津 1996, 2003, 野堀ら 2000, 野堀ら 2002, 小塚 2010)。クロマツは、日本のほとんどの沿岸部で植栽されているが、通常 10,000 本/ha 初期密度で植栽されている (嘉戸・西村 2004)。とりわけ庄内地方では、材線虫被害木の除伐以外で海岸林に対して間伐作業を行うことはないため、自然間引きが起こっており最多密度に達していることが推測できる。したがって、庄内地方の海岸クロマツ林は、自然間引きの $-3/2$ 乗則と密度効果により収量-密度図の構築が可能であると考えた。

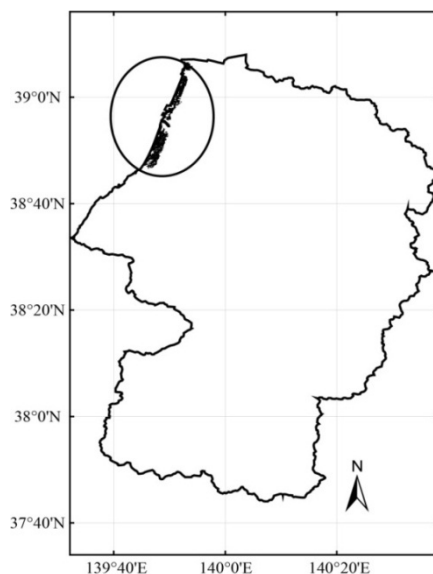


図1 山形県庄内地方における調査地域



図 2 庄内地方におけるクロマツ海岸林内の様子 2010年4月28日著者撮影

2.1.2 モンゴル北部フブスグル地方におけるシベリアカラマツ天然林

図 3 と図 4 にモンゴル北部フブスグル地方における調査地の位置を示した。調査地はロシア国境に近いモンゴル北部に位置している。フブスグル地域はシベリアから広がる永久凍土地帯の南端に位置し、連続した永久凍土を有する。冬季最低気温 -40°C 、年降水量 $200\text{mm}\sim 400\text{mm}$ と寒冷乾燥気候で、本来森林が形成されない環境下であるが、丘陵の北向き斜面にシベリアカラマツ (*Larix sibirica*) 天然林 (以下モンゴルカラマツ林と記載) が存在する。乾燥条件下でも森林の形成が可能なのは、永久凍土が水の供給に大きな影響を与えていると言われている (武田 2005, 伊藤 2008)。

一方、同地域では森林火災が多発している。図 4 上の L-05 付近にある茶色い部分は、すべて森林火災の跡地である。火災跡地をみると、森林が活発に再生している場所もあれば、ほとんど再生していない場所もあり、火災後の森林の自然再生が懸念されている。武田 (2005) は、再生しない場所について次の

ように述べている。「森林が消失し日射によって凍土が深部まで融解し地表面が乾燥する。乾燥化が進むと森林の再生が困難となる。」(武田 2005)。

モンゴルでは森林の密度管理が行われていないことと、調査地が天然林であることなどから、本数密度が大きく、最多密度に達した林分が存在する可能性があり、収量-密度図の構築および最多密度曲線をもとめることが可能であると考えた。モンゴルカラマツ林内の様子を図 5 に示した。

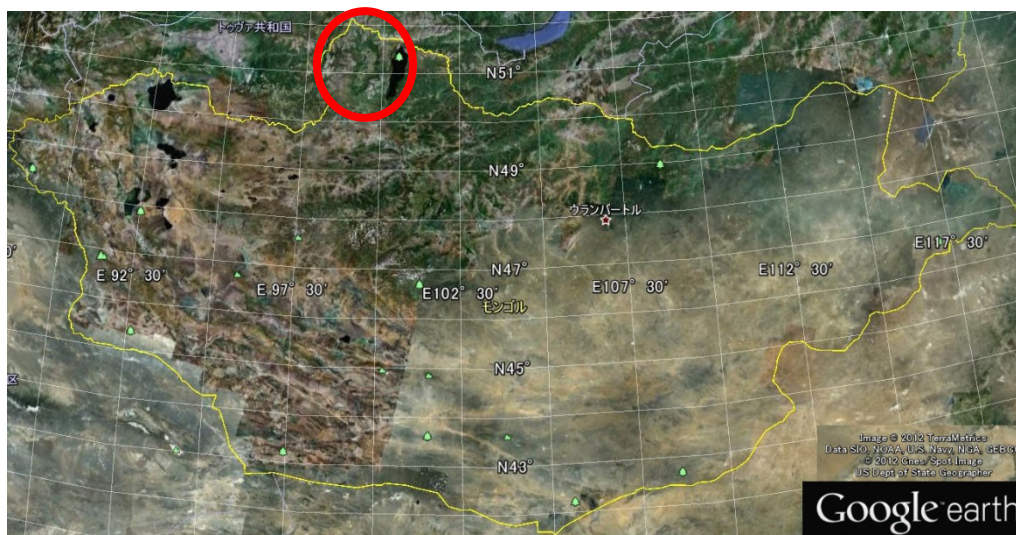


図 3 モンゴル全体図 Google Earth 2012 年現在

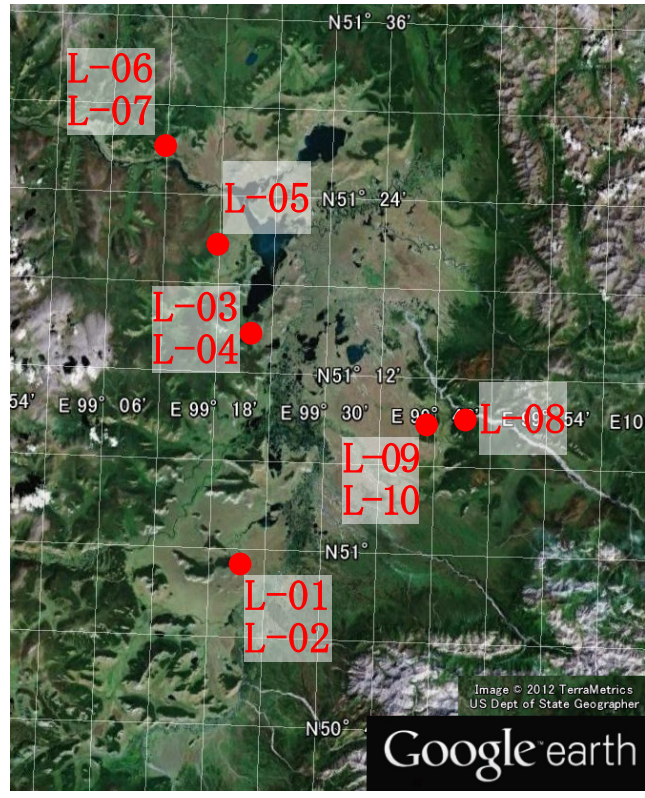


図 4 モンゴル北部フブスグル地方 調査地位置図 Google Earth 2012 年現在



図 5 モンゴルカラマツ林 2012 年 8 月 6 日 図 4 L-09 にて著者撮影

2.2 調査方法

2.2.1 樹幹解析のための試料採取

本研究における採取試料の選別は、直径階級を基準とした。これは、直径階級に応じた重量式を作成するためである。

海岸クロマツ林では、同地域において胸高直径 30cm から 50cm までのうち、直径階別に 10 個体の樹幹解析結果が瀧らにより報告されている (Taki et al. 2009, 2012, 瀧ら 2011)。本研究では、これらの既存データを用いた。

本研究で毎木調査を行ったところ、海岸クロマツ林には既存データの胸高直径を超える (50cm 以上) 個体が多数存在した。そこで本研究では、胸高直径 50cm 以上の個体に対する重量値の算出精度を高めるために、樹幹解析用試料を 4 個体採取した。追加した試料は、胸高直径が 40cm から 70cm までのうち 44cm 50cm・62cm・70cm の 4 個体である。ただし、胸高直径 50cm の試料は材線虫による被害が大きく、年輪境界が不明瞭であったため、解析からは除外した。したがって、本研究では先の研究と併せて計 13 個体を海岸クロマツ林の樹幹解析データとして使用した。

モンゴルカラマツ林では、2010 年と 2011 年に 20cm から 40cm までのうち、胸高直径 31.3cm・26.1cm・36.5cm の 3 個体を採取した。

2.2.2 試料の調整と軟 X 線デンシトメトリー法による年輪解析

採取した個体から、樹幹解析の要領で地上高 0.2m から梢枝まで 1.0m おきに厚さ約 5.0cm の円板を採取した。続いて、各円板から幅約 3.0cm で髄が入るように 4 方向のブロックを取り出した。各ブロックから厚さ約 2.0mm の剥片を取り出した。この薄片を、105°C・24 時間で絶乾させた直後に X 線撮影を行った。撮影されたフィルムは、デジタル画像としてパソコンに取り込んだ。これらの

デジタル画像から、軟 X 線デンシトメトリー法 (Parker・Meleskiel1970, Polge1970) による年輪解析を行った。軟 X 線デンシトメトリー法は、X 線画像を使って容積密度が既知の標準吸収体を基準に試料の容積密度を測定する手法である。本研究の標準吸収体には、1.0mm 厚に調整されたシナノキ (*Linden*) の単板 (351.7 kg m^{-3}) 10 枚を積層したものをを用いた。年輪解析には、年輪解析用ソフトウェアである WinDENDRO (WinDENDRO Density 2009b, Regent Instruments, Inc) を使用し、一年輪の幅と容積密度の二項目を測定した (Taki et al. 2012)。海岸クロマツ林の既存の 10 個体に関する解析結果は、Taki らの結果を用いた (Taki et al. 2009, 2012)。

2.2.3 毎木調査

毎木調査は、海岸クロマツ林で 19 地点 (いずれも国有林)、モンゴルカラマツ林で 10 地点、できるだけ立木密度の異なる林分を選定して行い、Forest Window を利用してコンピュータ上で森林を三次元的に描画した (Nobori 2000)。調査対象木は、海岸クロマツ林で樹高 1.2m 以上かつ胸高直径 5.0cm 以上の個体、モンゴルカラマツ林で樹高 1.3m 以上かつ胸高直径 5.0cm 以上の個体とした。調査項目は、胸高直径・根本直径・樹高・枝下高・樹幹幅・根本位置座標である。なお、調査面積については、3 章および 4 章における結果で述べる。

2.2.4 採取試料重量値の算出と重量式の作成

採取した個体の幹重量値は、Stem Density Analyzer (SDA) によって算出した。SDA は、WinDENDRO で計測した一年輪の幅と輪容積密度分布を表示し、これらから年輪毎の幹材積と重量を算出するソフトウェアである。幹重量値は、試料を樹の下部から上部へ 1.0m 毎に採取したことから円錐代の公式を使用して SDA

で幹材積を求め、これに容積密度を乗じて算出した。ここで、SDAにより、自動的に年輪毎の樹高成長・材積成長・重量成長を得ることができる (Nobori 2004)。

SDAにより算出された幹部重量値に諸拡大係数を加え、樹木全体の単木重量を算出するために D^2H との関係を使用した。諸拡大係数を含む単木重量を算出した後、年輪毎の D^2H と年輪毎の重量値との間に近似曲線を求め、これを重量式とした。したがって、胸高直径と樹高から単木重量を算出することが可能となる。拡大係数を含む単木重量 (stW) の算出には、式 (1) を使用した (日本国 2008)。

$$stW = \sum (aw \cdot BEF \cdot (1 + R)) \quad \text{式 (1)}$$

ここで、

stW : 単木重量

aw : 地上高 1.2m における年輪毎の重量 (kg)

BEF : バイオマス拡大係数

R : 地上部地下部比

である。

式 (1) は、地上高 1.2 m における年輪毎の重量値にバイオマス拡大係数と地上部地下部比を乗じて、さらに積算するものである。ここで、日本国が公表している「京都議定書 3 条 3 及び 4 の下での LULUCF 活動の補足情報に関する報告書」によれば、クロマツのバイオマス拡大係数は樹齢 20 年以下を 1.39, 20 年を超える場合は 1.36 としている。また、カラマツについては樹齢 20 年以下を 1.50, 20 年を超える場合は 1.15 としている。地上部地下部比は、クロマツが

0.34, カラマツが 0.29 となっている (IPCC 2003, 日本国 2008)。本研究では、これらの数値を使用することとした。

既存の研究では、重量値と D^2H との関係式として $Y=aX^2$ が使用され、両対数グラフ上に直線で描画されている (Hoque et al. 2010, Chandra et al. 2011, Deshar et al. 2012)。しかし、本研究における D^2H と重量値の関係は、関係式と実測値の間で平均の差の t 検定を行ったところ、 $Y=aX^2$ の式より式 (2) による適合性が良く、これを本研究における重量式として使用した。なお、検定結果については第 3 章および第 4 章の中で述べる。

$$Y_{stW} = a \cdot (1 + D^2H)^b \quad \text{式 (2)}$$

ここで、

Y_{stW} = stW : 単木重量

a と b : 係数

である。

2.3 収量-密度図の作成方法

収量-密度図には、複数の曲線が両対数グラフに描画されている。収量-密度図を構成する、Y-N 曲線 (式 (3)), 最多密度曲線 (式 (4)), B ポイント (式 (5)), B ポイント線 (式 (6)), 等限界直径線 (式 (7)) の各式を以下に示す (Shinozaki・Kira1961, 菊沢 1978b, 1981a, b, c, d, e, f, 1983a, 野堀 et al. 1990)。最後に、自然枯死線は式 (8) を使用した (只木 1963, 守口ら 2011)。また、初期本数密度 (N_0) が 10,000 本/ha である線のみ算出した。なお、本研究では、各曲線の係数は、最小二乗法を自動的に計算できる Microsoft Excel 2010 のソルバー機能を利用した (嘉戸・西村 2004)。

$$1/Y = B/N + A \quad \text{式 (3)}$$

$$Y = bN^{-c} \quad \text{式 (4)}$$

$$N_B = B/A \quad , \quad Y_B = 1/2A \quad \text{式 (5)}$$

$$Y_B = aN_B^{-c} \quad \text{式 (6)}$$

$$N(\dot{D}) = (2a)^{1/2c} \cdot stW(\dot{D})^{-1/2} \cdot A^{[(1/2) \cdot (1-1/c)]} - (2a)^{1/c} \cdot A^{1/c} \quad \text{式 (7)}$$

$$Y(\dot{D}) = (A)^{-1} - (2a)^{1/2c} \cdot stW(\dot{D})^{1/2} \cdot A^{[(1/2) \cdot (1-1/c)]}$$

$$1/N = An \cdot w + 1/N_0 \quad \text{式 (8)}$$

ここで、

$Y(\text{ton/ha})$: 単位面積当たりの積算重量

$N(\text{本/ha})$: 単位面積当たりの積算本数密度

A, B, An : 係数

Y_b および N_b : B ポイント座標

$N(\dot{D})$: 限界直径を持つ積算本数密度

$Y(\dot{D})$: 限界直径を持つ積算重量

w : 平均単木重量

である。

Y-N 曲線は毎木調査データを基に、胸高直径の大きい個体から小さい個体に向かって重量 (ton/ha) と本数密度 (N/ha) をそれぞれ積算したものである (図 6)。最多密度曲線は B ポイント線と同じ傾きを持つものである。したがって、先に B ポイント線を算出することになる。B ポイント線は、各林分の B ポイントにおいて可能な限り最も右上側を通る線を暫定的な B ポイント線とした。B ポイント線を算出した後、それと同じ傾きで Y-N 曲線の最も右上側の林分を通

る線を、本研究での暫定的な最多密度曲線とした。等限界直径線は、任意の直径階について A の値を適当に変化させることで算出した。本研究では、10cm から 70cm について 10cm 間隔で算出した。

等限界直径線の考え方を、図 7～図 9 に示した。これらの図では、ある林分の Y-N 曲線と 10cm～40cm までの等限界直径線を示している。図 7 では、この林分に胸高直径 10cm 以上の個体が約 1500 本/ha あり、総重量は約 300ton/ha であることを示している。さらに図では Y-N 曲線の右端部であることから、これらの値は調査林分としての本数密度と総重量を意味している。図 8 では、胸高直径 20cm との交点を示している。したがって、胸高直径が 20cm 以上の個体を積算すると、約 800 本/ha から 205ton/ha が読み取れる。図 9 でも同様に、胸高直径 30cm 以上の個体を積算すると、約 190 本/ha から 90ton/ha が得られる。ここで示した Y-N 曲線は、胸高直径 40cm の等限界直径線とは交差していない。したがって、理論上この林分の最大胸高直径級は、30cm 以上 40cm 未満であることを意味している。

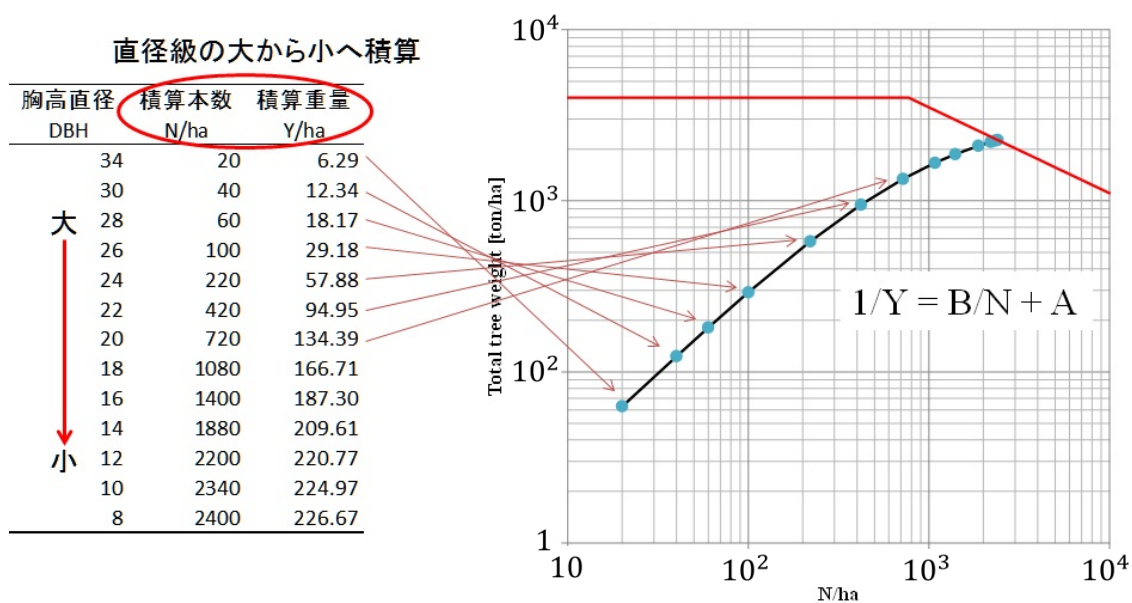


図 6 Y-N 曲線の考え方

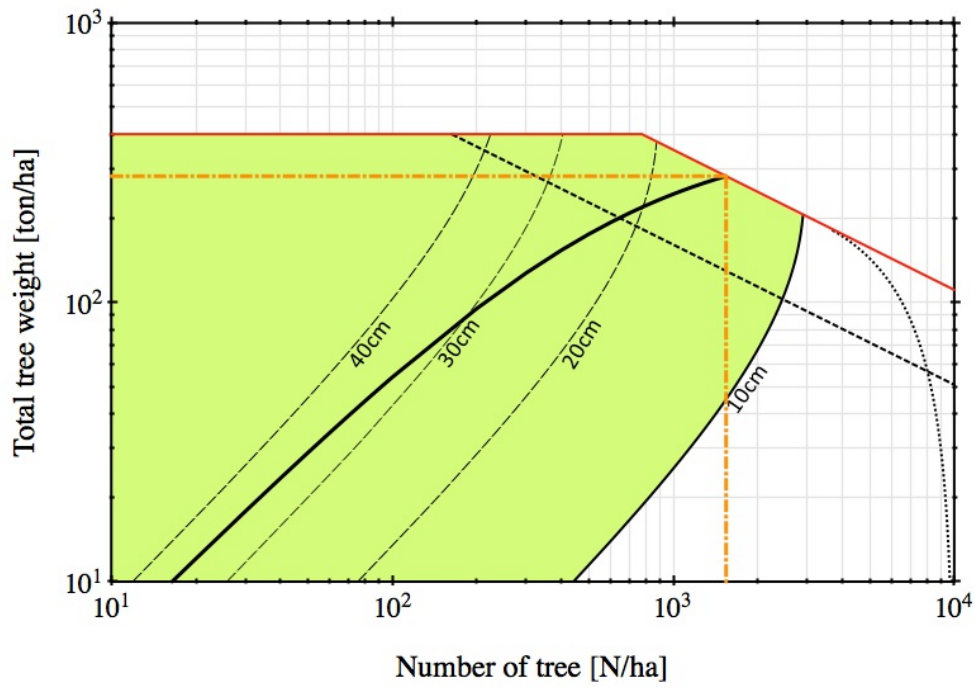


図 7 等限界直径線の考え方-①

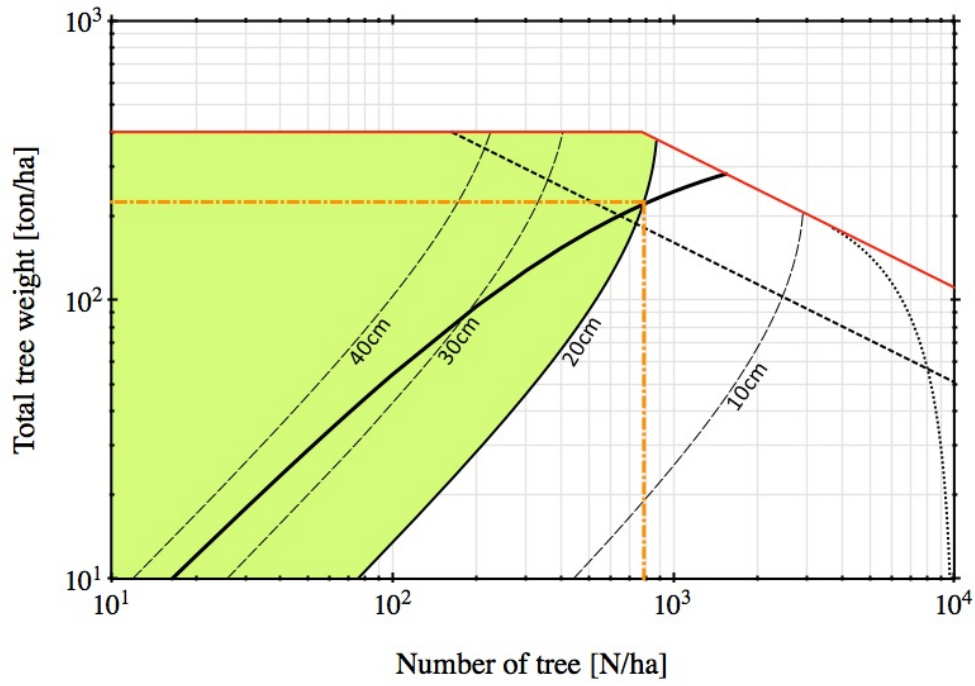


図 8 等限界直径線の考え方-②

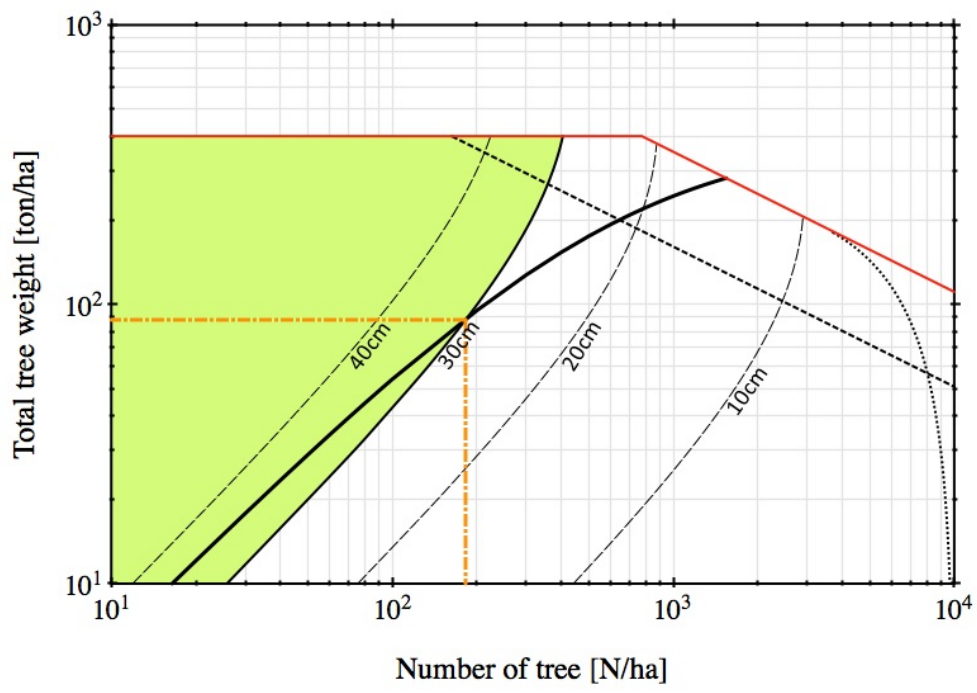


図 9 等限界直径線の考え方③

2.4 林齢別 Y-N 曲線の導入方法

海岸クロマツ林のような無間伐管理されているような森林に対しては、特に「何年後にどうなるのか」という予測が重要である。何年後にどのくらいのバイオマス量になるのかといった予測を行うためには、時間軸が必要となる。そこで、本研究では林齢に着目し、海岸クロマツ林の収量-密度図に時間軸を組み込むこととした。

成長経過の予想には、地位指数曲線（樹高成長曲線）の利用が考えられる。ただし、地位指数曲線は単純一斉林が対象で、上層木平均樹高が基本であるため、間伐方式が下層間伐に限られる（川名ら 2006）。海岸クロマツ林は一斉林ではあるが、海風により樹高成長は頭打ちとなる（真坂 2001）。また、収量-密度図は胸高直径を基準に作成されるものであることから、樹高を基準とする地位指数の利用は適さないと考えた。

河原・長谷川（1987）は、B ポイントと林齢との関係から林齢別 Y-N 曲線を持つ収量-密度図を作成し、林分構造の経年推移を考察している。この研究を参考にし、庄内地域のクロマツ林における平均的な林齢別 Y-N 曲線を算出した。まず、算出された B ポイント線上に乗っている林分の各林齢と Y_b との関係式を作成し、任意の林齢別 Y_b を算出した。つぎに、 Y_b と N_b の関係式を作成し N_b について解くことでそれぞれの B ポイント座標を算出した。最後に、これらの B ポイントを持つ Y-N 曲線を算出することで林齢別 Y-N 曲線を作成した。

第3章 海岸クロマツ林の結果と考察

3.1 結果

3.1.1 樹幹解析および年輪解析

表 1 に樹幹解析に使用した個体の諸データを示した。表 1 より、樹齢の増加に伴う重量値の増加がみられた。約 170 年生の No. 222 個体は、採取した試料の中で最大であった。またこの個体は、幹重量だけで約 1.2ton、総重量では約 2.3ton あった。

各個体の樹幹内容積密度分布の図を、付図 (P. 11~P. 24) に示した。いずれの個体も樹幹内容積密度の変動は、少なかった。また容積密度の変動は、 $300 \text{ kg/m}^3 \sim 400 \text{ kg/m}^3$ の範囲にあった。これは、LULUCF-GPG による 533 kg/m^3 (クロマツ標準容積密度) よりも少ない値であった (IPCC 2003, 日本国 2008)。No. 221 や No. 222 の、年輪幅は狭く、特に最外年に近いほどその傾向が強かった。

表 1 クロマツ樹幹解析試料

個体No	胸高直径 (cm)	樹幹長 (m)	樹齢* (Year/0.2m)	幹重量** (kg)	総重量*** (kg)	幹材積** (m^3)
031	11.0	9.4	35	24.60	44.83	0.04
072	22.0	11.8	30	84.58	154.14	0.22
080	15.0	13.2	34	37.86	69.00	0.09
081	28.8	13.8	33	119.13	217.10	0.31
082	19.0	13.9	34	65.81	120.00	0.14
085	18.0	12.0	34	53.57	97.63	0.12
086	14.0	12.0	31	24.91	45.40	0.06
089	10.0	11.0	31	15.85	28.88	0.03
094	26.0	13.4	36	106.58	194.23	0.29
096	24.0	11.6	35	88.20	160.73	0.23
221	62.0	25.5	161	802.82	1463.06	2.66
222	70.0	27.6	170	1257.73	2292.09	3.02
224	44.0	23.0	64	493.17	898.74	1.33

* 地上高0.2m位置における年輪数

** SDA算出結果

*** 諸拡大係数を含む樹木全体の総重量

3.1.2 毎木調査

表 2 に毎木調査結果を示した。表 2 には、調査地面積、毎木調査結果から得た本数密度、森林簿から得た林齢、胸高直径及び樹高の平均値、後述する重量式から得た林分の積算重量値、胸高断面積合計、平均形状比を示している。表 2 より、いずれの調査地においても林齢の増加に伴う本数密度の減少がみられた。P-08 林分は、林齢が 176 年で積算重量値・平均胸高直径が他の林分と比べて最大値であった。逆に、P-04 林分では、最も積算重量が小さく、併せて林齢・平均胸高直径・平均樹高も最小値であった。この林分は、海に対して最前線の林分であるため、本数密度が高かった。また林分平均形状比は、70 以上の林分が全調査林分の約 1/3 を占めていた。特に、P-01 林分では 85.9 と一番高い値を示した。したがって、P-01 は形状比から判断すると細長い個体が集まった林分であることが示された。各林分の Forest Window 画像を付図 (P. 1~P. 10) に示した。

表 2 クロマツ毎木調査データ

調査地	緯度	経度	調査面積		本数密度 N/ha	林齢 year	平均胸高直径 ± 標準偏差 cm (1.2m height)	平均樹高 ± 標準偏差 m	積算重量 ton/ha	胸高断面積合計 m ² /ha	平均形状比 Height(m)/DBH(m)
			m × m	ha							
P-01	38°47'16.7"	139°45'28.7"	10 × 50	0.050	2400	51	15.9 ± 4.73	13.0 ± 2.36	245.282	52.477	85.9
P-02	38°47'17.7"	139°45'31.3"	10 × 50	0.050	1000	77	21.7 ± 6.59	12.9 ± 3.00	227.236	40.828	62.7
P-03	38°48' 0.4"	139°45'49.7"	10 × 50	0.050	820	53	19.6 ± 6.19	8.0 ± 2.93	143.145	27.005	43.7
P-04	38°48'19.8"	139°45'25.0"	10 × 10	0.010	9000	9	4.6 ± 1.40	3.1 ± 1.15	41.554	17.059	68.7
P-05	38°47'31.3"	139°45'35.1"	10 × 50	0.050	1380	53	18.1 ± 5.00	12.7 ± 2.42	190.388	38.258	72.8
P-06	38°47'13.7"	139°45'29.9"	10 × 50	0.050	940	77	24.1 ± 5.65	13.7 ± 2.55	259.941	45.528	59.3
P-07	38°57'23.2"	139°50'31.8"	10 × 50	0.050	460	176	36.9 ± 6.97	28.2 ± 2.78	367.457	51.566	78.7
P-08	38°57'23.2"	139°50'31.8"	10 × 50	0.050	400	176	39.1 ± 10.03	25.8 ± 3.82	387.181	51.233	69.3
P-09	38°57'23.2"	139°50'31.8"	10 × 50	0.050	340	176	38.1 ± 5.57	28.6 ± 2.28	281.217	39.685	76.5
P-10	38°57'23.2"	139°50'31.8"	10 × 50	0.050	420	176	37.5 ± 10.85	25.7 ± 4.14	368.630	50.228	72.6
P-11	38°47'18.0"	139°45'25.9"	10 × 25	0.025	2240	43	14.1 ± 3.16	10.0 ± 1.70	159.603	37.611	74.3
P-12	38°47'17.4"	139°45'27.0"	10 × 25	0.025	1920	43	14.6 ± 3.43	10.0 ± 1.82	156.064	35.412	71.2
P-13	38°47'35.0"	139°45'36.5"	10 × 25	0.025	2160	53	15.6 ± 3.86	10.1 ± 1.92	199.720	44.284	66.5
P-14	38°51'39.0"	139°47'55.2"	10 × 25	0.025	2040	43	15.5 ± 3.82	10.0 ± 1.91	186.673	41.507	66.7
P-15	38°47'15.7"	139°45'26.6"	20 × 20	0.040	2175	43	14.6 ± 3.71	10.4 ± 1.97	174.504	39.757	73.8
P-16	38°51'40.2"	139°47'54.8"	10 × 50	0.050	280	110	35.7 ± 5.25	19.6 ± 2.15	205.389	29.556	55.1
P-17	38°51'40.2"	139°47'54.8"	10 × 50	0.050	320	110	33.7 ± 6.97	18.6 ± 2.89	206.222	30.040	60.0
P-18	38°51'40.2"	139°47'54.8"	10 × 50	0.050	340	110	38.8 ± 12.08	18.2 ± 4.64	339.676	44.435	49.2
P-19	38°51'40.2"	139°47'54.8"	10 × 50	0.050	360	110	32.7 ± 6.94	18.8 ± 2.76	213.372	32.308	59.2

3.1.3 胸高直径と樹高の相対成長関係

図 10 に海岸クロマツ林における胸高直径と樹高との相対成長関係を示した。図の作成にあたっては、樹幹解析と年輪解析のデータを使用し、胸高部 1.2m における年輪毎の積算直径値と年輪毎の積算樹高値をプロットした。さらに、累乗式による近似 (式 (9)) を行った。

$$TH = 1.7383DBH^{0.6879} \quad (r = 0.9687, P < 0.001) \quad \text{式 (9)}$$

ここで、TH は樹高 (m)、DBH は胸高直径 (cm) である。

海岸クロマツに関する相対成長式には、対数近似によるものが存在する。また、胸高直径と樹高との間には強い相関が認められている (山形県森林研究研修センター 2008)。ところが、これまでの相対成長式では測定した直径値の範囲以外への汎用性は低い。樹幹解析と年輪解析による年輪毎の情報から算出された相対成長式であれば、胸高直径に達した個体から、測定した胸高直径の最大値まで使用することができる。

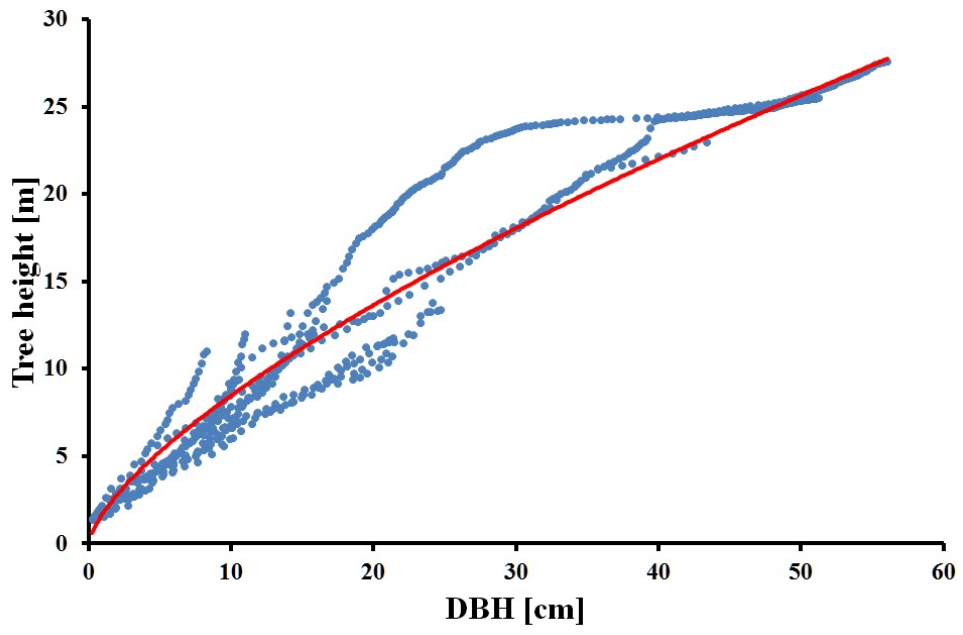


図 10 クロマツ胸高直径と樹高の相対成長関係

3.1.4 重量式

図 11 と図 12 に D^2H と総重量との関係を示した。図 11 は両対数軸，図 12 は線形軸で，横軸に D^2H ，縦軸に式 (1) により算出した年輪毎の諸拡大係数を含めた樹木全体の総重量を示した。これらを式 (2) で近似し，式 (10) を得た。既存の研究における $Y=aX^b$ による値と実測値との間で，平均の差の t 検定を行ったところ， $|t|=11.1670$ $P=0.0000$ ($P<0.05$) であり，有意な差があるという結果となった。式 (10) による値と実測値においても t 検定を行ったところ， $|t|=1.440$ $P=0.1502$ ($P>0.05$) であり，有意差無しという結果となったことから，統計的に式 (10) による方は実測値との間に差がないものと判断した。

$$Y_{stW} = 0.0446(1 + D^2H)^{0.9455} \quad (r = 0.9882, P < 0.001) \quad \text{式 (10)}$$

ここで， Y_{stW} は重量値 (kg) を示している。樹幹解析と年輪解析によるデータを用いることでサンプル数を増やすことが可能となるため，重量式としての精度を高めた。

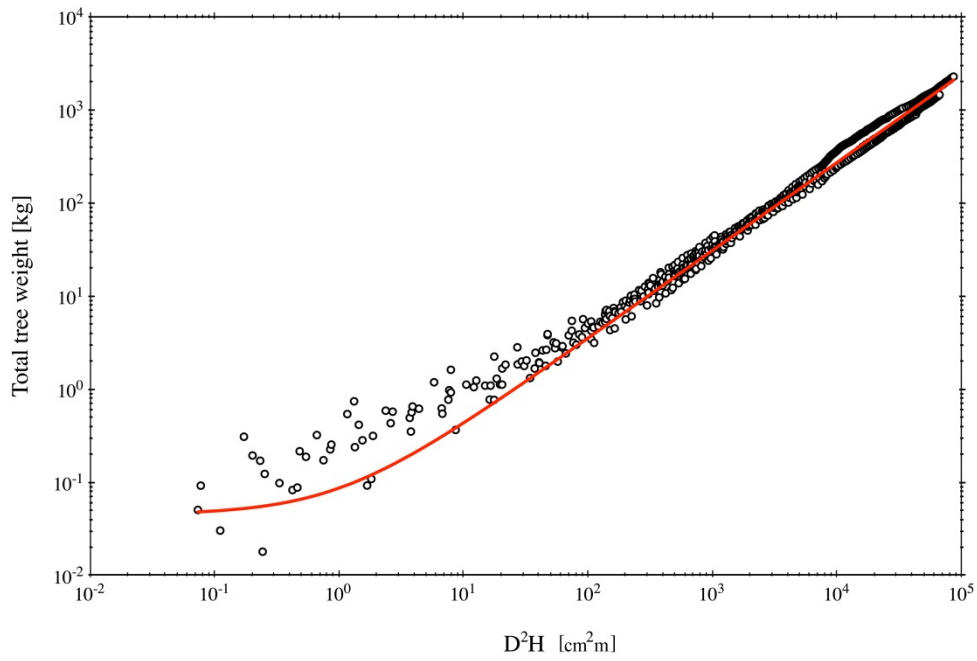


図 11 クロマツ D^2H と総重量の関係 (両対数軸)

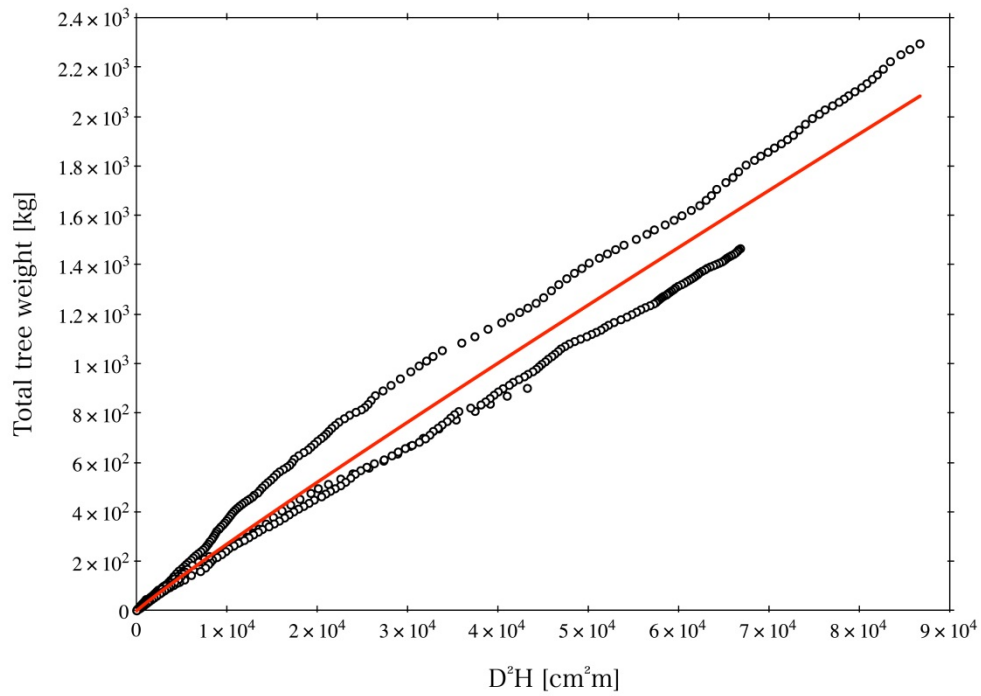


図 12 クロマツ D^2H と総重量の関係 (線形軸)

3.1.5 収量-密度図

図 13 に重量値による各林分の Y-N 曲線を示した。図 13 は横軸に本数密度 (N/ha), 縦軸に総重量 (ton/ha) をそれぞれ対数軸で表したものである。また, 図 14 に各林分の B ポイントと B ポイント線および最多密度曲線を示した。表 3 には, 各林分の Y-N 曲線係数と B ポイント座標を示した。ここで, B ポイント線は可能な限り最外側に引くものとし, 本研究では P-01・P-08・P-13 の 3 林分の B ポイントを通る線を B ポイント線とした。この際, P-07 と P-09 の 2 林分が設定した B ポイント線を越えてしまうが, B ポイント線が暫定的な線であるためこのまま使用した。B ポイント線は, 式 (11) で示される。

$$y = 5670.0397x^{-0.5075} \quad \text{式 (11)}$$

ここで, x は本数密度 (N/ha), y は総重量 (ton/ha) を示している。

最多密度曲線は, B ポイント線と平行で, かつ各林分の総重量値のうち最外側の点を通るように設定した。本研究では, P-01 林分を通り B ポイント線と同じ傾きを持つ線を暫定的な最多密度曲線とした。本研究における最多密度曲線は, 式 (12) で示される。

$$y = 12733.9210x^{-0.5075} \quad \text{式 (12)}$$

ここで, x は本数密度 (N/ha), y は総重量 (ton/ha) を示している。式 (12) の通り, 最多密度曲線の傾きは -0.507 となった。

ところで, 図 13 と図 14 だけでは, 調査林分の現状と林分同士の相互関係を把握することしかできず, 具体的な数値の把握や今後の予測などには適さない。このため, 海岸クロマツ林における一般的な重量値による収量-密度図の作成を

行う必要がある。本研究では林齢に着目し、収量-密度図に時間軸として林齢を組み込むことにした。

図 15 に B ポイント線上 (付近:ただし B ポイント線を超えないものとする) にある林分の林齢と YB の関係を示した。本研究では P-01, P-06, P-08, P-13, P-14, P-16 の 6 林分を使用した。つぎに、YB と NB との関係を図 16 に示した。図 15 および図 16 に、相関係数の一番高い近似式を当てはめたところ、図 15 の多項式近似曲線は式 (13)、図 16 の累乗近似曲線は式 (14) であった。

$$y = -0.0037x^2 + 2.1665x + 61.1782 \quad (r = 0.9944 \quad P < 0.001) \quad \text{式 (13)}$$

$$y = 16579136.9975x^{-1.9081} \quad (r = 0.9901 \quad P < 0.001) \quad \text{式 (14)}$$

ここで、式 (13) の y は YB を、x は林齢を示しており、式 (14) の y は NB を x は YB を示している。

まず、式(13)を使用して任意の林齢階に対する YB を算出した。つぎに式(14)を使用して NB を算出し、林齢別の B ポイント座標を求めた。これらの B ポイント座標を持つ Y-N 曲線の係数 A と B を算出した。最後に、Y-N 曲線式の N 値を任意で移動させることで林齢別 Y-N 曲線を求めた。

算出された林齢別 Y-N 曲線係数とその B ポイント座標を表 4 にまとめた。また、式 (7)・式 (8) による等限界直径線と自然枯死線を加えたものを図 17 に示す。これが、海岸クロマツ林における収量-密度図である。

ここで、式 (7) による等限界直径線の諸係数は $a = 5670.0397$ 、 $c = 0.5075$ 、式 (8) による自然枯死線の An は 0.00325 であった。なお、 An はエクセルのソルバー機能で算出した。図 17 では等限界直径線を 4cm から 70cm まで、林齢別 Y-N 曲線を 10 年から 200 年までを示した。

最後に、作成した収量-密度図の精度について検証した。方法は、図 18 で示

すように、収量-密度図に実測した各林分の Y-N 曲線を描画し、等限界直径線と各 Y-N 曲線との交点を算出し、その Y 座標を理論重量値とした。この値と、実測した各直径階の重量値を実測重量値との関係を、図 19 のグラフで比較した。

図 19 は、横軸に毎木調査データに基づく重量値（実測値）をとり、縦軸には各調査林分の Y-N 曲線と等限界直径線との交点における重量値（理論値）をとったものである。直線式で近似し、95% 予測信頼限界と 95% 推定信頼限界のそれぞれ上限値と下限値を示した。

実測値と理論値との関係式は、理論上では $y=x$ に限りなく近くなることが期待される。ところが、図 19 では傾きが 1.079 であったことから、理論値の方が実測値よりも約 8% 程度大きく、95% 予測信頼限界の範囲も、図の右側ほど傾き (1.079) にあわせて上方に偏った。

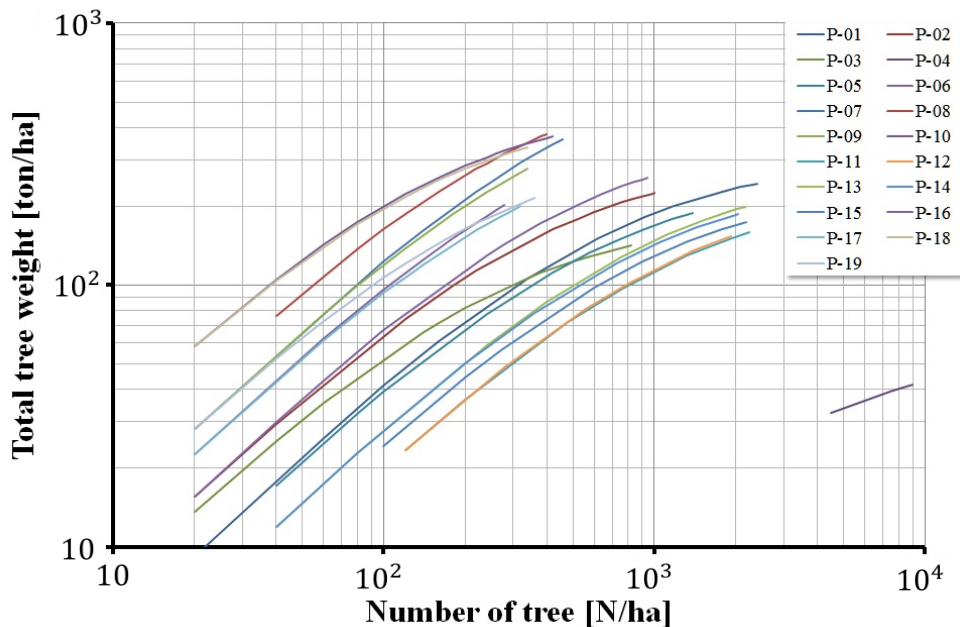


図 13 クロマツ各林分 Y-N 曲線

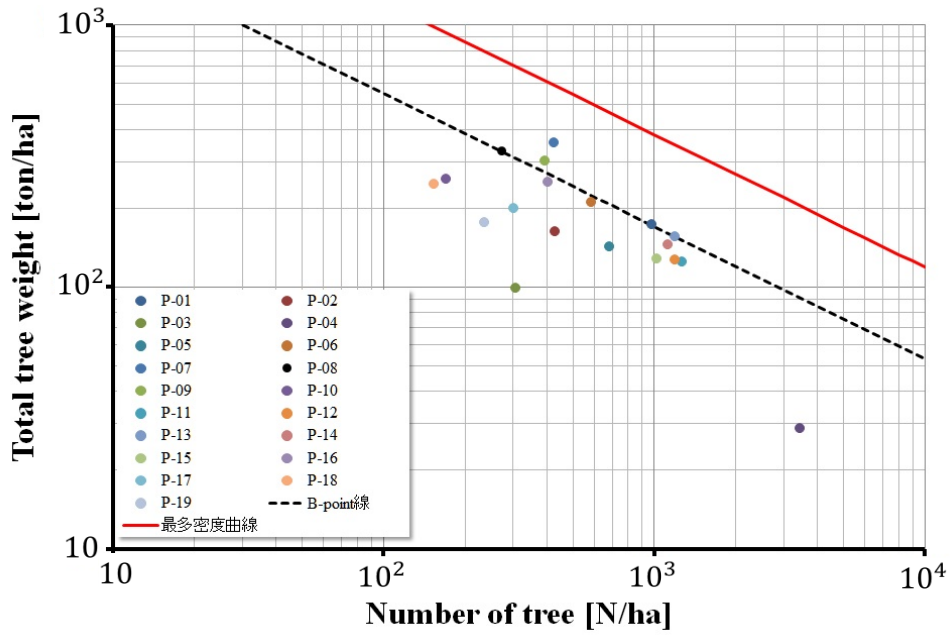


図 14 クロマツ各林分 B ポイントと B ポイント線および最多密度曲線

表 3 クロマツ各林分 Y-N 曲線係数および B ポイント座標

調査地	Y-N 曲線係数		B-point	
	A	B	NB	YB
P-01	0.00290	2.82740	975.34753	172.48150
P-02	0.00308	1.32211	429.45202	162.41145
P-03	0.00507	1.56714	308.80864	98.52644
P-04	0.01738	60.20786	3465.11977	28.77631
P-05	0.00351	2.40654	685.90660	142.50891
P-06	0.00237	1.39109	587.66613	211.22469
P-07	0.00141	0.60269	427.07913	354.30830
P-08	0.00153	0.42191	276.11499	327.22345
P-09	0.00164	0.65007	395.42045	304.13655
P-10	0.00193	0.32907	170.57132	259.16903
P-11	0.00400	5.08034	1270.86568	125.07689
P-12	0.00395	4.72073	1195.44843	126.61682
P-13	0.00322	3.85182	1194.81959	155.09786
P-14	0.00345	3.88893	1127.02399	144.90185
P-15	0.00390	3.98595	1022.58478	128.27375
P-16	0.00199	0.80470	403.38119	250.64128
P-17	0.00250	0.75246	301.25730	200.18262
P-18	0.00203	0.31136	153.51526	246.52270
P-19	0.00283	0.66771	235.78069	176.55943

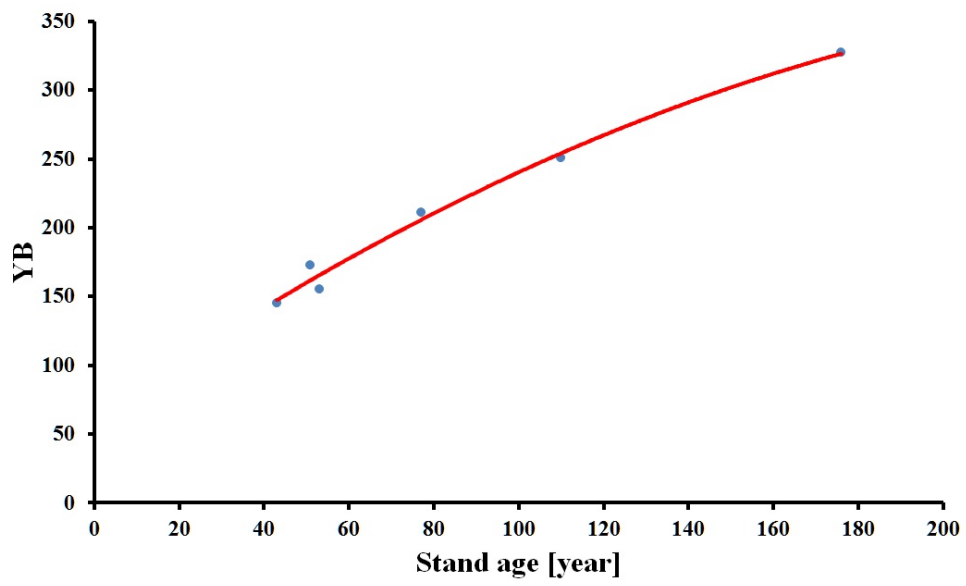


図 15 クロマツ樹齢と YB の関係

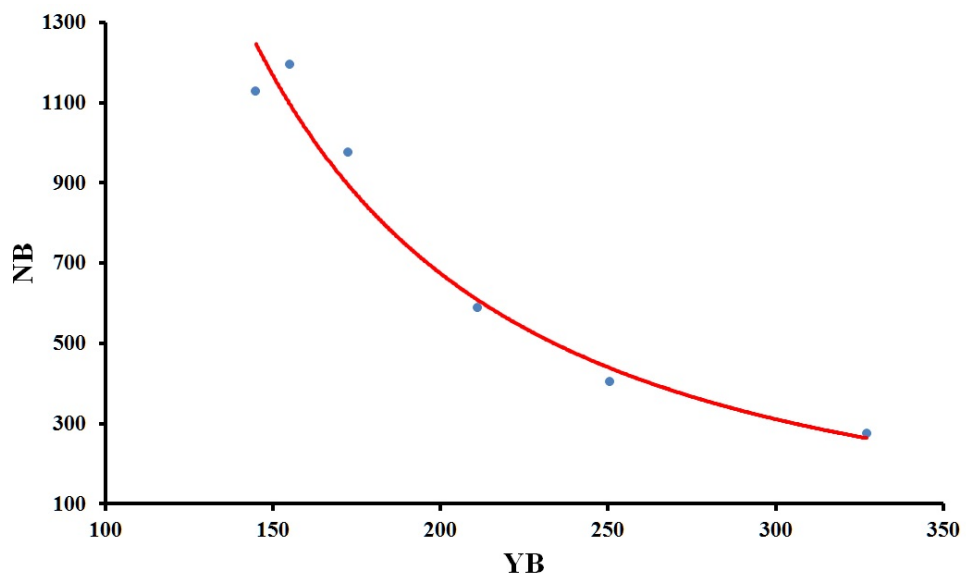


図 16 クロマツ YB と NB の関係

表 4 クロマツ各林齢 Y-N 曲線係数および B ポイント座標

林齢	Y-N 曲線係数		B-point	
	A	B	NB	YB
10	0.00606	22.17276	3657.13054	82.46900
20	0.00485	11.61206	2392.36180	103.01192
30	0.00407	6.96499	1710.69825	122.80693
40	0.00352	4.57953	1299.24849	141.85403
50	0.00312	3.21797	1030.73799	160.15321
60	0.00281	2.37819	845.22924	177.70448
70	0.00257	1.82868	711.38412	194.50784
80	0.00237	1.45200	611.47622	210.56329
90	0.00221	1.18396	534.84301	225.87083
100	0.00208	0.98728	474.74631	240.43046
150	0.00166	0.50869	307.25711	302.00990
200	0.00145	0.34575	238.49532	344.89155

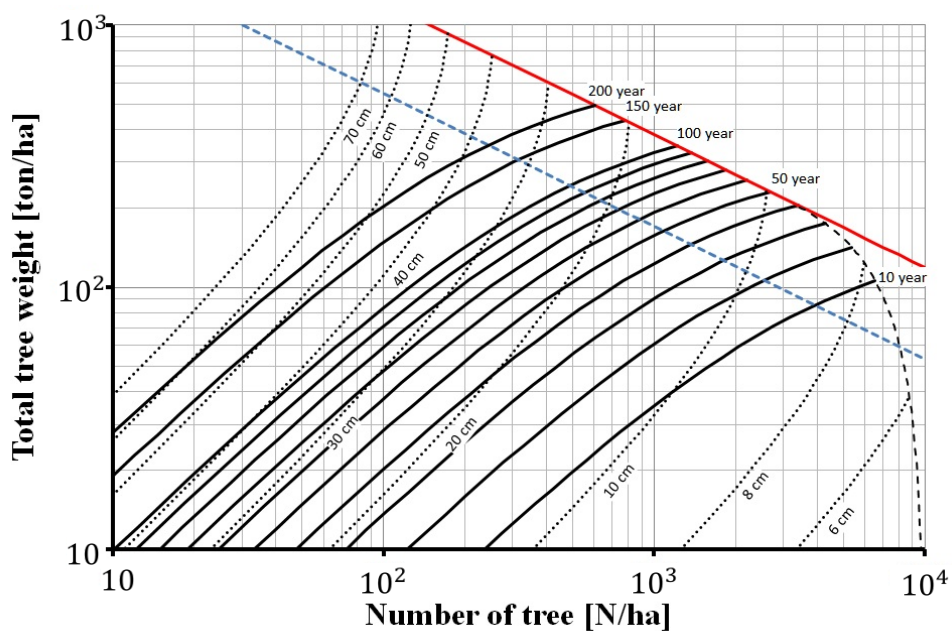


図 17 クロマツ収量-密度図

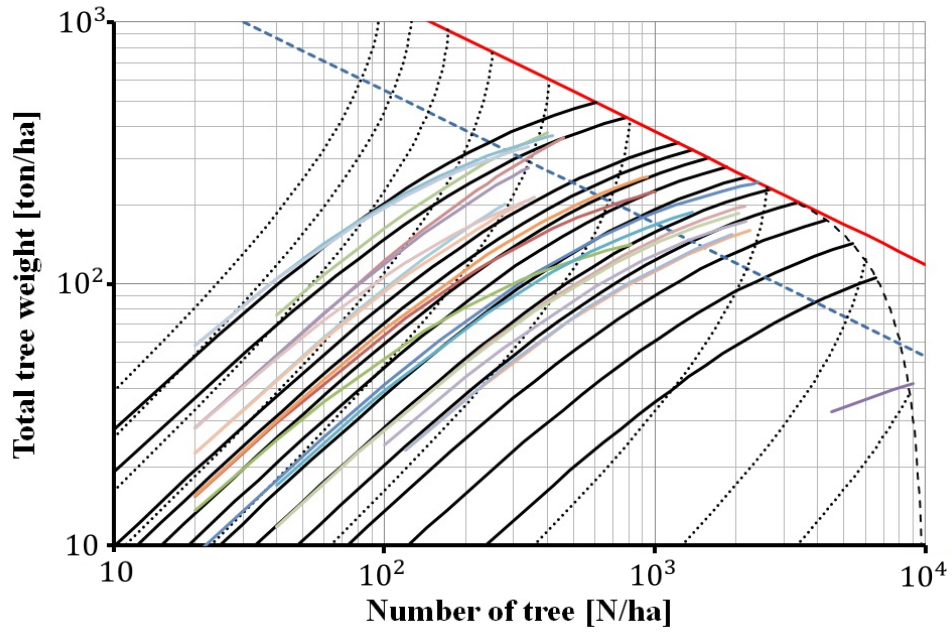


図 18 クロマツ収量-密度図と各林分の Y-N 曲線

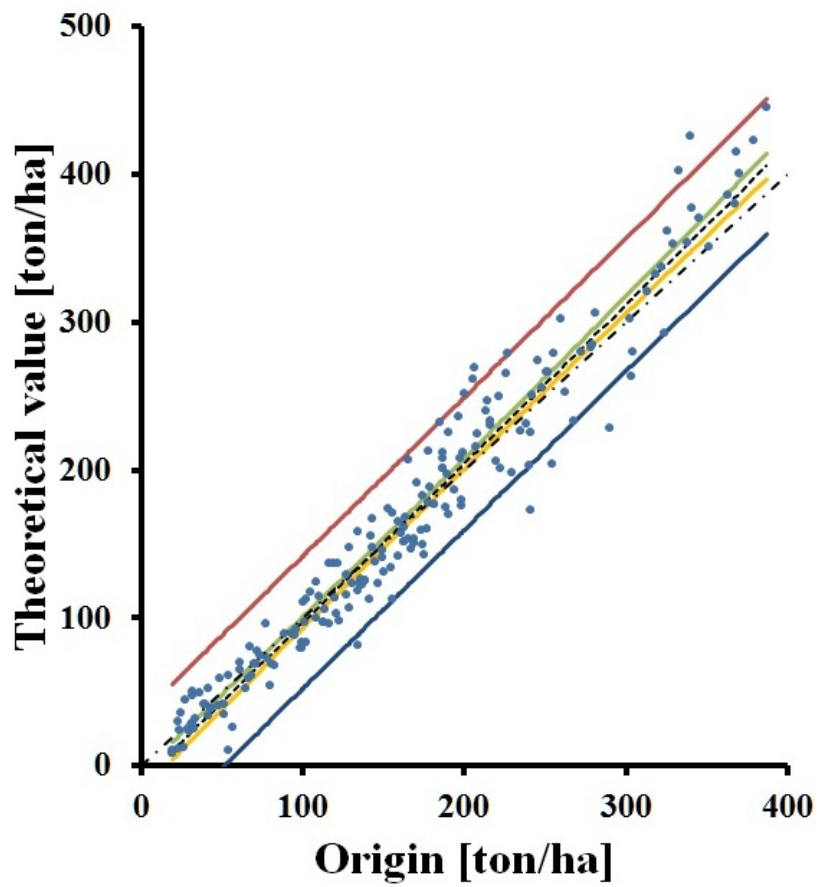


図 19 実測重量値と理論重量値の関係

3.2 考察

3.2.1 重量値による収量-密度図と収量-密度図からみた海岸クロマツ林の概況

図 13 から、積算本数密度が多い林分ほど積算重量は少ないことがわかる。同様に、それぞれの林分における最大個体（図中左側）の重量も減少していることがわかる。Y-N 曲線は最大個体から最小個体へ積算していくことで求められるのだから、図中左上側にある林分ほど最大個体の重量が大きいことを示している。重量成長に関する相対成長関係を考えるとき、左上側にある林分ほど構成されている個体サイズが大きいことが推察できる。

図 14 において、菊沢は B ポイントの Y 座標 (YB) の値が同じである時、N 座標 (NB) が右側にくる林分ほど最大個体の重量が減少するとし、そのような林分は個体サイズの違いが少なくよくそろった林であるとしている (菊沢 1983a)。ところが、本研究では、同じ YB の値を持つ林分はなかった。そこで、表 3 における B ポイントの N 座標 (NB) と、表 2 における平均胸高直径および平均樹高の各標準偏差 (絶対値) および各変動係数との関係を調べた。

まず、標準偏差について考察した。図 20 は NB と平均胸高直径の標準偏差の関係を X 軸に対数軸を持つ片対数グラフで示しており、同様に樹高については図 21 に示した。式 (15) は平均胸高直径、式 (16) は平均樹高の近似式である。

$$y = 245.9930x^{-0.6070} \quad (r = 0.9565 \quad P < 0.001) \quad \text{式 (15)}$$

$$y = 30.5915x^{-0.3979} \quad (r = 0.9262 \quad P < 0.001) \quad \text{式 (16)}$$

ここで、式 (15) の x は NB 値、Y は平均胸高直径の標準偏差、式 (16) の x

は NB 値、Y は平均樹高の標準偏差である。

図 20 と図 21 から、平均胸高直径および平均樹高の各標準偏差は各林分の B ポイントの N 座標 (NB) と非常に高い相関関係がみとめられた。これは、NB の増加に伴って平均のバラツキ具合を表す標準偏差の範囲が小さくなる、すなわち標準偏差からみると林分同士を比較したときに NB の大きい方が個体サイズの違いが少なくてよくそろい高密度の林分であることを表している。これは、NB の値が小さいほど林齢が高く、林齢が高いと個体サイズも大きくなると考えられるため、標準偏差が大きくなるのは当然の結果と考えられる。

続いて、NB と平均胸高直径および平均樹高の変動係数との関係について考察した。図 22 に NB と平均胸高直径の変動係数との関係を X 軸に対数軸を持つ方対数グラフを示した。同様に樹高については、図 23 に示した。

図 22 より、NB の増加に伴って変動係数は約 25~30% の範囲に収束するようにみえる。また、図 23 については、NB の増加に伴って約 15~20% の範囲に収束するようにみえる。さらに、どちらも NB が小さくなると変動係数の範囲が広がる傾向がみられた。このことから、変動係数で林分同士を比較すると、NB が大きいすなわち林齢が低い林分であっても、胸高直径であれば約 30% 前後、樹高であれば約 20% 前後の変動係数であることがわかった。特に、図 23 上において最右上に位置する林分については平均樹高の変動係数が 37% であり、他の林分と比べると NB に対して非常に大きい値であることがわかる。しかし、図 22 の胸高直径においては、大きな値を示していない。したがって、クロマツが植栽時に過密状態であることから、植栽後の成長過程において直径成長よりもむしろ樹高成長の個体間競争が起こっていると推察した。これは、クロマツが陽樹であることが要因の一つであると考えられる。

作成した収量-密度図の精度については、菊沢 (1983b) の「林分の緊密度とそれを応用した収量-密度図の改良」で示されている林分緊密度でいえば、理論

値が緊密度 1.0 である。これに対して、実測した林分の中にはそれに満たない林分が含まれていたことになる。また、図 19 において傾きが上方に偏ったことから、各直径階の実測値がそれぞれの等限界直径線よりも左側に多く分布していたといえる。逆に、理論上の $y=x$ の線よりも下側に位置する点については、等限界直径線よりも右側に位置していたといえる。

等限界直径線を仮に菊沢の示した「限界直径に関する最多密度曲線」として、各限界直径点の最外側に等限界直径線を引くならば、当然多くの林分はこの線の左側に位置することになる（菊沢 1980）。したがって、実測値よりも理論値の方が大きくなることが推察できる。これ以外にも、菊沢は点のばらつきは大きいものの傾向を示す線として等限界直径線を報告している（菊沢 1978a, b, 1979, 1983a, b）。等限界直径線は直径階毎の総重量に対する本数密度の最大値を結んだ線であることから、必然的に平均値より大きくなる。この結果、本研究では実測値よりも理論値の方が約 8% 増であったわけである。この誤差を把握した上であれば実用に耐えうる十分な精度の範囲内であると判断した。

続いて、林齢別 Y-N 曲線の導入について、図 15 と図 16 に示したように、YB の時間的推移や YB と NB の関係についてそれぞれ強い相関関係が得られた。特に YB の時間的推移については、海岸クロマツ林が一斉林的で各林分が単層林であるために、林分としての絶対成長関係が成立するものと考えられる。

実際に林齢別 Y-N 曲線をみると、初期植栽が 10,000 本/ha の林分であれば、約 40 年生の時点で最多密度に達する。また、その時の総重量は約 200ton/ha であることが読み取れる。さらに、その時点では胸高直径 20cm 以上の個体が 250 本/ha であるが、30cm に達する個体は存在しないことが読み取れる。

ところが、毎木調査の結果では、林齢が 10 年程度であれば積算重量は約 40ton/ha、40 年程度では約 150ton/ha に達していた。さらに、70 年程度では約 200ton/ha、100 年を超えれば 400ton/ha 近くになる傾向が推察できる。

このように、実際の林齢と林齢別 Y-N 曲線による推定林齢とは差が生じた。実際の林齢と林齢別 Y-N 曲線による推定林齢との差を表 5 に示し、林齢別 Y-N 曲線の算出に用いた林分には下線をしるしてある。表 5 より、林齢別 Y-N 曲線の方が全体的に過小推定されることがわかった。この理由として、B ポイント線上にある B ポイント (YB) を基準にして林齢別 Y-N 曲線を算出したことが考えられる。B ポイント線は B ポイントの中でも最右上に位置する点を通るように引かれる。同様に、最多密度曲線も最右上に位置する林分に接するように引かれる。このことから、B ポイント線上に B ポイントを持つ林分は、自ずと最多密度に達している林分であることが推察できる (菊沢 1983a)。当然ながら、B ポイント線に達していない林分では、同じ NB の時 “B ポイント線上の YB 値” よりも “実際の YB 値” が小さい。そのため、“実際の YB 値” を持つ異なった林齢別 Y-N 曲線の林齢 (YB 値と B ポイント線の交点を通る Y-N 曲線) が算出される。したがって、B ポイント線に達していない林分は林齢別 Y-N 曲線による推定林齢と一致しないと考えられる。

B ポイントは林分同士の相互関係を相対的にみることが出来る点である。したがって、B ポイントを基準とした林齢別 Y-N 曲線であれば、これにより算出される林齢は相対値として評価することができると考えられる。すなわち、実際の林齢が 51 年 (表 5 の P-01 林分) であるのに対して推定林齢が 55 年であれば、P-01 林分は 55 年に相当するバイオマスを保持しており、約 4 年分成長量が多いと評価することができる。逆に、P-12 林分であれば、実際が 43 年であるのに対して、推定林齢からは約 31 年生の林分に相当するバイオマスしかないということになる。

以上のことから、林齢別 Y-N 曲線を導入することで従来の収量-密度図に新たに時間軸を組み込んだことになる。また、時間軸を使った相対的な評価が可能となる。今後、海岸クロマツ林を炭素吸収源としてとらえるとき、高炭素蓄積

に向けた密度管理に応用できる可能性が示唆された。

最後に、本研究で作成した収量-密度図の汎用性について述べる。Takiらは、クロマツの容積密度は地域による差があるとしている。さらに、LULUCF-GPGによる値とも違うことから全国一律の容積密度値を用いることで、バイオマス量算出の際の誤差になると報告している (Taki et al. 2012)。したがって、重量値は幹材積に容積密度を乗じて算出されるため、重量値による収量-密度図は地域毎に作成していく必要があるといえる。

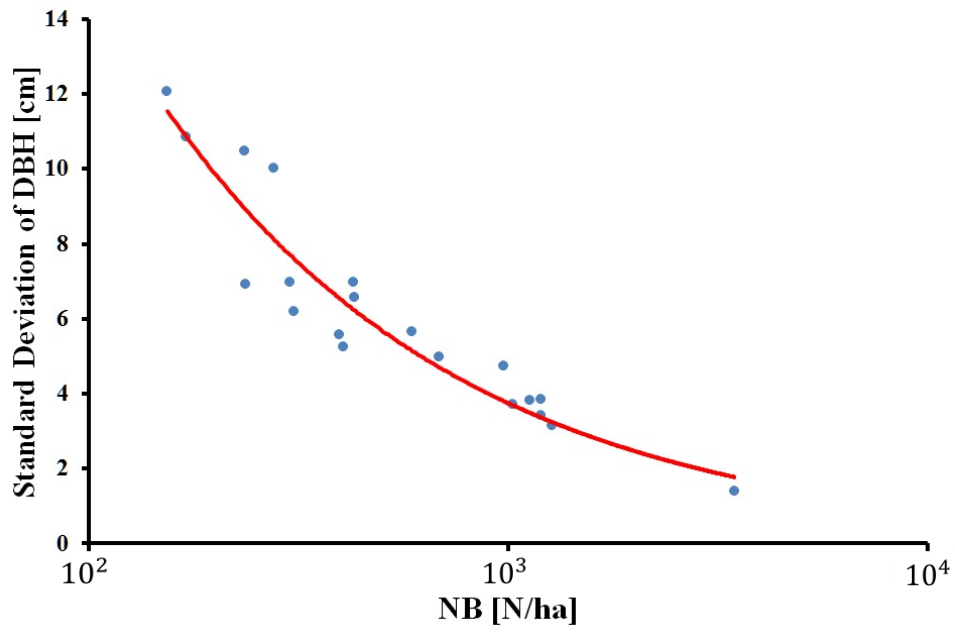


図 20 クロマツ NB と平均胸高直径の標準偏差の関係

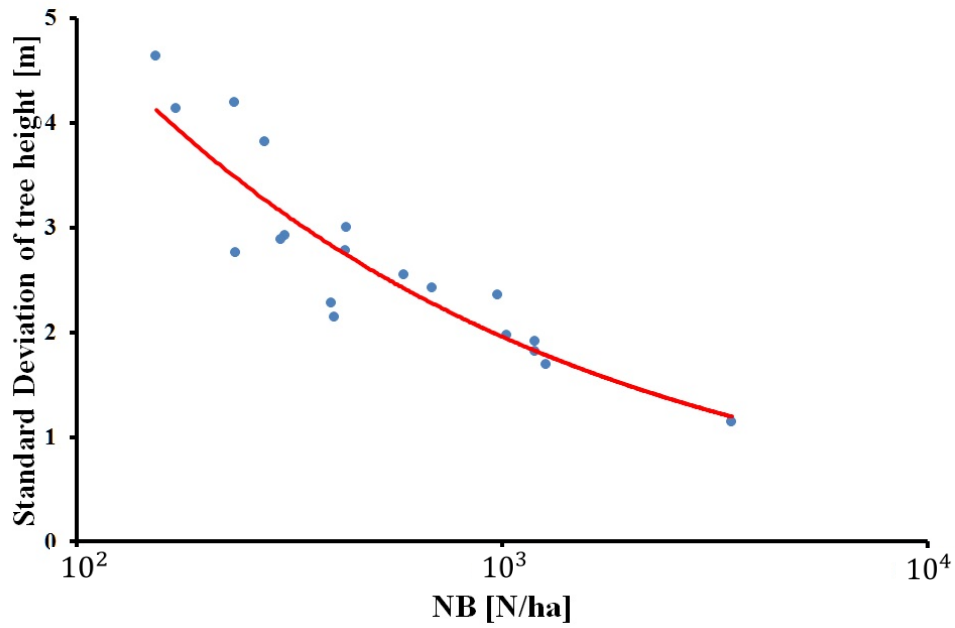


図 21 クロマツ NB と平均樹高の標準偏差の関係

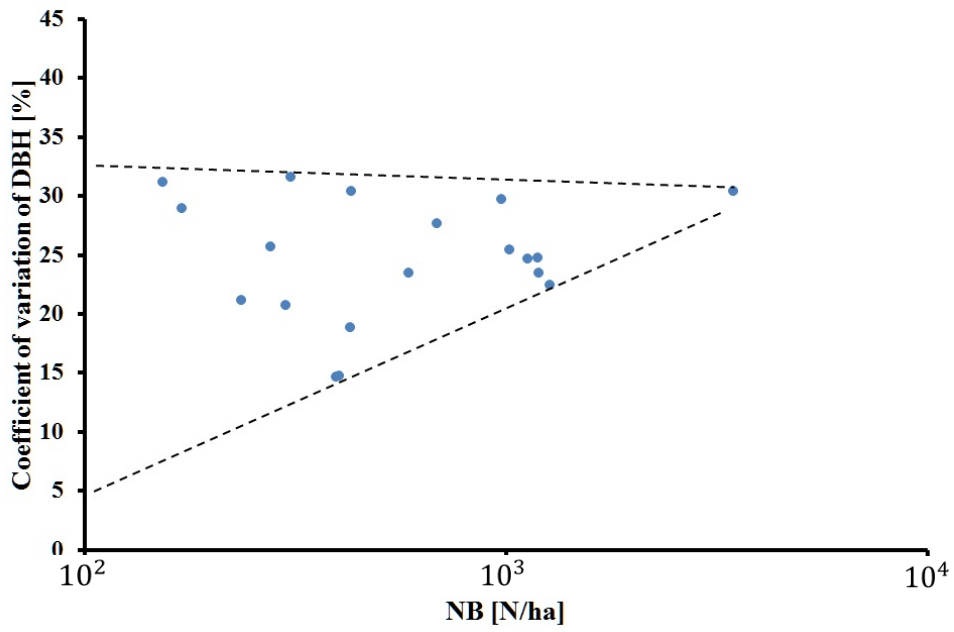


図 22 クロマツ NB と平均胸高直径の変動係数の関係

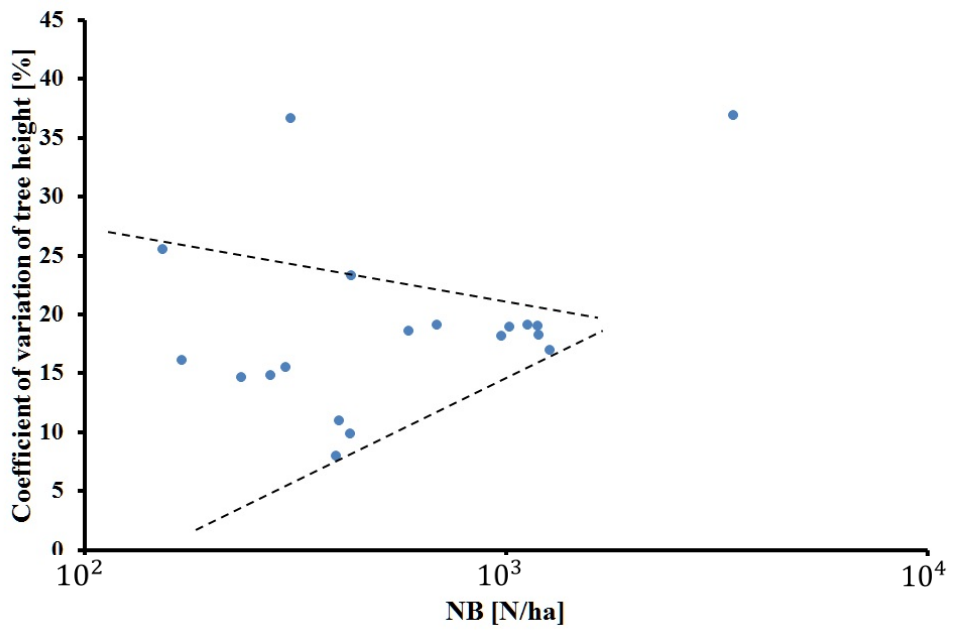


図 23 クロマツ NB と平均樹高の変動係数の関係

表 5 実林齢と林齢別 Y-N 曲線による推定林齢の差

調査地	林齢		林齢差 Es - Or
	Origin	Estimate	
P-01	<u>51</u>	<u>55.5</u>	<u>4.5</u>
P-02	77	49.6	-27.4
P-03	53	18.5	-34.5
P-04	9	-3.3	-12.3
P-05	53	38.8	-14.2
P-06	<u>77</u>	<u>80.5</u>	<u>3.5</u>
P-07	176	206.7	30.7
P-08	<u>176</u>	<u>178.8</u>	<u>2.8</u>
P-09	176	156.4	-19.6
P-10	176	116.9	-59.1
P-11	43	30.2	-12.8
P-12	43	30.9	-12.1
P-13	<u>53</u>	<u>45.5</u>	<u>-7.5</u>
P-14	<u>43</u>	<u>40.0</u>	<u>-3.0</u>
P-15	43	31.7	-11.3
P-16	<u>110</u>	<u>110.0</u>	<u>0.0</u>
P-17	110	73.0	-37.0
P-18	110	106.7	-3.3
P-19	110	57.9	-52.1

3.2.2 材線虫被害木除伐を想定した森林動態シミュレーション

作成した海岸クロマツ林のための収量-密度図を用いて、海岸クロマツ林の森林動態をシミュレーションすることが可能である。海岸クロマツ林が完全なる無間伐状態であれば、初期植栽密度の多さから、いずれの場所で調査をしてもおそらく最多密度に達した林分がほとんどであることが推察される。ところが、本研究において調査地の Y-N 曲線を算出した際、最多密度に達していない林分がみられたことから類推すると、実際にはある程度の伐採が行われていると考えられる。その理由として考えられるのは、材線虫病にかかったクロマツの除伐である。

表 6 に本研究における調査地で 2011 年度に伐採されたクロマツの本数とその本数密度を示した。単位面積当たり多いところで、40 本～50 本程度除伐されたようであった。さらに、図 24 の伐採された個体の直径階別本数分布をみると、胸高直径が約 20cm 以下の個体であることがわかった。仮に、毎年同じように 20cm 以下の個体を伐採し続けたとすれば、いつまでたっても 20cm 以上の大きさの林分を造ることができないことになると考えた。そこで、収量-密度図を使って、材線虫被害木の除伐によるバイオマスの変化とその後 5 年間の経年変化をシミュレーションした。ここでは、最多密度に達していた P-01 林分についてのみシミュレーションを行った。また、2011 年度に P-01 林分に対して行われた図 24 上の伐採実績（194 林班は 1 小班）における直径階別本数を、5 年間にわたり毎年繰り返し減算するものと仮定した。

間伐後の成長予測について、菊沢（1983a）は「北海道の広葉樹林」の中で、間伐率が 40%以下であれば長期間にわたって林分としての成長量は一定であることから、大きい木ほど成長率も大きいとしながらも、間伐することで下層木の成長率も増加すると考えられることから、結果的に成長率は大きい木でも小さい木でも同じであると仮定して、一定の林分成長量を加算する手法で間伐

後のシミュレーションを行っている。川名らは「造林学」の中で、収量-密度図の問題点の一つに成長量のおさえ方を挙げているが、その具体例については書かれていない（川名ら 2006）。いずれにせよ、本研究では林分の経年変化を調査したデータが無い場合、林分としての成長量の算出は困難である。

個体の連年成長および総成長の変化に着目すると、連年成長量および総成長量は加齢に伴い増加量は変動する。そこで、毎木調査データにおいて、各林分を構成する個体毎にシミュレーションを行う期間（年数）の連年成長量の積算値を算出し、これを調査時点の個体サイズに加算することで予測時点の個体サイズを推定した。この際、調査時点での連年成長量の推定とシミュレーションを行う期間（年数）の加算を行うために、個体サイズに応じた樹齢を推定した。推定樹齢に応じた単木の連年成長量を算出し、シミュレーションを行う期間（年数）分の連年成長量を積算した。この手法は、樹齢に伴う肥大成長および樹高成長の変化を加味することができる。

毎木調査データにおける個体サイズから樹齢を推定するために、樹幹解析と年輪解析を行った個体から、胸高部における年輪毎の積算直径値と年輪数（樹齢）との関係について近似式（式（17））を得た（図 25）。つぎに、樹齢から連年直径成長量を推定するために、年輪数（樹齢）と胸高部における連年直径値との関係から近似式（式（18））を得た（図 26）。これらの近似式を使って、毎木調査データから樹齢と連年直径成長量を算出した。

$$Y_{(\text{Tree age})} = 0.0336 \cdot \text{AccDBHg}^2 + 1.0564 \cdot \text{AccDBHg} \quad (r = 0.9684 \quad P < 0.001) \quad \text{式 (17)}$$

$$Y_{(\text{AnnDBHg})} = 0.5688e^{-0.0092 \times \text{Tree age}} \quad (r = 0.5962 \quad P < 0.001) \quad \text{式 (18)}$$

ここで、

$Y_{(Tree\ age)}$: 樹齡

$AccDBHg$: 積算直径成長 (地上高 1.2m)

$Y_{(AnnDBHg)}$: 連年直径成長 (地上高 1.2m)

である。

一つ目の近似式を使って、毎木調査した個体の直径値から樹齡を推定した。続いて、推定した樹齡に経過させたい年数(経過後樹齡)を加算し、推定した樹齡から経過後の樹齡までに対応する連年成長量を積算した。初年度(毎木調査年)については、毎木調査データの胸高直径値に積算した成長量を加算し2cm括約した。次年度からは、前年の加算された値を基準にして新しく成長量を追加することとし、この作業を5年分繰り返し行った。なお、樹高成長についても同手法を用いたが、基準となる推定樹齡については、直径値による推定値を使用した。これは、加齡とともに成長量は変化することから、調査時点の推定樹齡を胸高直径による推定値と統一するためである。図 27 に樹齡と連年樹高成長の関係を示し、近似式は式 (19) である。

$$Y_{(AnnHlg)} = 0.4552e^{-0.0212 \times Tree\ age} \quad (r = 0.8394 \quad P < 0.001) \quad \text{式 (19)}$$

ここで、 $Y_{(AnnHlg)}$ は連年樹高成長を示している。

以上の工程によって、個体レベルの直径遷移と樹高遷移を加味した林分成長量をシミュレーションした。ただし、新規侵入個体や枯死個体については便宜上無いものとして取り扱った。

上記のシミュレーションによるY-N曲線の経年変化を図 28に、図 29と図 30にはシミュレーション前の森林構造と5回目の伐採後一年経過の森林構造を示した。表 7には、シミュレーションに伴う胸高断面積合計と林分平均形状比の

経年変化を示した。また、図 31 と図 32 には、P-01 林分の実測した直径階別本数分布と、無除伐で 5 年間推移した場合の推定直径階別本数分布を示した。さらに、図 33 にはシミュレーションによる初年度から 5 年後までの推定直径階別本数分布の経年変化の様子を示した。

図 28 より、P-01 林分では 2011 年度の除伐を毎年繰り返すと、バイオマスが減少してしまうこと示している。これは、クロマツの成長量以上の除伐が 2011 年度に行われたことを意味している。収量-密度図では、下層間伐を行うと Y-N 曲線の位置は変わらずに右側から短くなる。また、全層間伐を行うと左下方向約 45 度に Y-N 曲線は移動する（菊沢 1983a）。図 28 から、P-01 林分ではどちらかといえば全層間伐に近い伐採が行われているように見える。したがって、Y-N 曲線も左下方向約 45 度に移動しているように見える。

表 7 より、胸高断面積合計は 5 年間で約 0.4 m³減少している。また形状比については、当初 85.9 あった林分が 2 年目には 72.9 にまで減少した。ところが、5 年後でも 72.7 でありほとんど変化がみられなかった。これは、図 33 から類推すると、2 年目以降直径遷移の変化がほとんどみられなくなるためであると考えられる。さらに、表 7 より、1 回目の伐採後の重量成長量は約 10ton/ha であったのに対し、5 回目の伐採後にはわずか 6ton/ha まで減少した。これは、樹齢の増加に伴って連年成長量が減少するためであると考えられる。

以上のことから、P-01 林分に対して 2011 年度に行われた伐採は、一年間の林分成長量以上の伐採であったことがわかった。また、毎年同規模の除伐を行った場合、バイオマスは減少し続け林分が衰退してしまうことがわかった。さらに図 28 より、初年度に伐採した後 2 年間もしくは 3 年間程度伐採を行わなければ、伐採前と同程度かそれ以上のバイオマスになる可能性があると考えられる。したがって、2・3 年に一度の材線虫被害であればある程度は林型を維持できる可能性が示唆された。

表 6 クロマツ伐採木の詳細

調査地	林班	小班	伐採本数	本数密度
			N	N/ha
P-01	194	は1	25	50.0
P-02	194	い	131	5.3
P-03	194	に	128	18.4
P-04	194	ち1	-	-
P-05	194	に	128	18.4
P-06	194	い	131	5.3
P-07	1128	ろ	13	1.0
P-08	1128	ろ	13	1.0
P-09	1128	ろ	13	1.0
P-10	1128	ろ	13	1.0
P-11	194	ほ	94	39.7
P-12	194	ほ	94	39.7
P-13	194	に	128	18.4
P-14	194	ほ	94	39.7
P-15	194	ほ	94	39.7
P-16	1134	ろ	1	0.1
P-17	1134	ろ	1	0.1
P-18	1134	ろ	1	0.1
P-19	1134	ろ	1	0.1

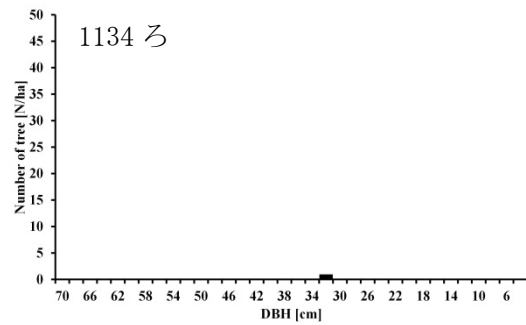
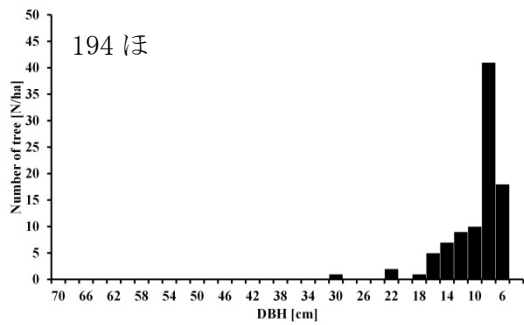
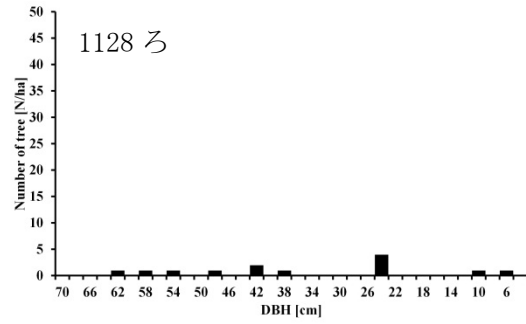
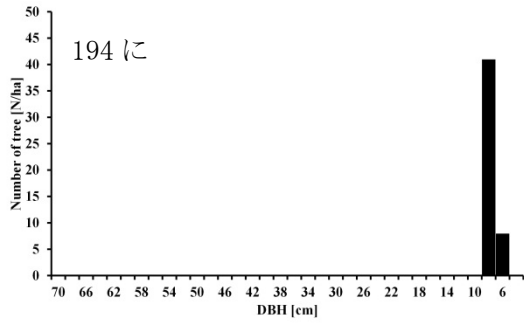
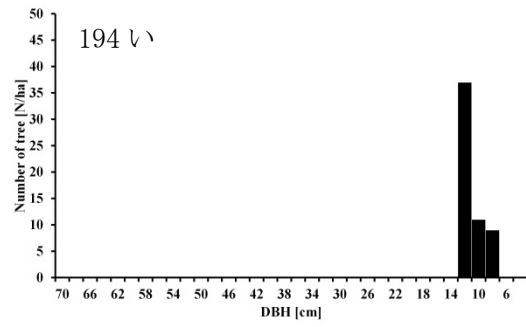
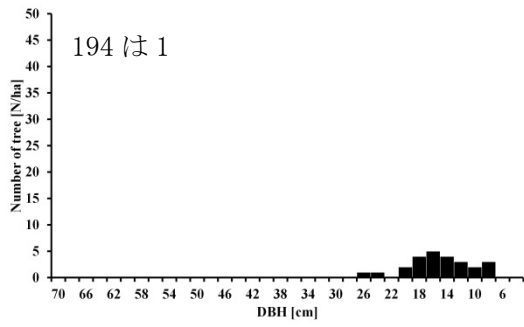


図 24 クロマツ伐採木に関する直径階別本数分布
 注) 収量-密度図の Y-N 曲線とあわせるために横軸は左右反転してある。

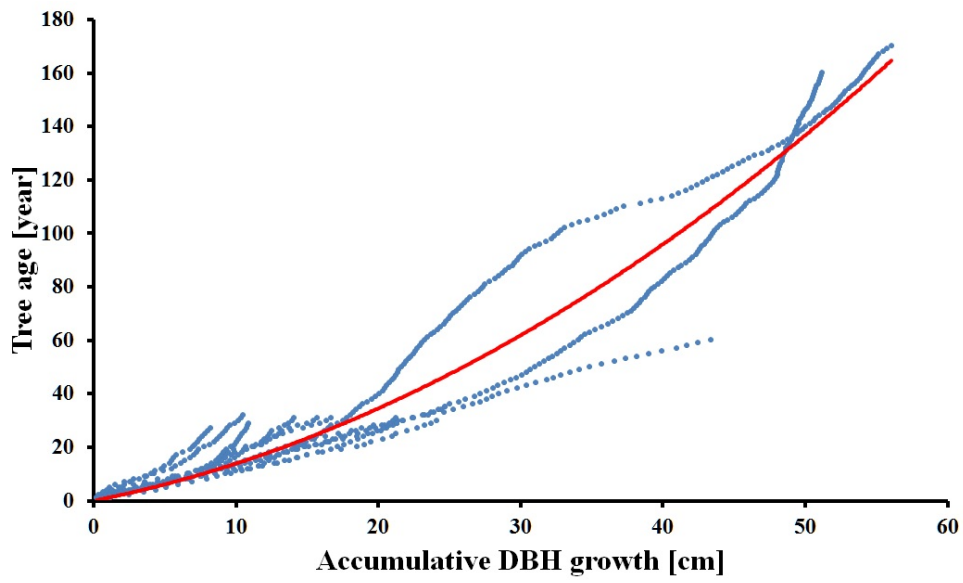


図 25 クロマツ胸高部における積算直径成長と樹齢の関係

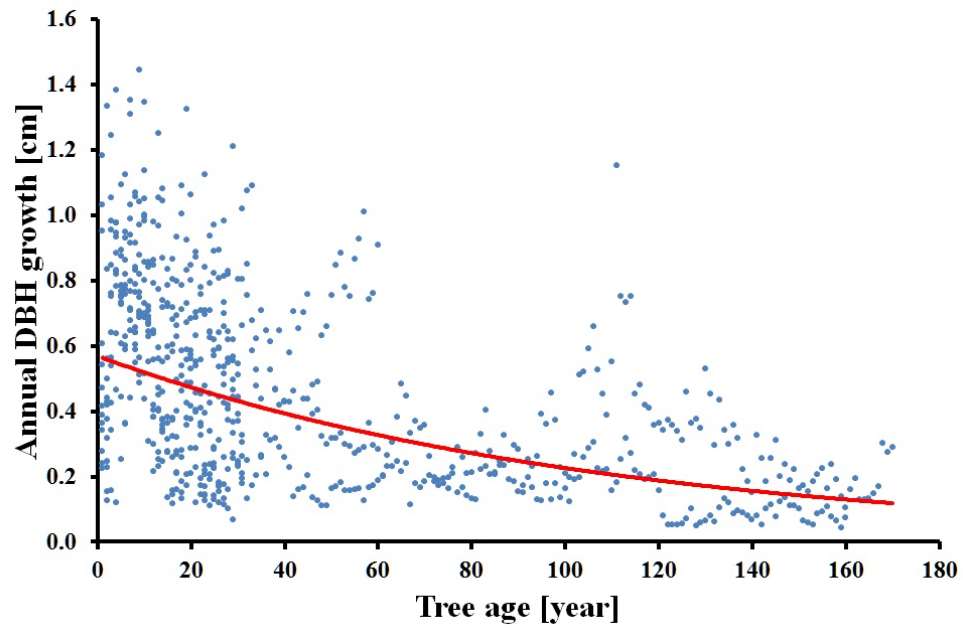


図 26 クロマツ樹齢と連年直径成長の関係

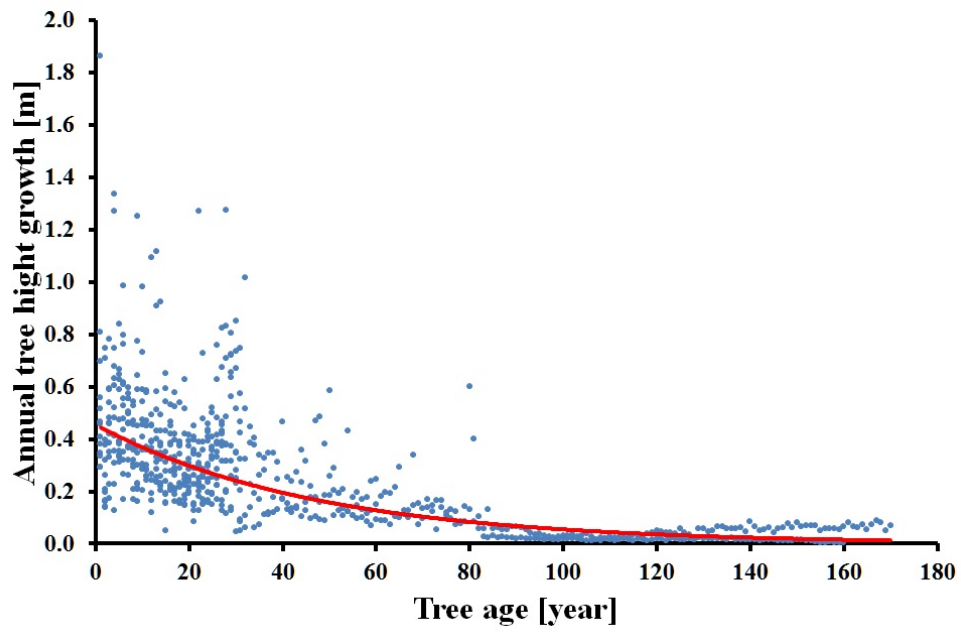


図 27 クロマツ樹齢と連年樹高成長の関係

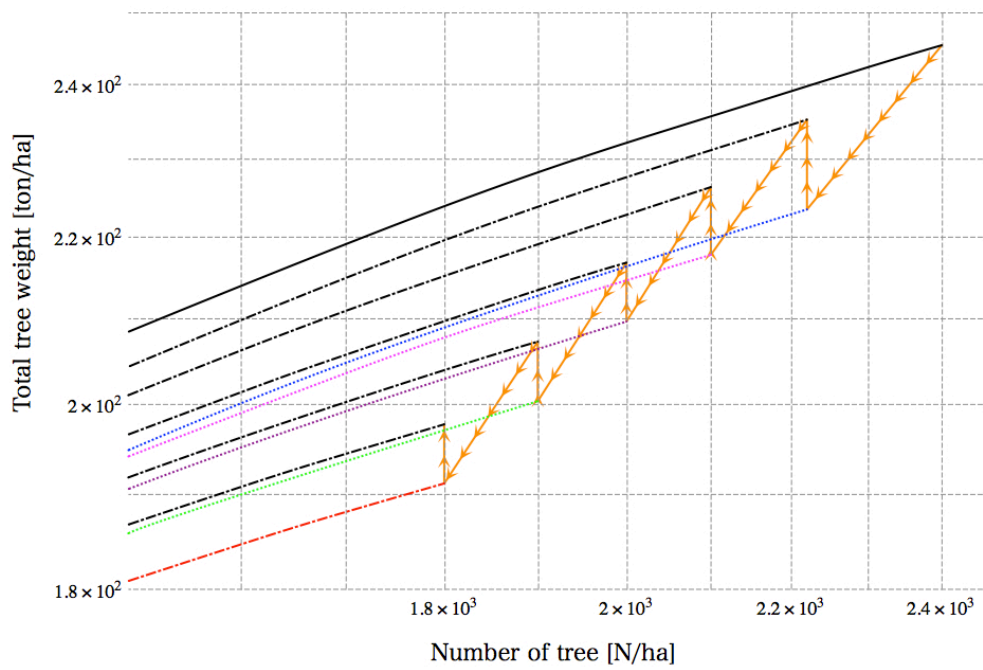


図 28 クロマツバイオマスの経年変化

表 7 クロマツバイオマスの経年変化と形状比の変化

	Origin	伐採									
		1回目	翌年	2回目	翌年	3回目	翌年	4回目	翌年	5回目	翌年
積算本数 N/ha	2400	2220		2100		2000		1900		1800	
積算重量 ton/ha	245.282	223.506	235.245	217.799	226.374	209.550	216.830	200.373	207.289	191.198	197.749
胸高断面積合計 m ² /1.2m height	2.624	2.409	2.659	2.343	2.584	2.250	2.480	2.146	2.365	2.043	2.250
林分平均形状比 Height(m)/DBH(m)	85.9	74.5	73.5	73.7	72.9	73.6	72.7	73.6	72.7	73.6	72.7

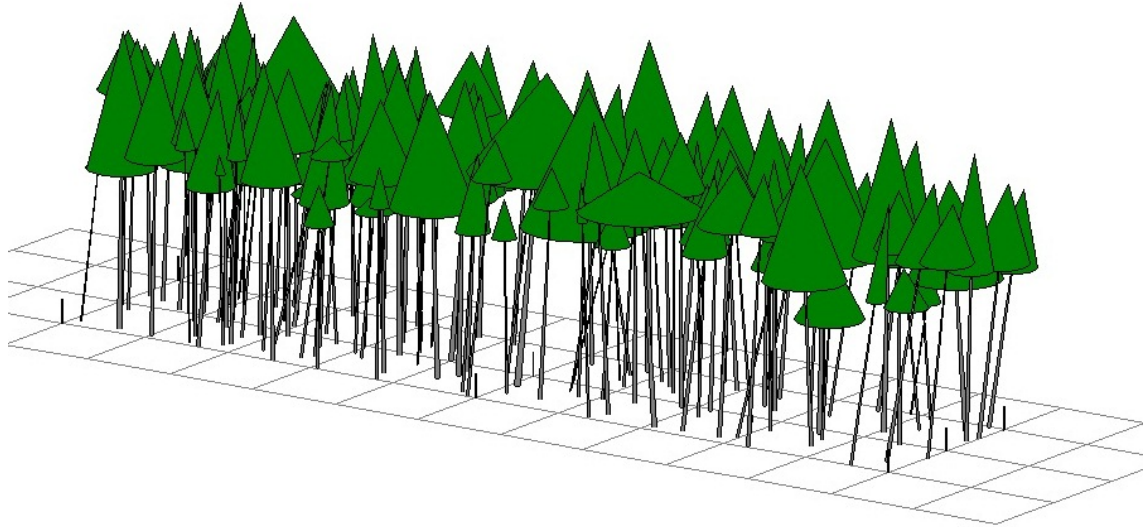


図 29 P-01 林分のシミュレーション前の森林構造

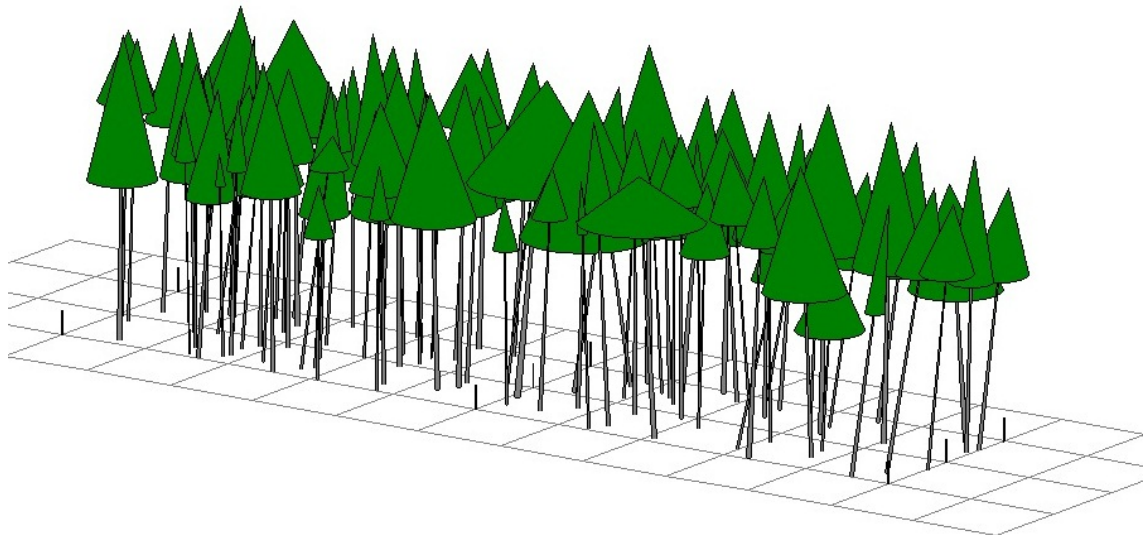


図 30 P-01 林分の 5 回目の伐採後一年経過

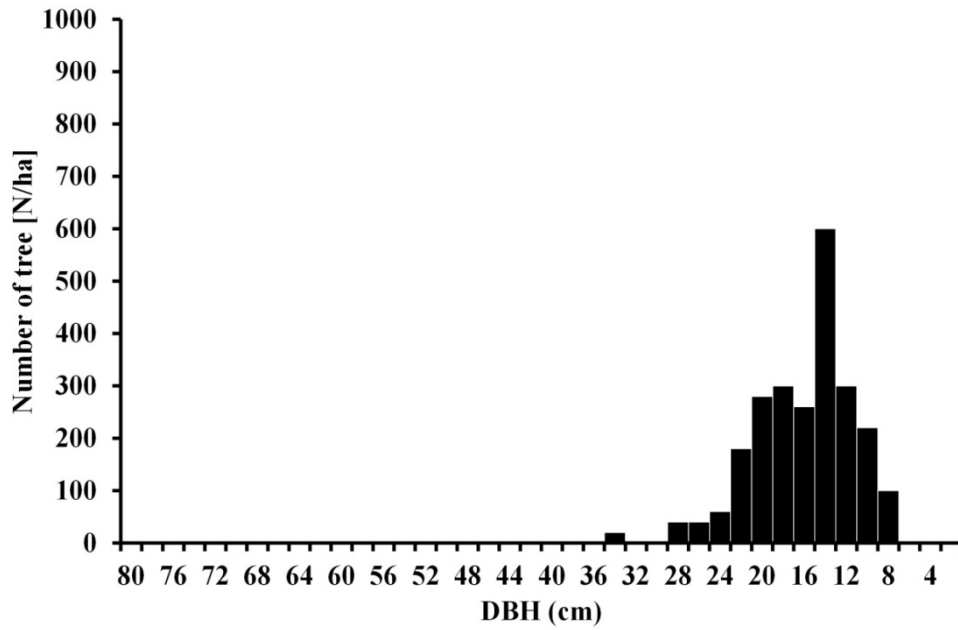


図 31 クロマツ毎木調査データに基づく P-01 林分の直径階別本数分布
 注) 収量-密度図の Y-N 曲線とあわせるために横軸は左右反転してある。

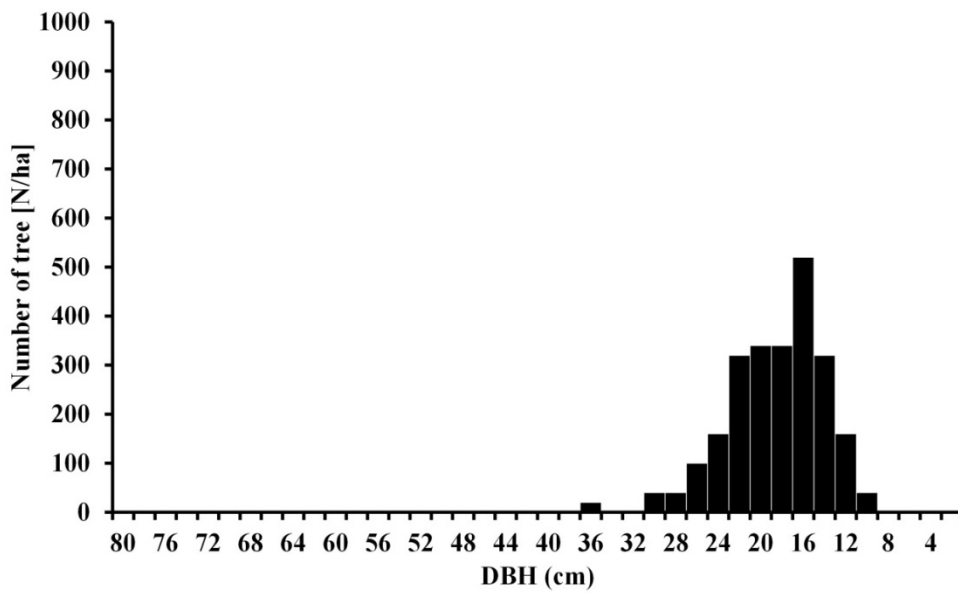


図 32 クロマツ P-01 林分の無除伐状態で推移した場合の 5 年後の直径階別本数分布
 注) 収量-密度図の Y-N 曲線とあわせるために横軸は左右反転してある。

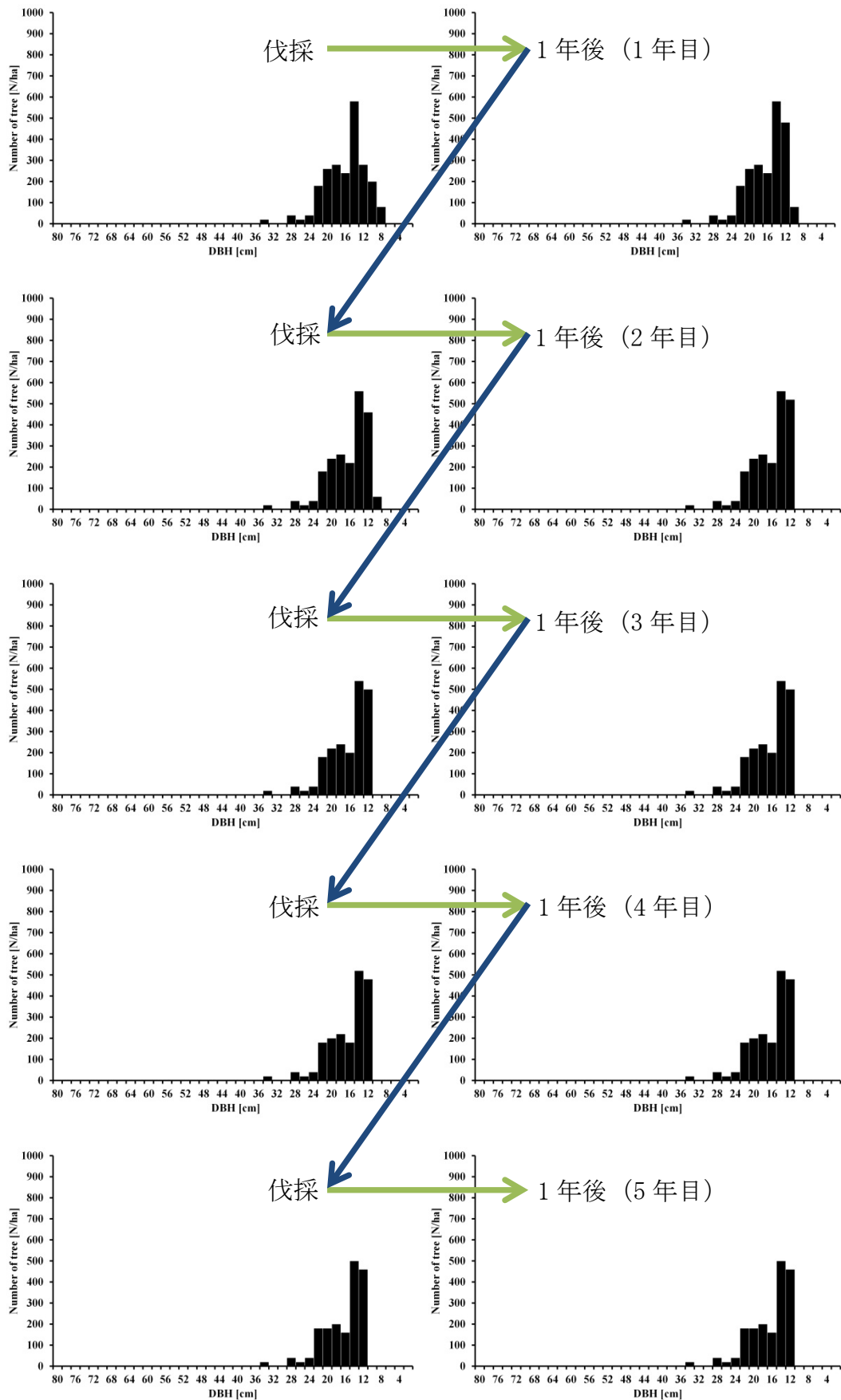


図 33 間伐シミュレーションによる直径階別本数分布の経年変化
 注) 収量-密度図の Y-N 曲線とあわせるために横軸は左右反転してある。

第4章 カラマツ天然林の結果と考察

4.1 結果

4.1.1 樹幹解析および年輪解析

表 8 に樹幹解析に使用した個体の諸データを示した。樹幹解析に使用した個体は、いずれも樹齢の大きいものであった。しかし、総重量が 1ton を超えるものは無く、また幹材積についても 1 m³を超える個体は無かった。

各個体の樹幹内容積密度分布の図を、付図 (P. 51~P. 54) に示した。いずれの個体も樹幹内容積密度の変動は少なかったが、最外年付近で低くなる傾向がみられた。ここで、Larch_01 と Larch_03 の個体を比較した。容積密度分布の図では、Larch_01 は木の先端部に低密度の部位が、横方向に高密度の部位がみられた。Larch_03 は先端部と根本に高密度の部位がみられ、横方向には高密度の部位がみられなかった。また Larch_01 は、高樹齢で樹幹長も最大である。しかし、胸高直径は Larch_03 よりも小さい。さらに、Larch_03 は試料の中では最も若い、胸高直径は最大で樹幹長は最も小さい。このことから、Larch_01 は高さ方向（樹高成長）に成長し、Larch_03 は横方向（肥大成長）に成長していた。

表 8 モンゴル樹幹解析試料

個体No	胸高直径 (cm)	樹幹長 (m)	樹齢* (Year/0.5m)	幹重量** (kg)	総重量*** (kg)	幹材積** (m ³)
Larch_01	31.3	23.3	218	444.37	659.22	0.75
Larch_02	26.1	24.0	204	451.57	669.90	0.75
Larch_03	36.5	21.0	200	615.61	913.26	0.93

* 地上高0.5m位置における年輪数

** SDA算出結果

*** 諸拡大係数を含む樹木全体の総重量

4.1.2 毎木調査

表 9 に毎木調査結果を示した。L-07 林分は、調査林分の中でも最大の平均胸高直径と平均樹高の林分構造を持っており、これと比例して積算重量と胸高断面面積合計も最大値であった。平均胸高直径の標準偏差をみると、ほとんどが 10cm 以上のバラツキがみとめられた。また、樹高についても 2m から 6m のバラツキがみとめられた。このことから、調査したこれらの林分は、大小を含め複数の直径級ならびに樹高級からなる複層林型の構造を持った林分であると推察した。各林分の Forest Window 画像を付図 (P. 45~P. 50) に示した。

表 9 モンゴル毎木調査データ

調査地	緯度	経度	調査面積		本数密度 N/ha	平均胸高直径 ± 標準偏差	平均樹高 ± 標準偏差	積算重量 ton/ha	胸高断面面積合計 m ² /ha
			m × m	ha		cm (1.3m height)	m		
L-01	50°58'53.9"	99°22' 9.3"	5 × 85	0.043	1294	14.2 ± 8.85	13.5 ± 4.32	213.186	29.302
L-02	50°58'53.9"	99°22' 9.3"	5 × 80	0.040	1550	13.5 ± 11.78	12.6 ± 5.70	336.435	40.322
L-03	51°14'34.4"	99°21'25.5"	10 × 100	0.100	890	19.1 ± 12.98	12.0 ± 5.96	326.700	38.252
L-04	51°14'34.4"	99°21'25.5"	10 × 50	0.050	880	25.3 ± 11.45	16.2 ± 6.03	448.022	53.797
L-05	51°20'56.6"	99°17'13.7"	10 × 50	0.050	1120	16.3 ± 7.20	14.6 ± 4.35	223.009	28.903
L-06	51°26'49.6"	99°11'36.2"	10 × 50	0.050	1740	16.2 ± 11.77	10.2 ± 5.12	463.881	55.185
L-07	51°26'49.6"	99°11'36.2"	10 × 50	0.050	840	30.0 ± 13.78	17.2 ± 5.13	615.131	72.621
L-08	51° 9'24.3"	99°44' 5.1"	5 × 40	0.020	1650	16.5 ± 10.45	12.5 ± 6.26	379.689	49.779
L-09	51° 8'31.8"	99°41' 53.4"	10 × 50	0.050	680	22.1 ± 16.64	14.9 ± 7.09	396.690	41.526
L-10	51° 8'31.8"	99°41' 53.4"	10 × 50	0.050	900	17.0 ± 17.79	12.1 ± 7.51	420.721	42.927

4.1.3 胸高直径と樹高の相対成長関係

樹幹解析と年輪解析のデータではばらつきが大きく、また 3 個体しか試料がなかったため有効な相関関係が得られなかった。そこで、毎木調査のデータを使用した。

各林分の相対成長関係について林分毎に相関係数の一番高い曲線で近似させた結果、すべて対数近似曲線であった。各林分の相対成長関係式を図 34 と表 10 に示した。また各式の定数 a (傾き) と b (切片) の関係を図 35 に示した。

図 34 および表 10 より、定数 a (傾き) は各林分でほとんど違いがみられな

かった。図 35 より、定数 b (切片) のプラス方向への増加に伴って、定数 a (傾き) が減少することがわかった。この時の近似式は指数関数式の相関係数が高く、 $y=5.8634e^{-0.0369}$ ($r=0.9386$, $P<0.001$) であった。これは、直径が小さくて樹高の高い個体が含まれている林分ほど、直径成長に伴う樹高成長の変化が少ないことを示している。

以上のことから、各林分の相対成長関係はほとんど同じであると仮定し、全ての林分を対象とした一つの相対成長関係式を使用した。図 36 にモンゴルカラマツ林における胸高直径と樹高の相対成長関係を示した。近似式 (式 (20)) は、相関係数が一番高い対数近似曲線を使用した。

$$TH = 7.8445 \cdot \ln(DBH) - 7.9287 \quad (r = 0.8653, P < 0.001) \quad \text{式 (20)}$$

ここで、TH は樹高(m)，DBH は胸高直径(cm)である。

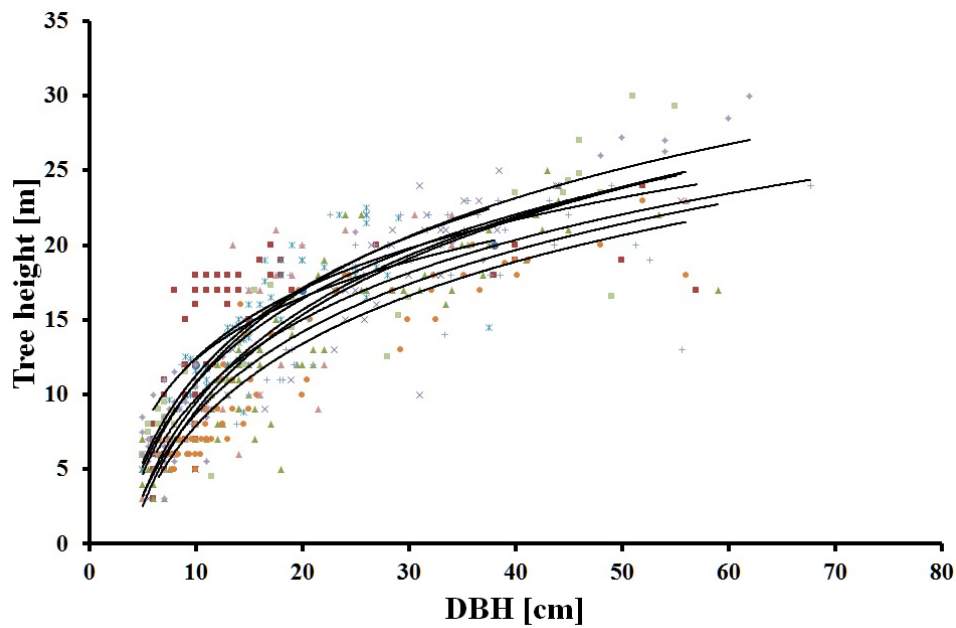


図 34 カラマツ各林分の相対成長関係

表 10 カラマツ各林分の相対成長関係式

調査地	相対成長関係式	相関係数
	$y = a \ln(\text{DBH}) - b$	$r (P < 0.001)$
L-01	$y = 5.9460 \ln(\text{DBH}) - 1.3088$	0.9558
L-02	$y = 6.6822 \ln(\text{DBH}) - 2.9502$	0.7242
L-03	$y = 7.8984 \ln(\text{DBH}) - 9.4718$	0.9144
L-04	$y = 9.2556 \ln(\text{DBH}) - 12.3910$	0.8997
L-05	$y = 8.4365 \ln(\text{DBH}) - 8.1494$	0.8627
L-06	$y = 7.9251 \ln(\text{DBH}) - 10.3450$	0.9234
L-07	$y = 7.6681 \ln(\text{DBH}) - 7.9423$	0.7746
L-08	$y = 8.9860 \ln(\text{DBH}) - 11.2510$	0.8321
L-09	$y = 8.1363 \ln(\text{DBH}) - 7.9595$	0.9056
L-10	$y = 8.8922 \ln(\text{DBH}) - 9.6517$	0.9558

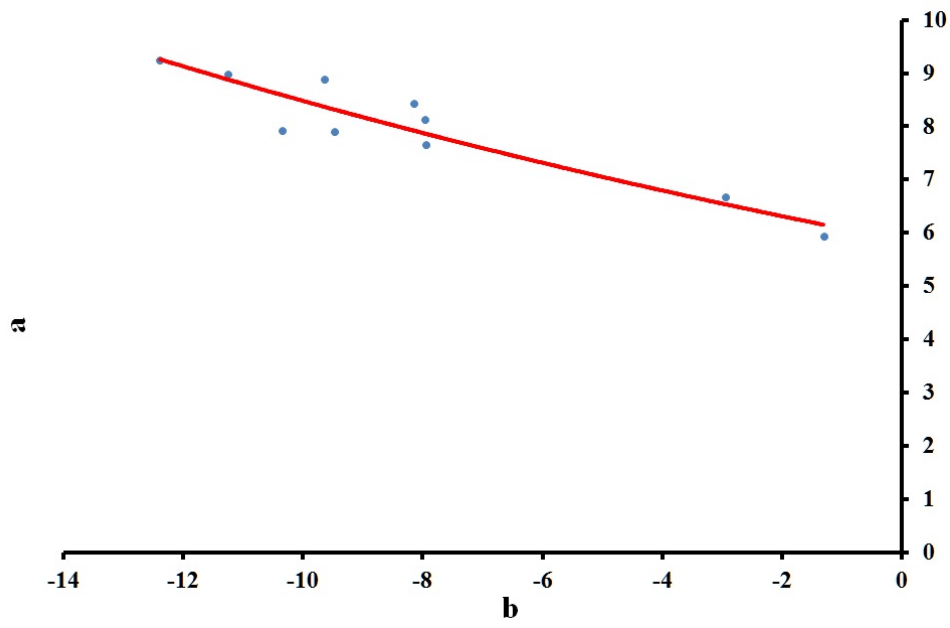


図 35 カラマツ相対成長式の係数の関係

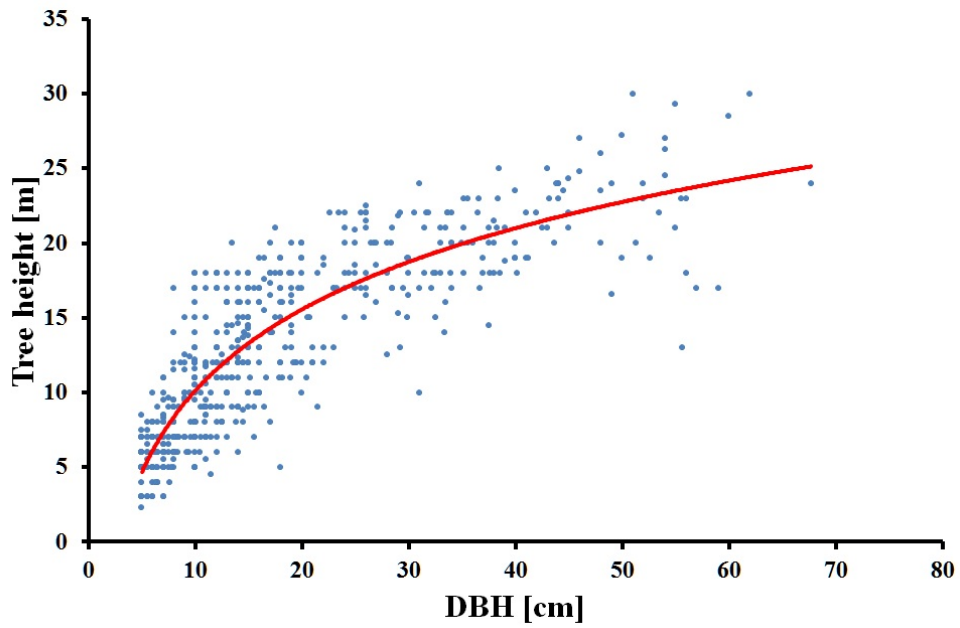


図 36 カラマツ胸高直径と樹高の相対成長関係

4.1.4 重量式

図 37 と図 38 に D^2H と総重量との関係を示した。図 37 は両対数軸，図 38 は線形軸で，横軸に D^2H ，縦軸に式 (1) により算出した年輪毎の諸拡大係数を含めた樹木全体の総重量を示した。これらを，式 (2) で近似し，式 (21) を得た。既存の研究における $Y=aX^b$ による値と実測値との間で，平均の差の t 検定を行ったところ， $|t|=11.4360$ $P=0.0000$ ($P<0.05$) であり，有意な差があるという結果となった。式 (21) による値と実測値においても t 検定を行ったところ， $|t|=0.9900$ $P=0.3228$ ($P>0.05$) であり，有意差無しという結果となったことから，統計的に式 (21) による方は実測値との間に差がないものと判断した。

$$Y_{stW} = 0.1147(1 + D^2H)^{0.8770} \quad (r = 0.9740, P < 0.001) \quad \text{式 (21)}$$

ここで， Y_{stW} は重量値 (kg) を示している。樹幹解析と年輪解析によるデータを用いることでサンプル数を増やすことが可能となるため，重量式としての精度を高めた。

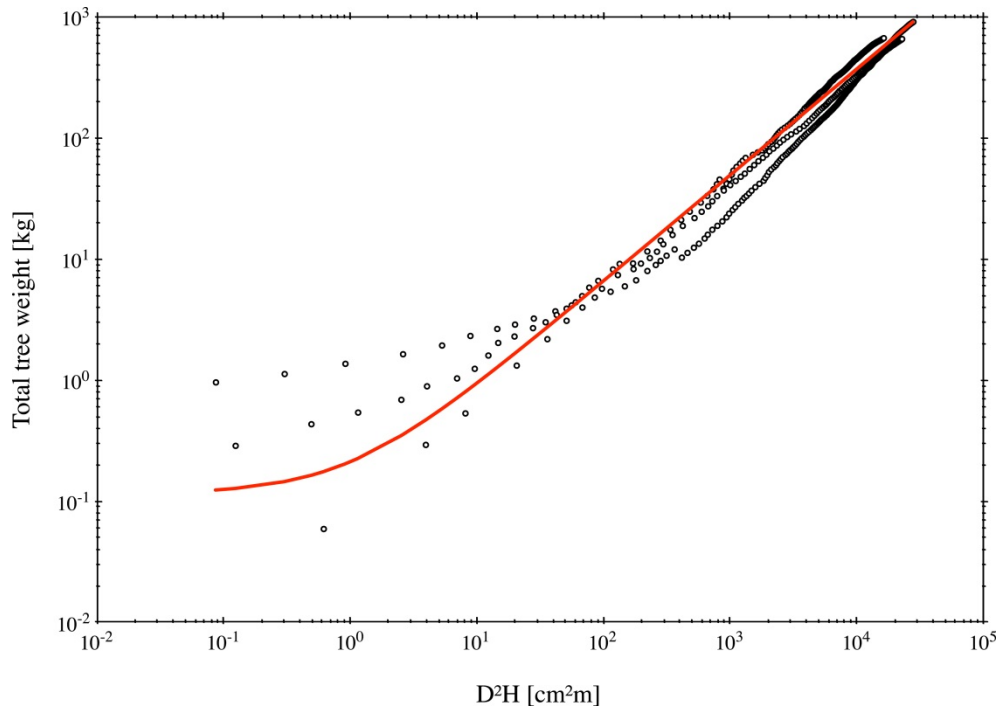


図 37 カラマツ D^2H と総重量の関係 (対数軸)

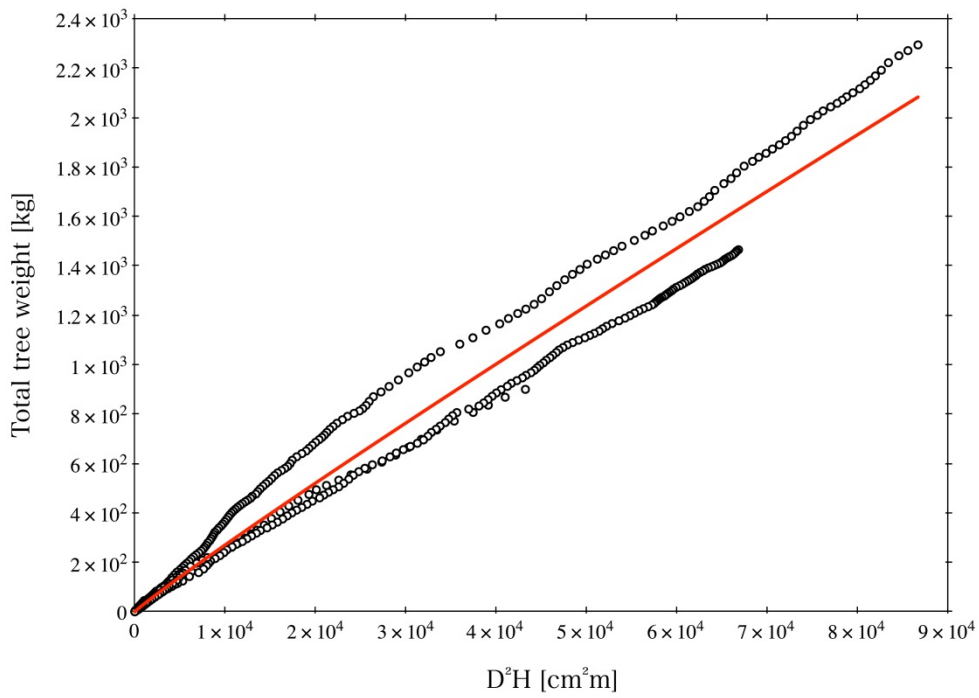


図 38 カラマツ D^2H と総重量の関係 (線形軸)

4.1.5 収量-密度図

図 39 に重量値による各林分の Y-N 曲線を示した。図 39 は横軸に本数密度 (N/ha), 縦軸に総重量 (ton/ha) をそれぞれ対数軸で表したものである。また, 図 40 に各林分の B ポイントと B ポイント線および最多密度曲線を示した。表 11 には, 各林分の Y-N 曲線係数と B ポイント座標を示した。ここで, B ポイント線は可能な限り最外側に引くものとし, L-07 林分の B ポイントを通る線を B ポイント線とした。さらに, B ポイント線の傾きについては, 重量値を基とする自然間引きの法則が成り立つものとして, 暫定的に-0.5 を採用することとした。B ポイント線は, 式 (22) で示される。

$$y = 5864.5780x^{-0.5} \quad \text{式 (22)}$$

ここで, x は本数密度 (N/ha), y は総重量 (ton/ha) を示している。

最多密度曲線は, B ポイント線と平行で, かつ各林分の総重量値のうち最外側の点を通るように設定した。本研究では, L-06 林分を通り B ポイント線と同じ傾きを持つ線を暫定的な最多密度曲線とした。本研究における最多密度曲線は, 式 (23) で示される。

$$y = 19350.0245x^{-0.5} \quad \text{式 (23)}$$

ここで, x は本数密度 (N/ha), y は総重量 (ton/ha) を示している。

モンゴルカラマツ林では, 基となる林齢がわからないため, 林齢別 Y-N 曲線は作成できなく, 最多密度に達していた P-06 林分を平行移動させて暫定的な Y-N 曲線を求めた。また, 式 (7)・式 (8) による等限界直径線と自然枯死線を加えて, モンゴルカラマツ林における収量-密度図を図 41 に示した。式 (7) の等限界直径線の諸係数は $a = 5864.5780$, $c = 0.5000$, 式 (8) による自然枯

死線の初期密度本数を 10,000 本/ha とし係数 A_n は 0.00199 であった。図 41 では等限界直径線を 4cm から 70cm までを示した。

最後に、作成した収量-密度図の精度について検証した。図 42 に示すように、収量-密度図に実測した各林分の Y-N 曲線を描画し、等限界直径線と各 Y-N 曲線との交点を算出し、その Y 座標を理論重量値とした。この値と、実測した各直径階の重量値を実測重量値との関係を、図 43 のグラフで比較した。

図 43 は、横軸に毎木調査データに基づく重量値（実測値）をとり、縦軸には各調査林分の Y-N 曲線と等限界直径線との交点における重量値（理論値）をとったものである。直線式で近似し、95% 予測信頼限界と 95% 推定信頼限界のそれぞれ上限値と下限値を示した。

実測値と理論値との関係式は、理論上では $y=x$ に限りなく近くなることが期待される。ところが、図 43 では傾きが 1.060 であったことから、理論値の方が実測値よりも約 6% 程度大きく、95% 予測信頼限界の範囲も、図の右側ほど傾き（1.060）にあわせて上方に偏った。

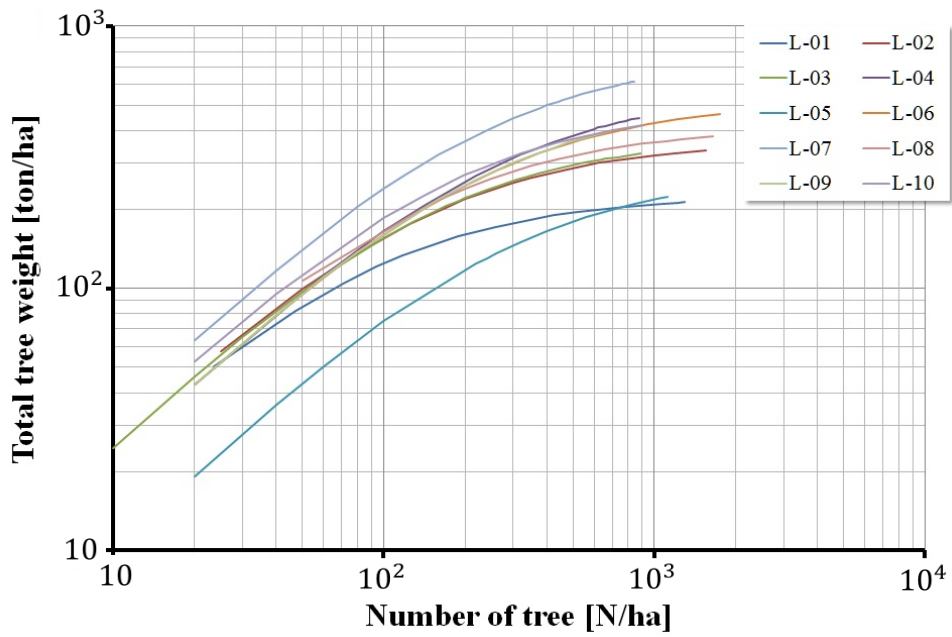


図 39 カラマツ各林分 Y-N 曲線

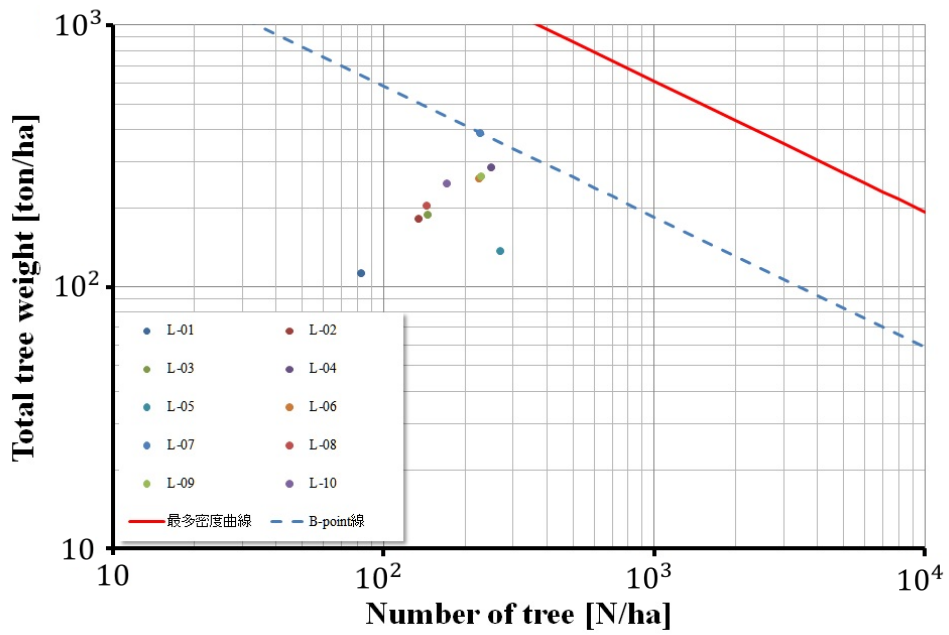


図 40 カラマツ各林分 B ポイントと B ポイント線および最多密度曲線

表 11 カラマツ各林分 Y-N 曲線係数および B ポイント座標

調査地	Y-N 曲線係数		B-point	
	A	B	NB	YB
L-01	0.00441	0.36381	82.50352	113.38868
L-02	0.00274	0.36687	134.10649	182.77167
L-03	0.00263	0.37985	144.20343	189.81720
L-04	0.00174	0.43281	248.71480	287.32333
L-05	0.00362	0.96896	267.74601	138.16084
L-06	0.00191	0.42943	224.95834	261.92744
L-07	0.00128	0.28934	225.82987	390.25284
L-08	0.00242	0.34643	142.92960	206.28934
L-09	0.00189	0.42985	227.58618	264.72846
L-10	0.00200	0.33997	170.05860	250.10886

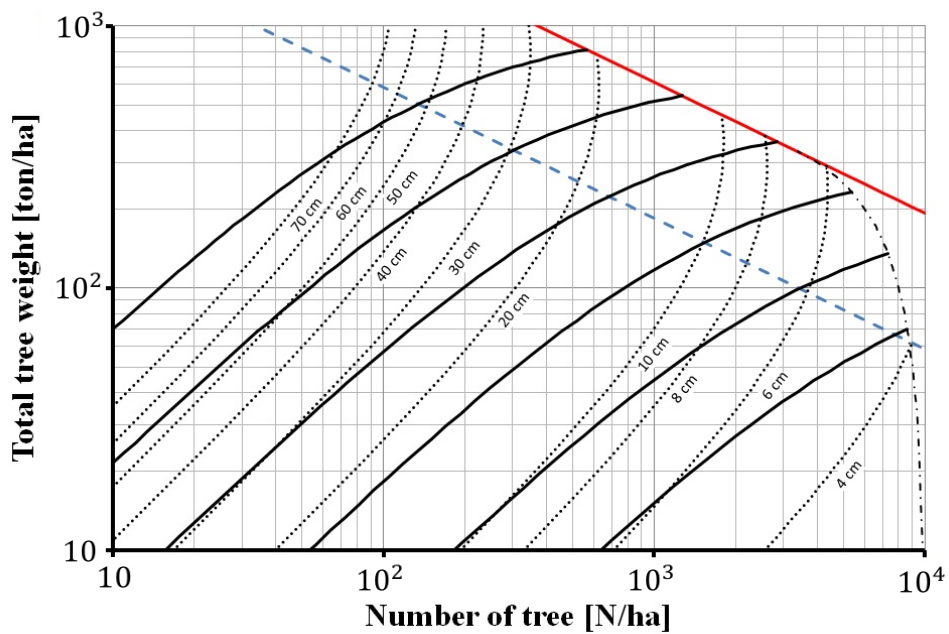


図 41 カラマツ収量-密度図

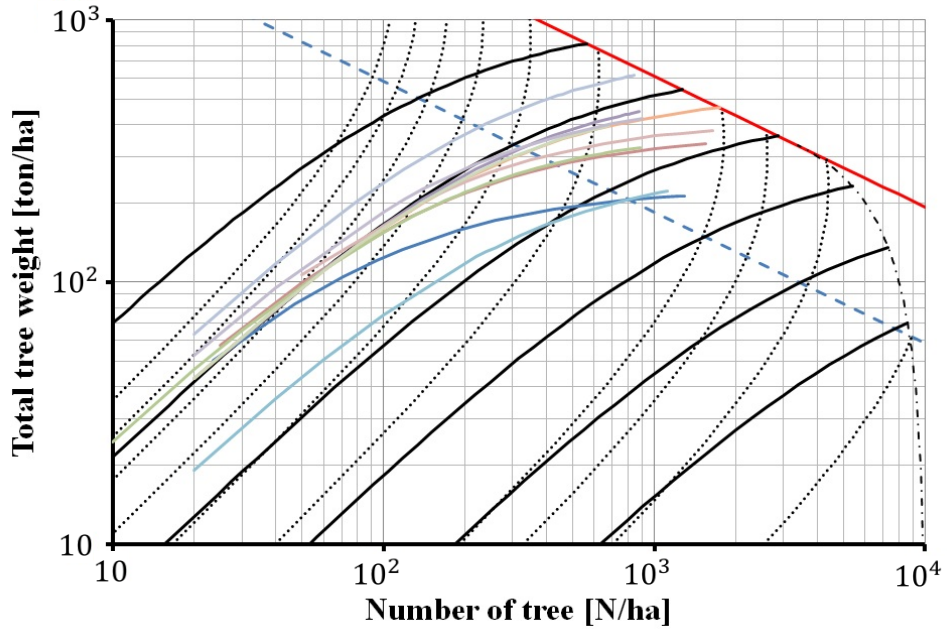


図 42 カラマツ収量-密度図と各林分 Y-N 曲線

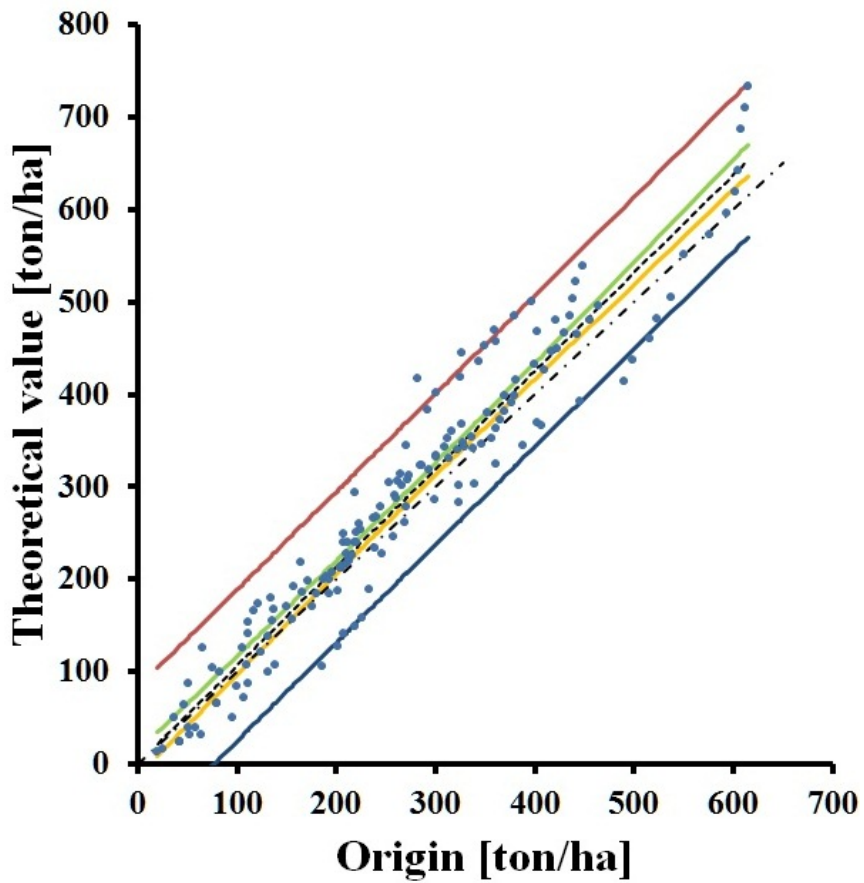


図 43 カラマツ実測重量値と理論重量値の関係

4.2 考察

4.2.1 重量値による収量-密度図と収量-密度図からみたモンゴルカラマツ林の概況

図 39 および図 42 から、本数密度の増加に伴う総重量の減少がみられた。図中最も左上側にある L-07 林分は、調査林分の中で最大の重量値(615.131ton/ha)であった。L-07 林分は図 42 においても、理論上の限界直径 60cm 以上の個体数が最も多かった。さらに、L-07 以外の林分同士を比較すると、総重量値と本数密度に差はあるが最大個体の本数密度や重量値には、特に大きな差がみられなかった。これは表 9 において、ほとんどの林分で平均胸高直径が約 14cm~20cm の範囲であることから、林分構造が類似していると推察できる。

ところが、L-01 林分は、最大個体の重量値は他の林分と同じであるが、Y-N 曲線全体でみると明らかに他の林分と傾きが違った。これは、図 42 が示すように、他の林分に比べて小径木の割合が多いことを示している。

ここで、海岸クロマツ林と同様に B ポイントの N 座標 (NB) と、平均胸高直径と平均樹高の各標準偏差 (絶対値) および各変動係数との関係を調べた。

図 44 は NB と平均胸高直径の標準偏差の関係を X 軸に対数軸を持つ片対数グラフで示しており、同様に樹高については図 45 に示した。図 46 は、NB と平均胸高直径の変動係数との関係について X 軸に対数軸を持つ片対数グラフで示し、同様に樹高については図 47 に示した。

結果は、全く相関関係が認められなかった。すなわち、B ポイントが右側に移動することで本数密度が増加し、併せて小径木の割合が増加しても、個体サイズのバラツキに影響がないことを意味している。以上のことから、本研究で調査した森林の多くは、別々な成長ステージにある個体が複雑にしかも複数に混ざり合った林分であったと推察される。このような林分構造になる要因とし

て、モンゴルカラマツ林では山火事が頻繁に起きていることが考えられる。またその規模も様々である。さらに、モンゴルではカラマツが生活用の薪や家屋材として一年中使われている。したがって、モンゴルカラマツ林では自然のおよび人為的に、常に攪乱が起きていると考えられる。そこで、このような攪乱現象の中でも、特に山火事に注目して次の第2項では森林動態の変化をシミュレーションすることにした。

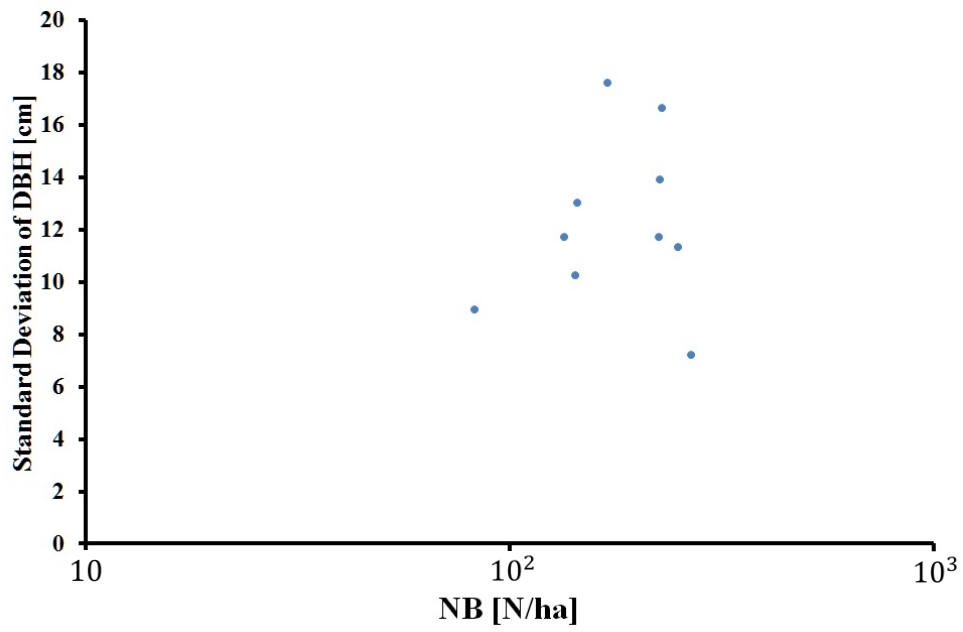


図 44 カラマツ NB と平均胸高直径の標準偏差の関係

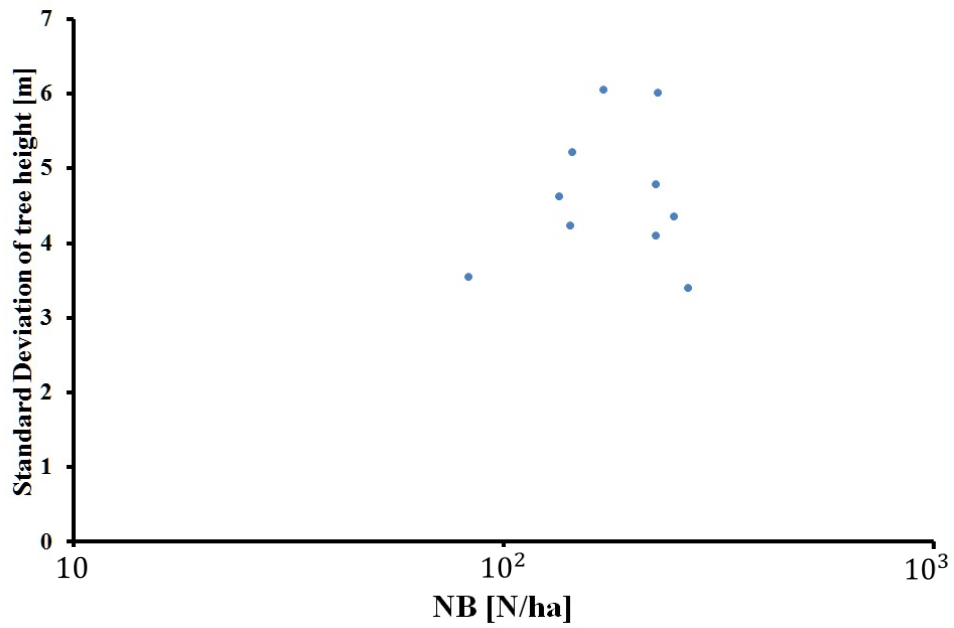


図 45 カラマツ NB と平均樹高の標準偏差の関係

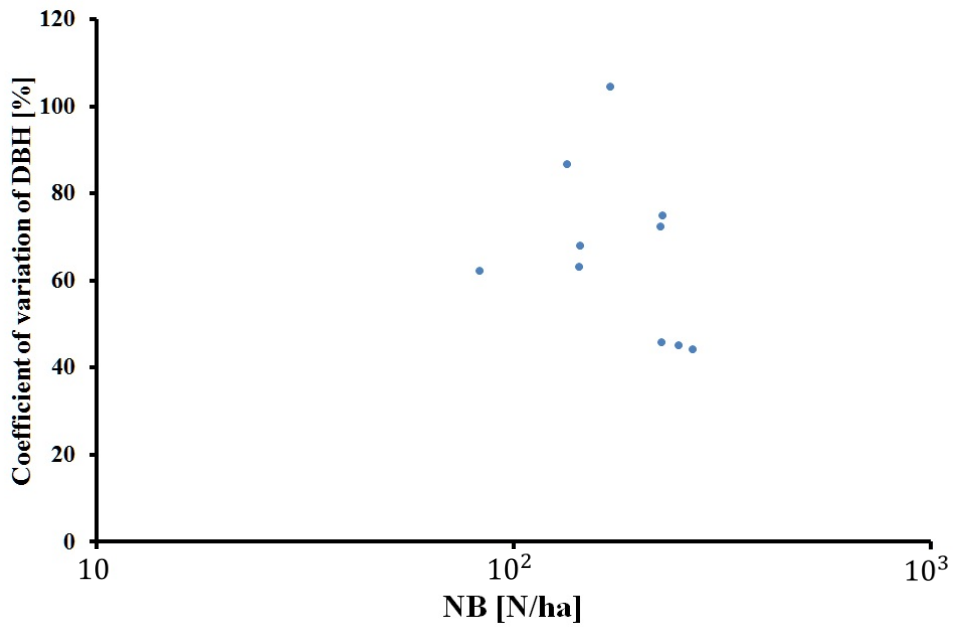


図 46 カラマツ NB と平均胸高直径の変動係数の関係

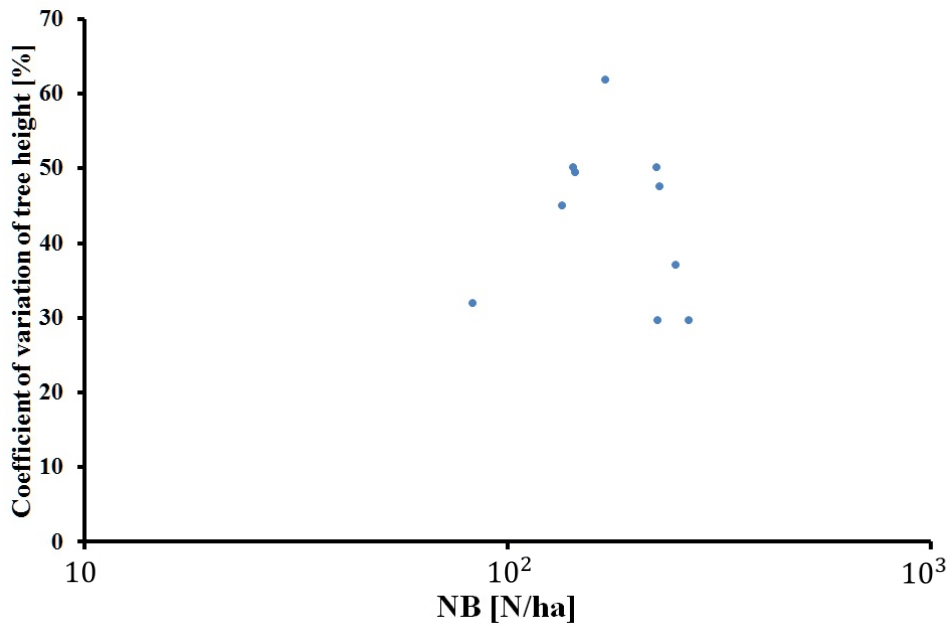


図 47 カラマツ NB と平均樹高の変動係数の関係

4.2.2 森林火災によるバイオマス減少とその後の森林動態シミュレーション

図 48 に L-06 林分と L-07 林分を示した。両林分はほとんど隣り合った林分であったが、図 48 でみられるように Y-N 曲線は異なっており、林分構造の違いを示した。図 49 と図 50 にそれぞれの林分の胸高直径と樹高の分布を示した。L-06 林分には樹高約 9m 以下の個体が多く含まれているのに対して、L-07 林分にはほとんど存在しない（図中緑色で塗潰した範囲）。また、胸高直径に対する樹高も L-07 林分の方が大きかった。そこで本研究では、L-06 林分と L-07 林分のシミュレーションを行った。

シミュレーションに先立ち、海岸クロマツ林と同様に樹齢と成長量について整理した。まず、毎木調査データにおける個体サイズから樹齢を推定するために、樹幹解析と年輪解析を行った個体から、胸高部における年輪毎の積算直径値と年輪数（樹齢）との関係について近似式（式（24））を得た（図 51）。つぎに、樹齢から連年直径成長量を推定するために、年輪数（樹齢）と胸高部における連年直径値との関係から近似式（式（25））を得た（図 52）。これらの近似式を使って、毎木調査データから樹齢と連年直径成長量を算出した。樹高についても同様に図 53 から近似式（式（26））を得た。

$$Y_{(\text{Tree age})} = 2.2324 \cdot \text{AccDBHg}^{1.2409} \quad (r = 0.9644 \text{ P} < 0.001) \quad \text{式 (24)}$$

$$Y_{(\text{AnnDBHg})} = -0.0886 \cdot \text{Ln}(\text{Tree age}) + 0.5385 \quad (r = 0.7393 \text{ P} < 0.001) \quad \text{式 (25)}$$

$$Y_{(\text{AnnHlg})} = 0.4552e^{-0.0212 \times \text{Tree age}} \quad (r = 0.7710 \text{ P} < 0.001) \quad \text{式 (26)}$$

ここで,

$Y(\text{Tree age})$: 樹齡

$AccDBHg$: 積算直径成長 (地上高 1.3m)

$Y(AnnDBHg)$: 連年直径成長 (地上高 1.3m)

$Y(AnnHg)$: 連年樹高成長

である。

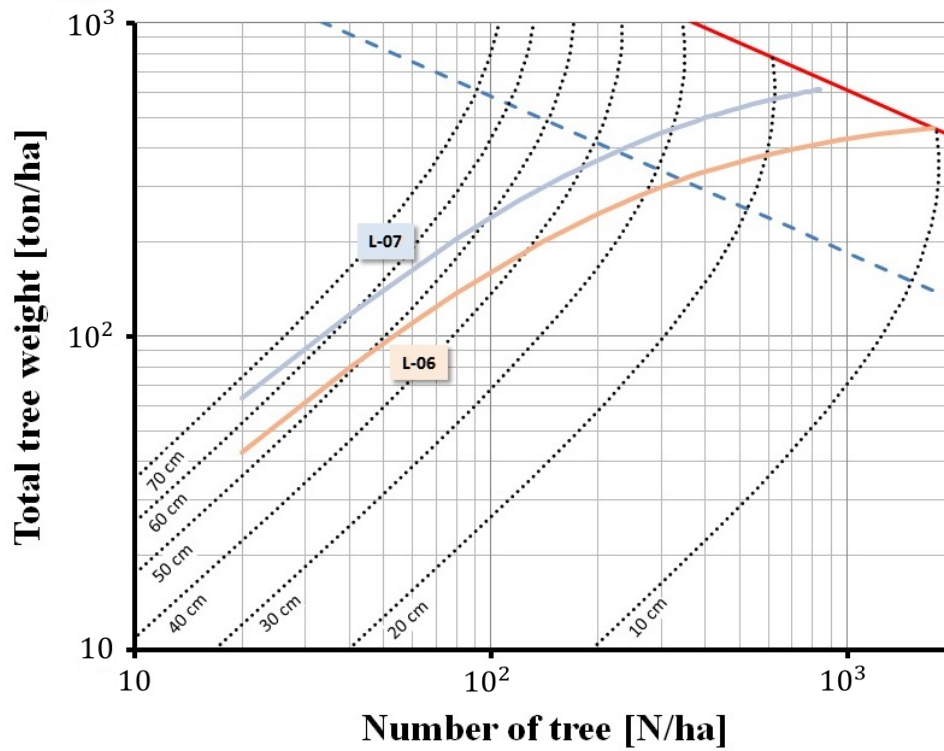


図 48 カラマツ L-06 林分と L-07 林分の Y-N 曲線

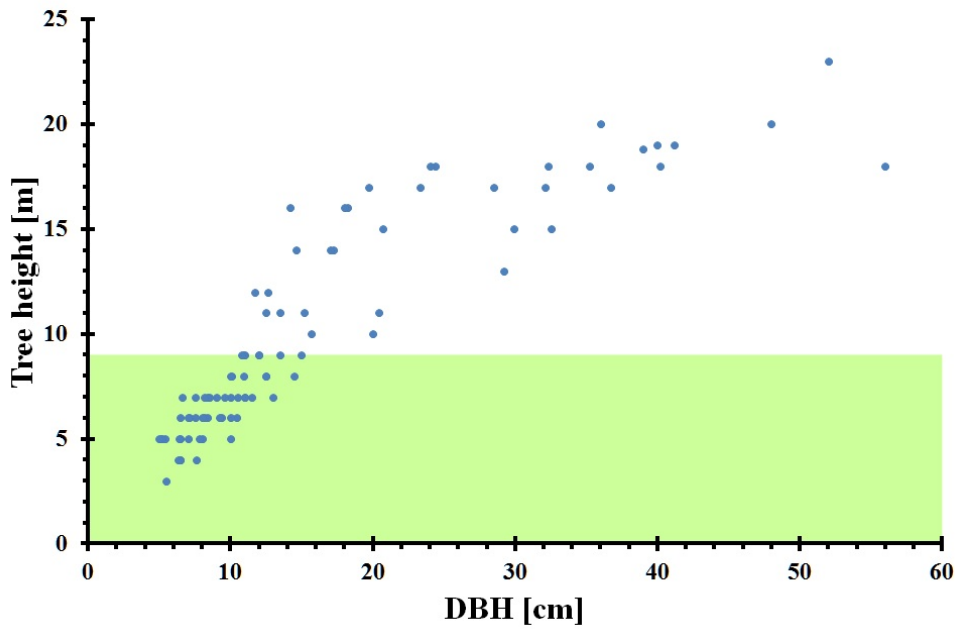


図 49 カラマツ L-06 林分の胸高直径と樹高分布

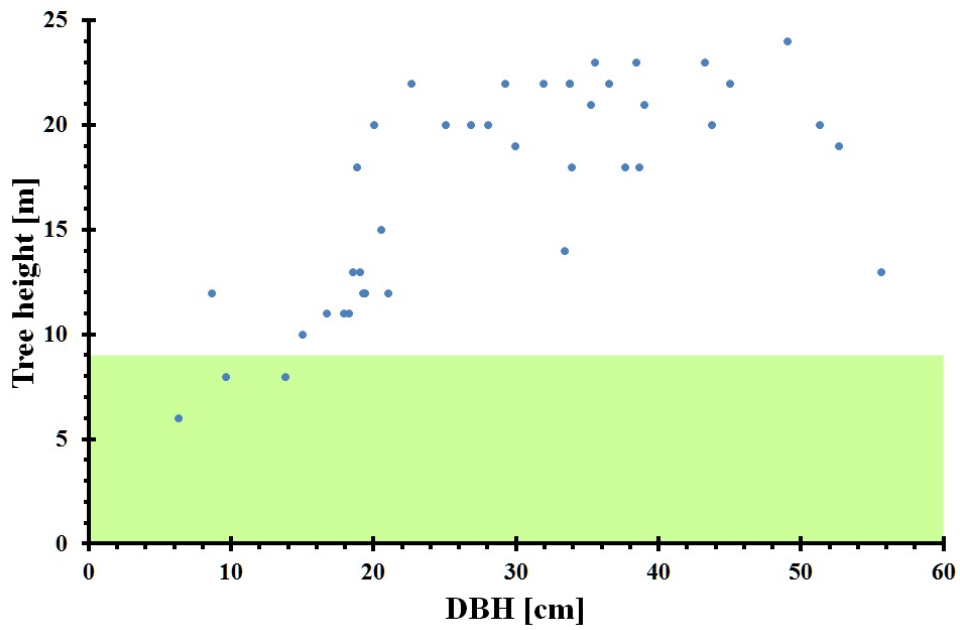


図 50 カラマツ L-07 林分の胸高直径と樹高分布

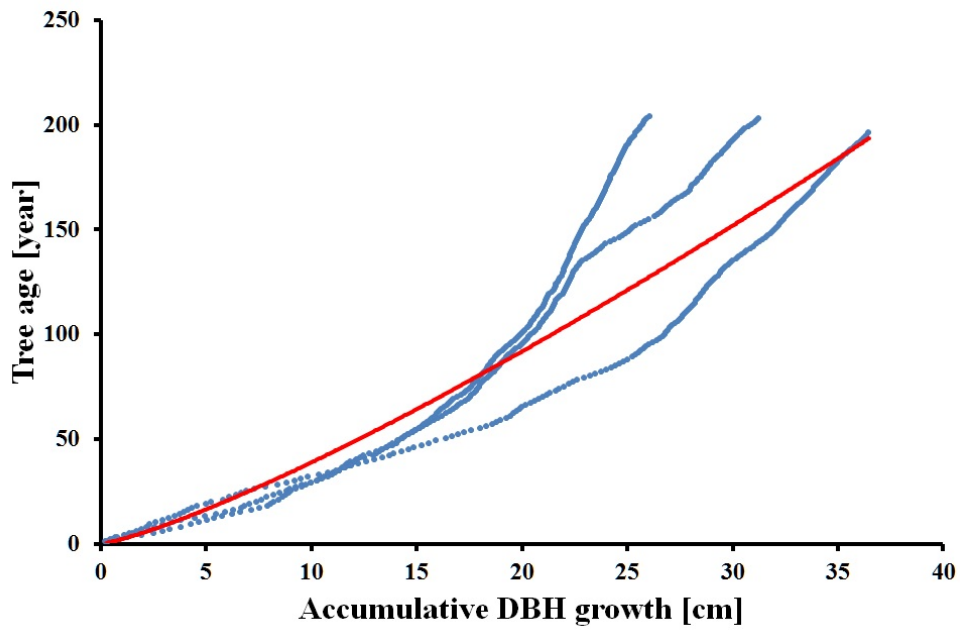


図 51 カラマツ胸高部における積算直径成長と樹齢の関係

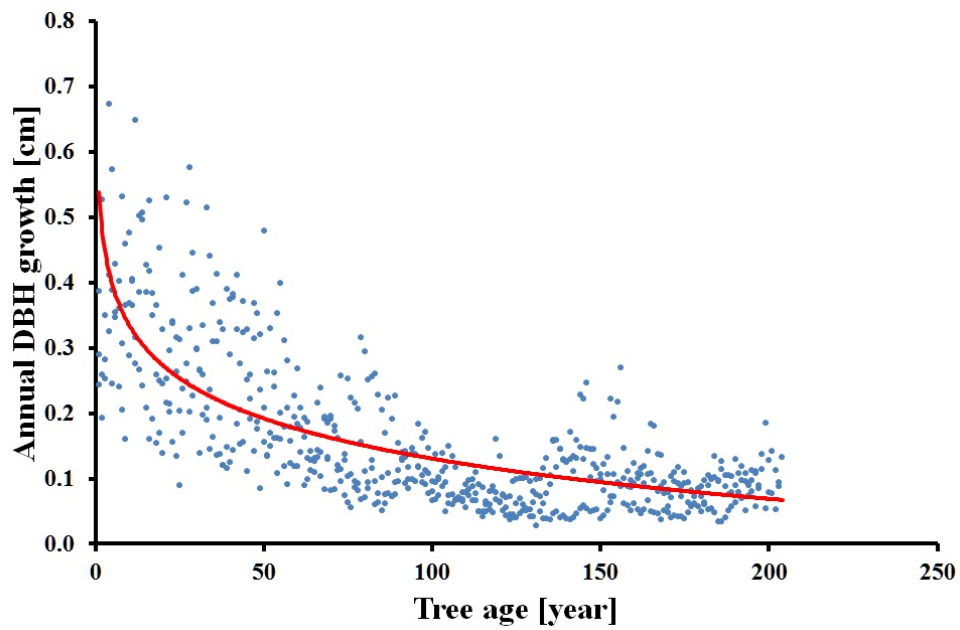


図 52 カラマツ樹齢と連年直径成長の関係

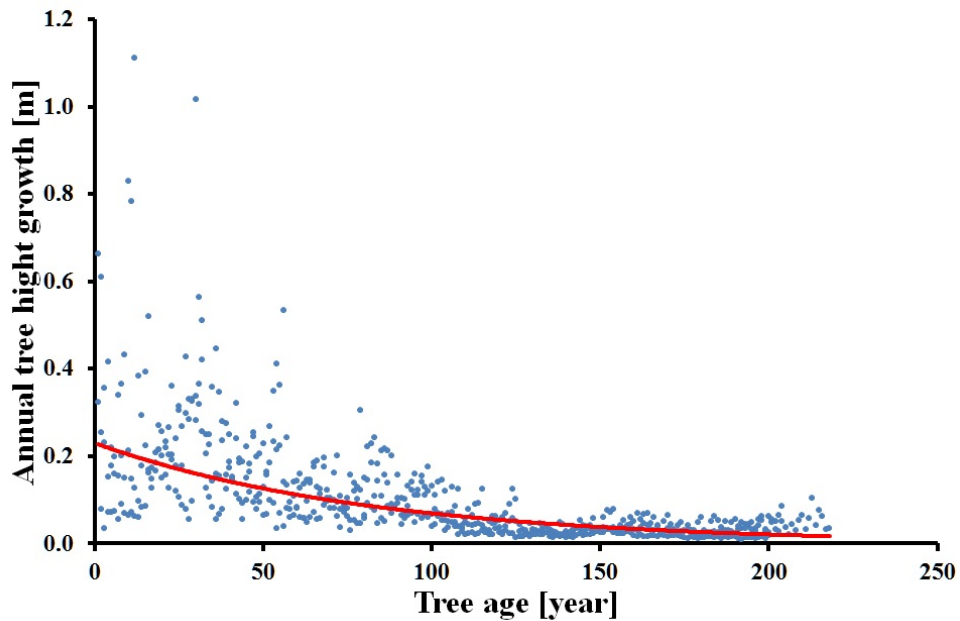


図 53 カラマツ樹齢と連年樹高成長の関係

ところで、森林火災にはその規模によって複数のパターンが考えられる（図 54）。一つ目は、図 54 中の Type I のような下層だけ燃えるような火災が挙げられる。このタイプは、下層間伐に似ており、火災後には上層木のみが残存し更新木が消失することが予想される。この場合のバイオマスの減少量は少ないが、立木本数の減少は大きいことが考えられる。次のタイプは Type II である。このタイプは強度な全層間伐もしくは皆伐と同じと考えられる。したがって、このタイプの火災が起きた後は、全ての木が無くなるか、大きな個体のいくらかがかろうじて残存すると予想される。最後は Type III である。これは、Type II とほとんど同じであるが、モンゴルでは、切り株の切断面が黒焦げになっている状態をよく目にする。これは、伐採した後に火災が起きたことは明らかである。材を取り出す際には、支障木が伐採されることが考えられるため、Type III は下層間伐と全層間伐の組み合わせによく似た火災の影響が残ると考えられる。Type II と Type III の場合、バイオマスと立木本数共に大きく減少することが予想される。

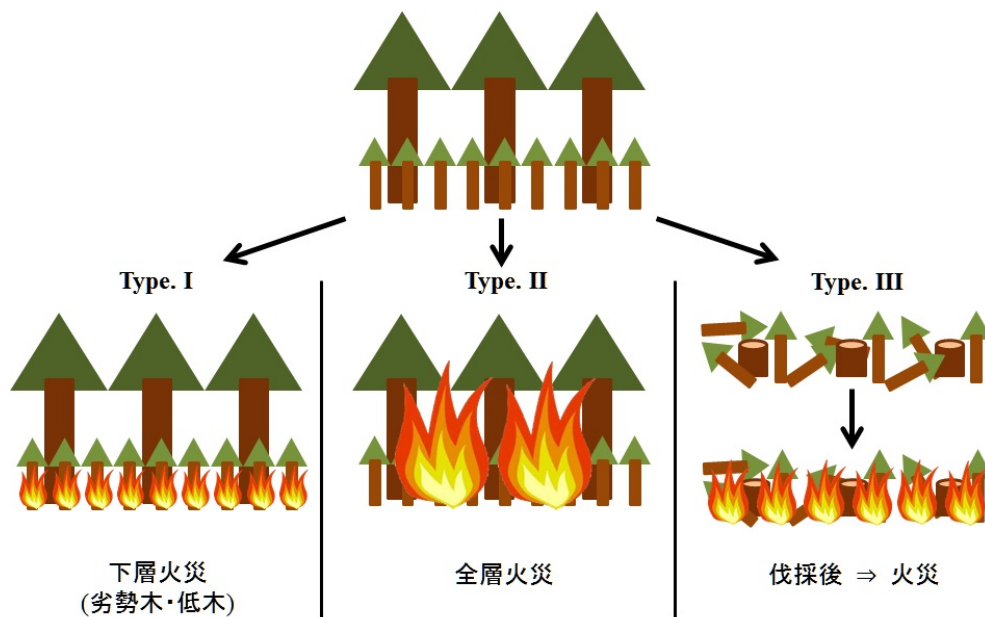


図 54 想定される森林火災の種類

さて本項では、Type I についてシミュレーションした。下層火災の中には、更新木のみが対象となるような火災 (Low fire severity)、中層木まで対象となる火災 (Moderate fire severity)、そして上層木まで燃えてしまうような火災 (High fire severity) といったの高さレベルで分けた三つが考えられる。そこで、本項のシミュレーションでは、L-06 林分について、Low・Mod・Hi の三種類を想定して樹高を基準に個体を削除した。つぎに、連年成長を加味した上で現在の L-07 林分と同じバイオマスになるまでの期間をシミュレーションした。

図 49 と図 50 より、L-07 林分は L-06 林分と比べて樹高 9m 以下の個体がほとんど無いことから、Low fire severity は樹高 9m 以下の個体が消失することとした。図 50 をみると L-07 林分は樹高 15m 付近を境に上層個体のグループと下層個体のグループに二分しているように見える。そこで、Moderate fire severity は、樹高 15m 以下の個体が消失することとした。L-07 林分では平均胸高直径が 30cm であることから (表 9)、High fire severity には胸高直径 30cm

以上の個体は残存可能であると仮定した。したがって、High fire severity についてのみ、樹高ではなく、胸高直径を基準に 30cm 未満が消失することとした。

シミュレーションの結果を図 55 (Low)・図 56 (Mod)・図 57 (Hi) に示した。表 12 にそれぞれのシミュレーションによる本数密度・総重量・胸高断面積合計の変化を示した。図 58 には、P-06 林分と P-07 林分の毎木調査に基づく林分構造を示した。図 59 には、シミュレーションに伴う P-06 林分の林分構造の変化を示した。また、図 60 には L-06 林分、図 61 には L-07 林分の直径階別本数分布を示した。さらに、図 62 から図 67 にかけては、シミュレーションに伴う直径階別本数の変化を示した。

任意の樹高以下すべてが消失することは、図 36 の相対成長関係から分かるとおり、直径級の中で小径級側から消失していくことになる。したがって、Y-N 曲線の位置や形は変わらずに右側から短くなっていく。図 55 (Low)・図 56 (Mod)・図 57 (Hi) のどのグラフからも、実際に右側から短くなり、本数密度と総重量が減少している事象が確認できる。

つぎに、図 55 (Low) に示したように、L-06 林分は 9m 以下が消失した時の本数密度を維持したまま 80 年経過すると、現在の L-07 林分の Y-N 曲線に接することがわかった。このことから仮想の下層火災後 80 年経過すると、現在の L-07 林分と同じような林分構造を持った森林になる可能性が示唆できる。

図 56 (Mod) では、15m 以下が消失すると 170 年後に現在の L-07 林分の Y-N 曲線に接することがわかった。図 57 (Hi) については、胸高直径 30cm 未満の木が消失すると 170 年経過しても L-07 林分の Y-N 曲線に接することはなかった。

以上のことから、15m 以下が燃えてしまうような火災が起きると、バイオマスが増加するのに時間が多くかかることがわかった。また、図 62 から図 67 の直径階別本数分布の変化からもわかるとおり、特に 15m 以下および胸高直径 30cm 以下が燃えてしまうような火災が起これば、林分を構成する個体の直径分

布範囲が狭くなることがわかった。さらに、火災後に新規侵入個体が入ってきたとしても、森林火災が多発する場合にはそれらが大きく成長する前に消失してしまう可能性がある。この場合、森林火災によって長い年月の間に巨木だけの森林構造になり、最終的には森林が崩壊していく可能性が考えられる。15m以下および胸高直径 30cm 以下が燃えてしまうような火災であっても、仮に、その発生頻度が 200 年に一回程度であれば新規侵入個体の成長が期待できる。したがって、この場合、森林として再生できる可能性がある。

170 年後以降の推定については、式 (25) と式 (26) ではそれぞれ負の値になるため算出ができなかった。170 年後以降の推定を行うためには、さらに高樹齢の個体を解析することとサンプル数を増やすことで近似式の精度を向上させる必要があると考えられる。

表 12 カラマツシミュレーションに伴う胸高断面積合計の変化

	L - 0 6						L-07	
	Origin	\leq TH 9 m Burnt 80年後		\leq TH 15 m Burnt 170年後		< DBH 30 cm Burnt 170年後	Origin	
積算本数 N/ha	1740	700		400		260	840	
積算重量 ton/ha	463.881	396.445	583.816	335.290	486.815	280.854	375.724	615.131
胸高断面積合計 m ² /1.3m height	55.185	47.765	68.480	38.327	56.718	34.036	44.058	72.621

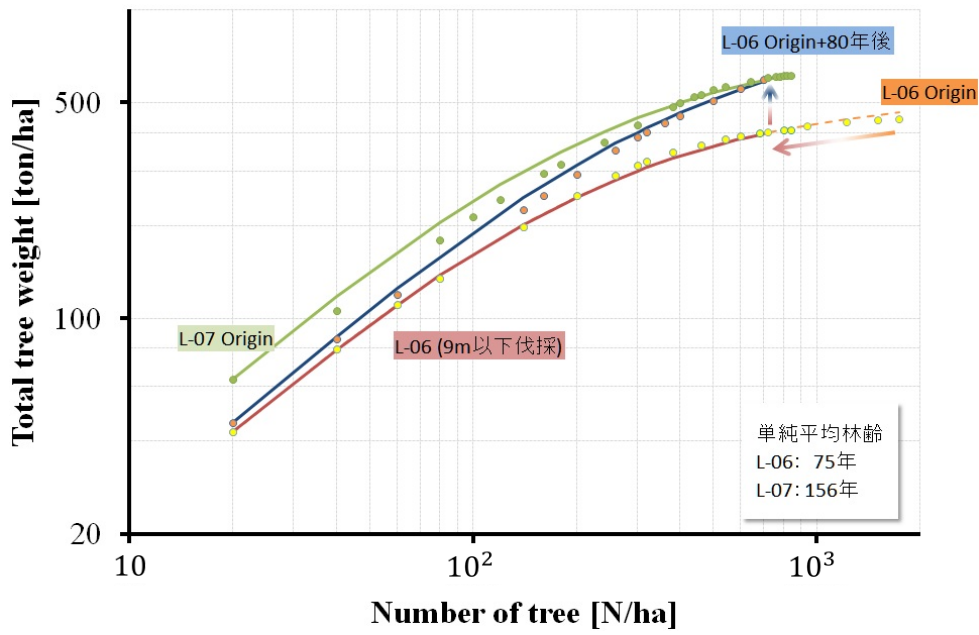


図 55 Low fire severity のシミュレーション

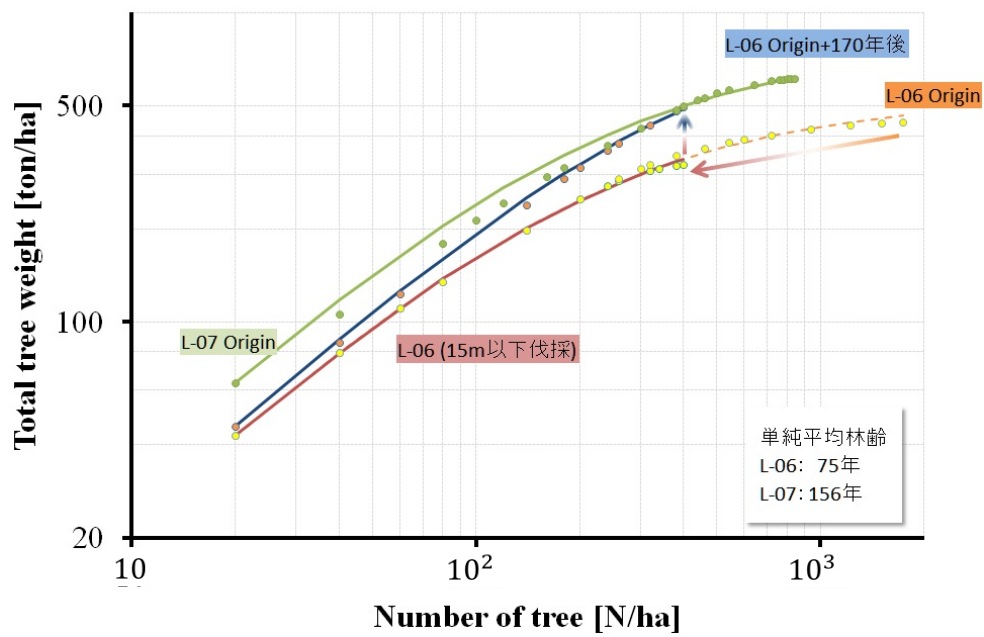


図 56 Moderate fire severity のシミュレーション

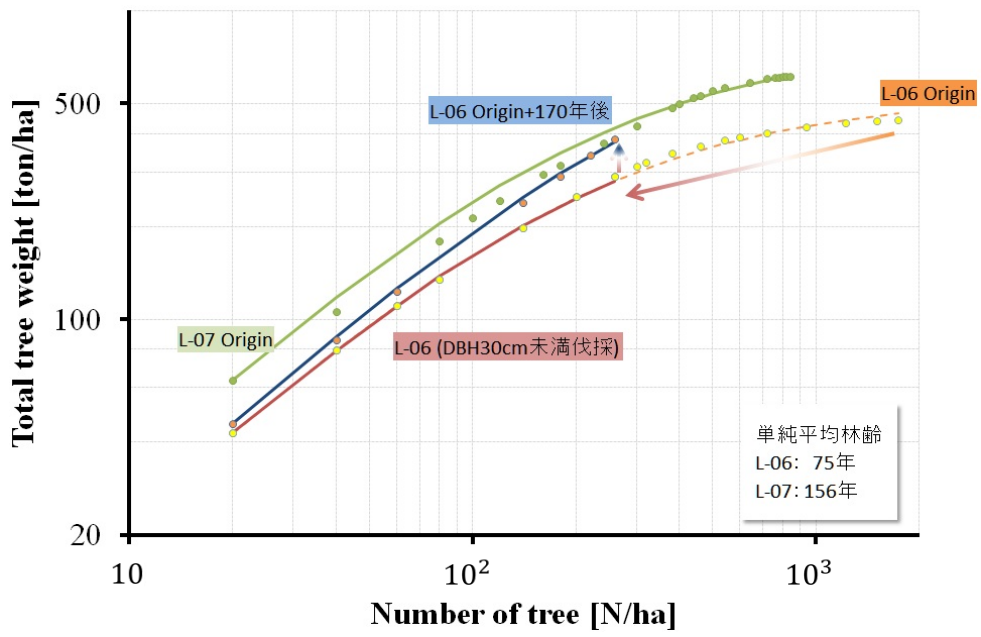


図 57 High fire severity のシミュレーション

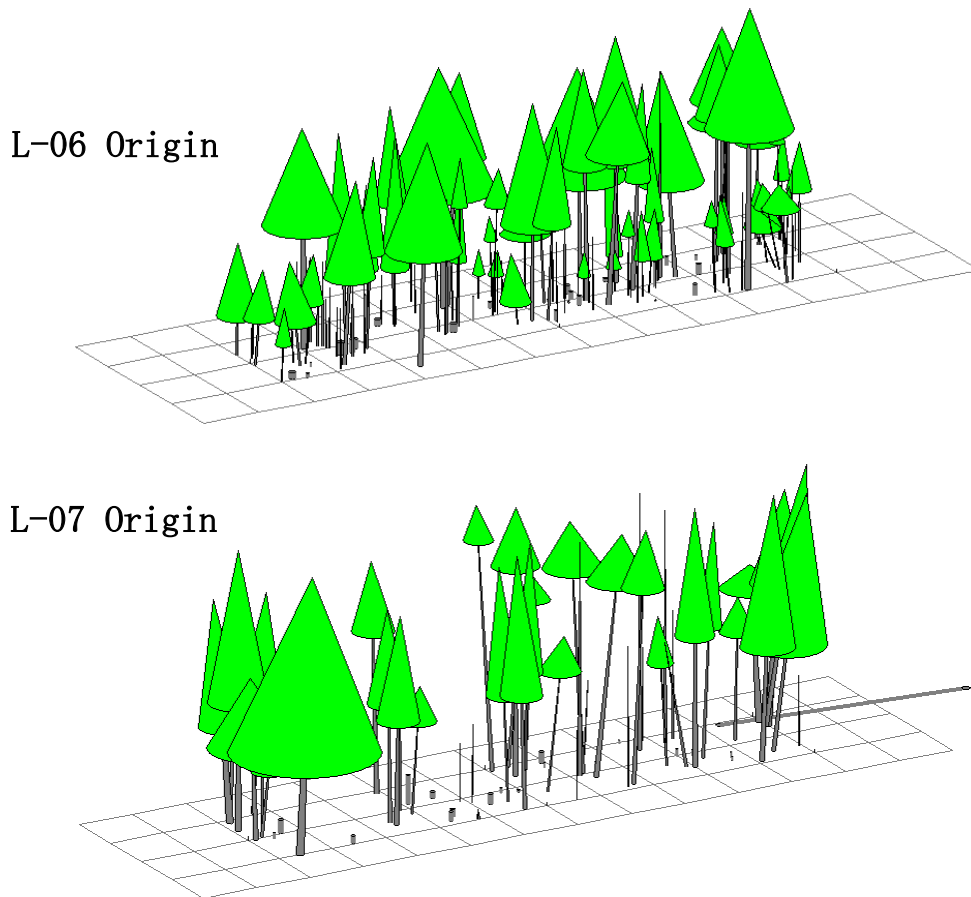


図 58 L-06 と L-07 林分の林分構造

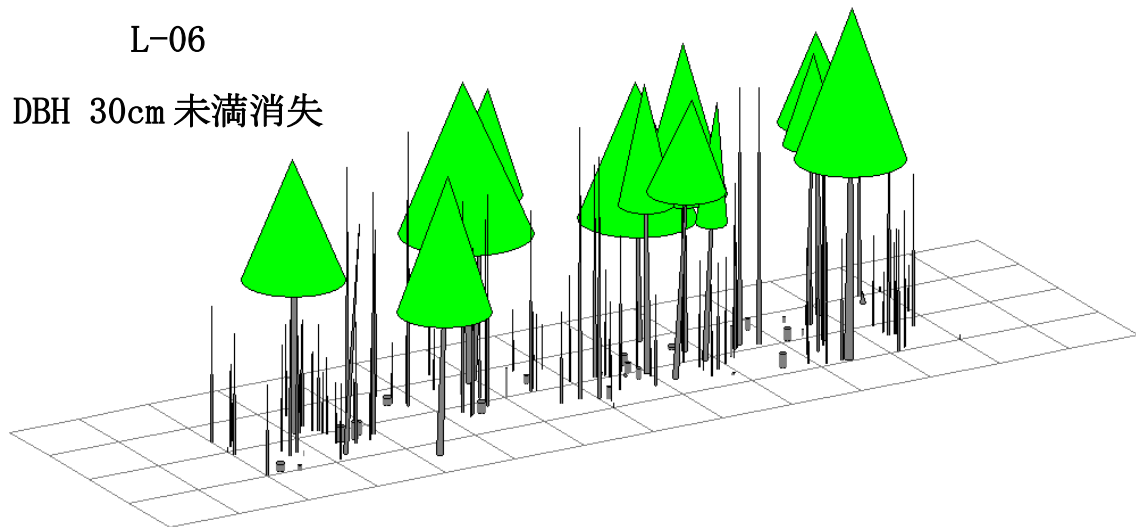
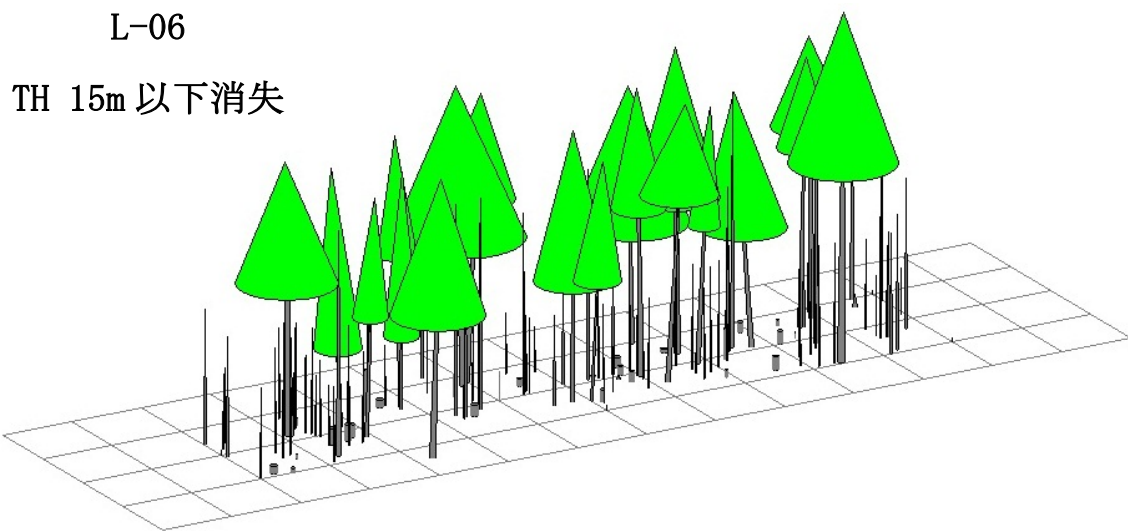
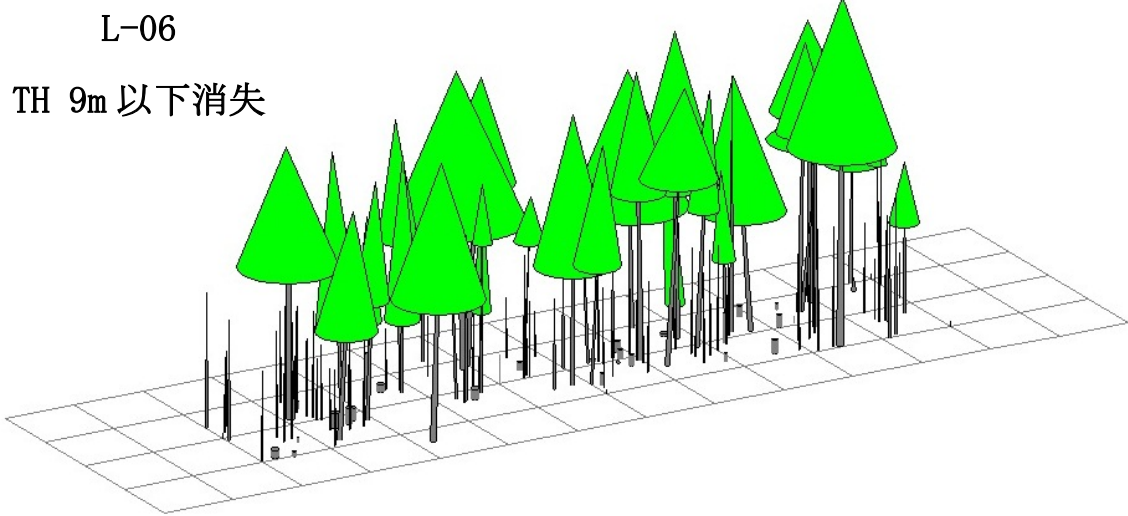


図 59 L-06 林分の林分構造シミュレーション

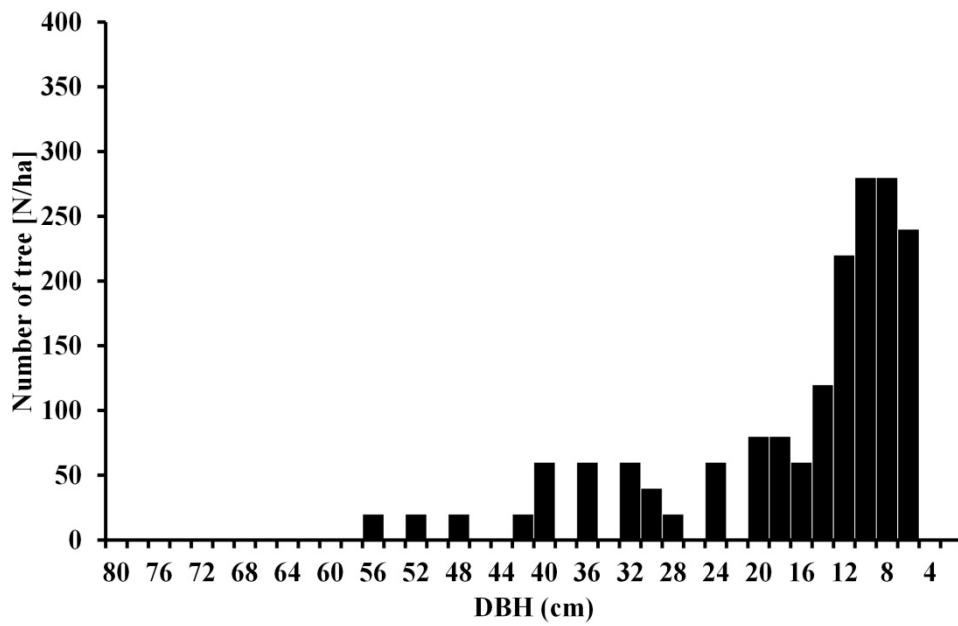


図 60 カラマツ毎木調査データに基づく L-06 林分における直径階別本数分布
 注) 収量-密度図の Y-N 曲線とあわせるために横軸は左右反転してある。

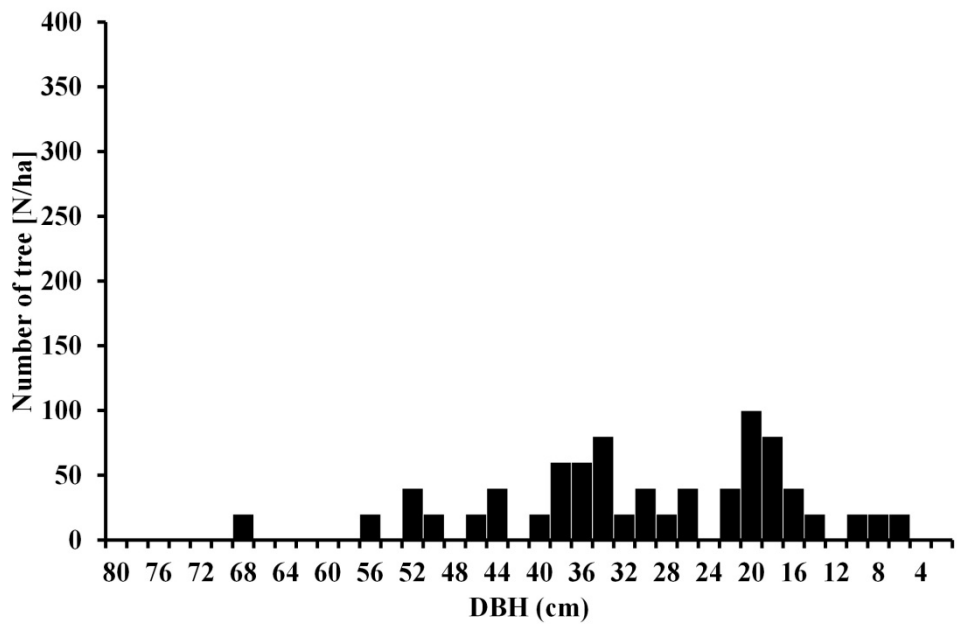


図 61 カラマツ毎木調査データに基づく L-07 林分における直径階別本数分布
 注) 収量-密度図の Y-N 曲線とあわせるために横軸は左右反転してある。

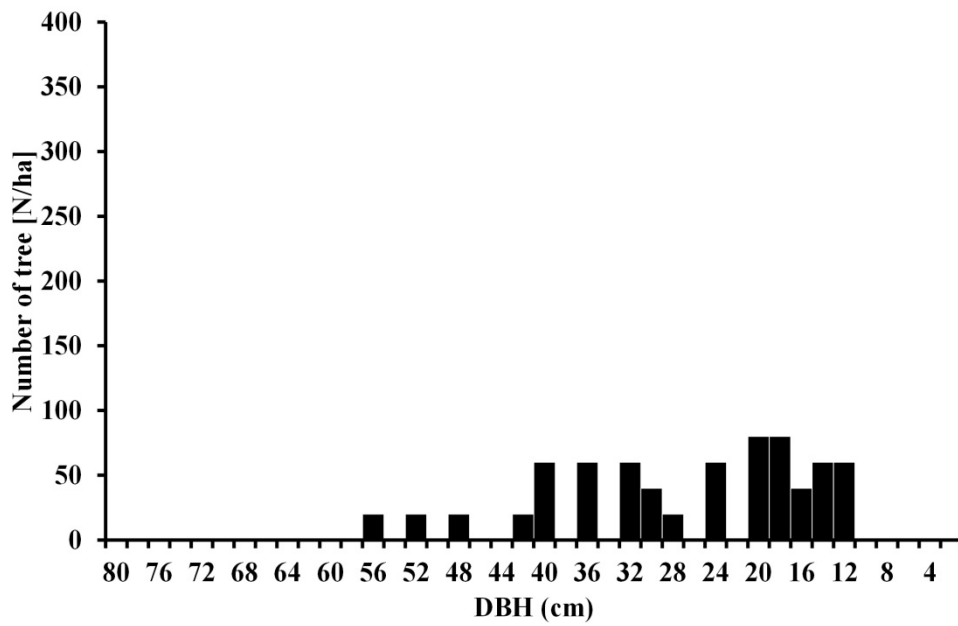


図 62 カラマツ L-06 林分における樹高 9m 以下伐採後の直径階別本数分布
 注) 収量-密度図の Y-N 曲線とあわせるために横軸は左右反転してある。

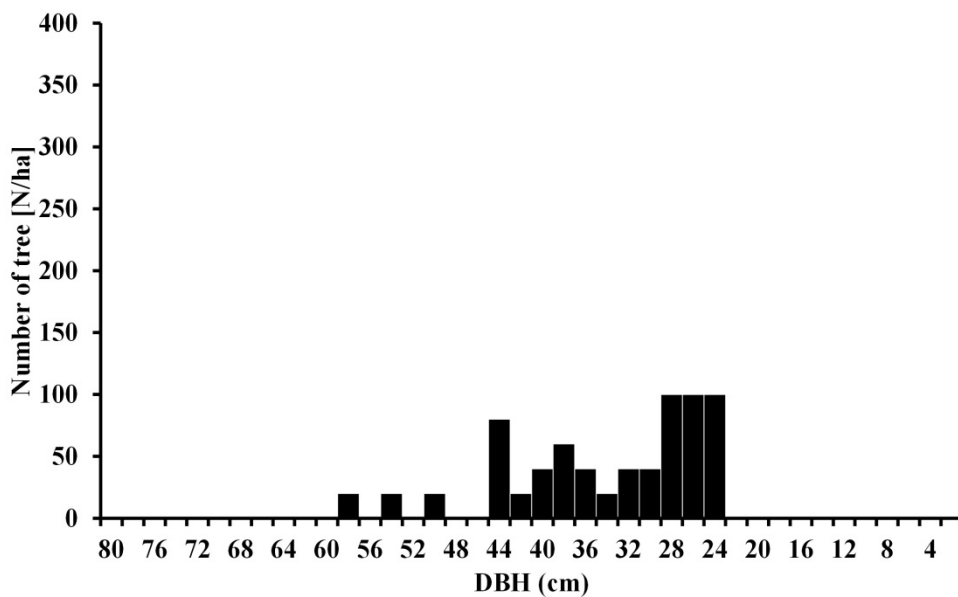


図 63 カラマツ L-06 林分における 9m 以下伐採後 80 年経過したときの直径階別本数分布
 注) 収量-密度図の Y-N 曲線とあわせるために横軸は左右反転してある。

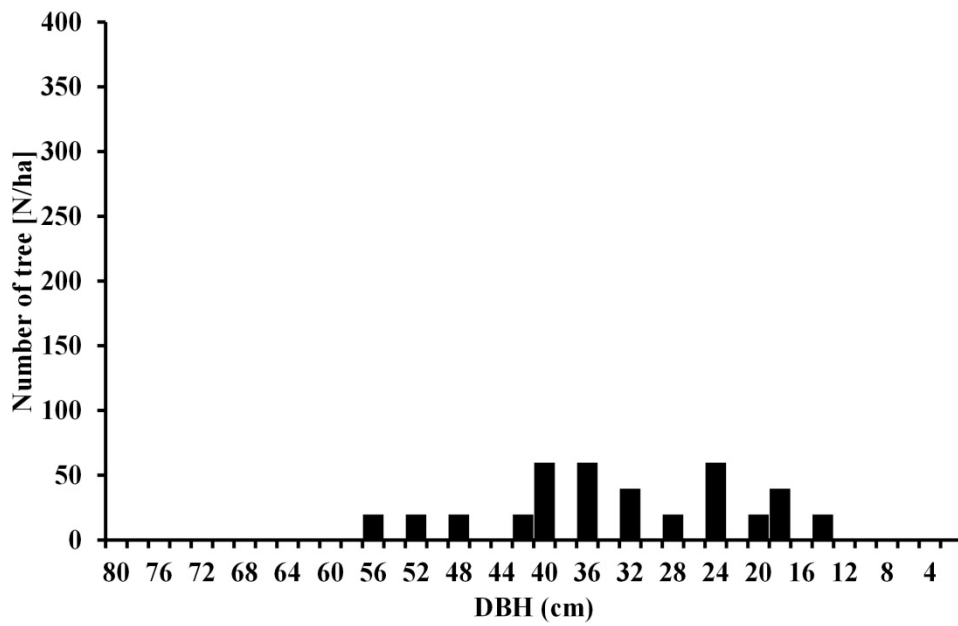


図 64 カラマツ L-06 林分における樹高 15m 以下伐採後の直径階別本数分布
 注) 収量-密度図の Y-N 曲線とあわせるために横軸は左右反転してある。

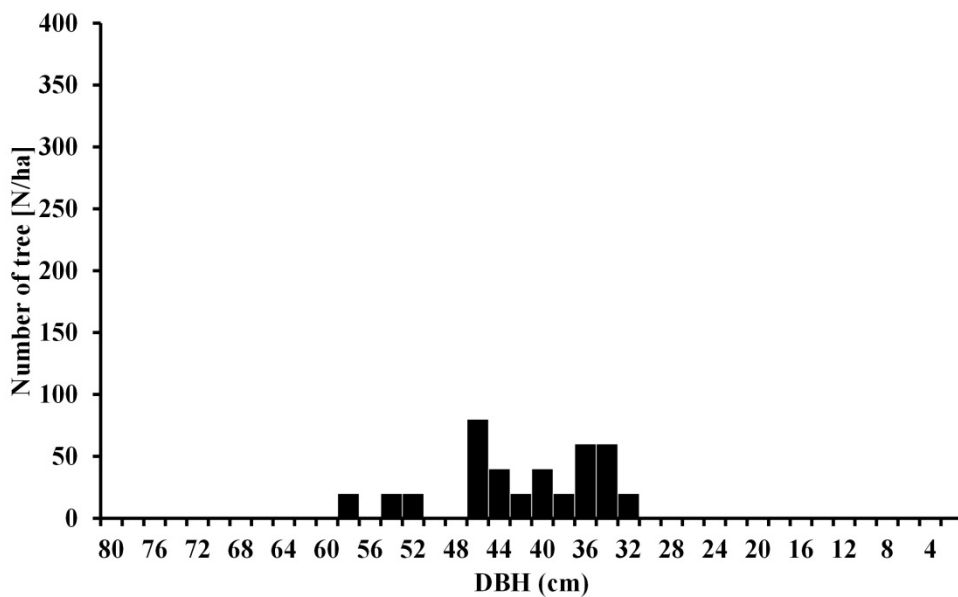


図 65 カラマツ L-06 林分における 15m 以下伐採後 170 年経過したときの直径階別本数分布
 注) 収量-密度図の Y-N 曲線とあわせるために横軸は左右反転してある。

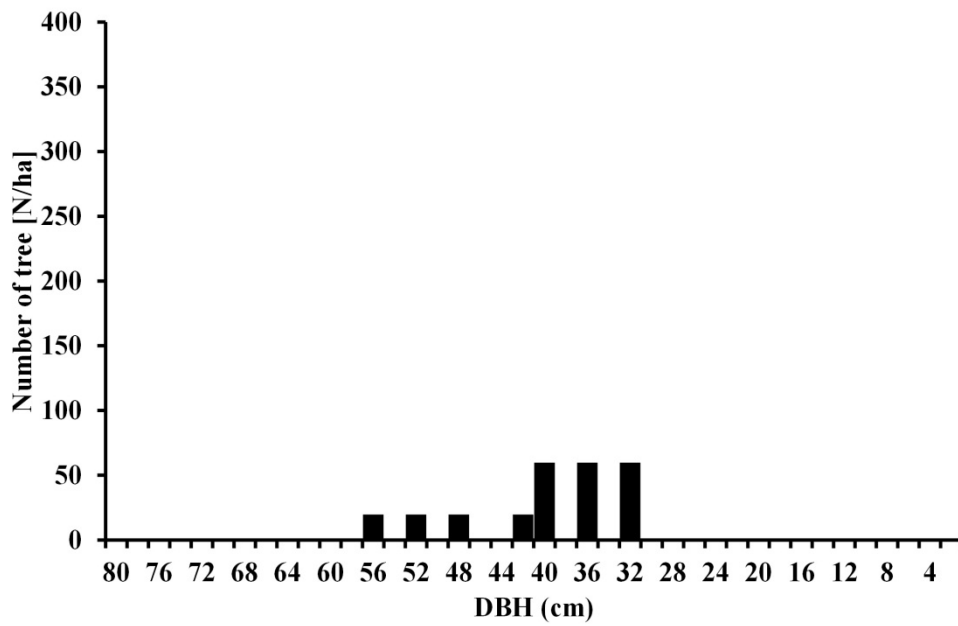


図 66 カラマツ L-06 林分における胸高直径 30cm未満伐採後の直径階別本数分布
 注) 収量-密度図の Y-N 曲線とあわせるために横軸は左右反転してある。

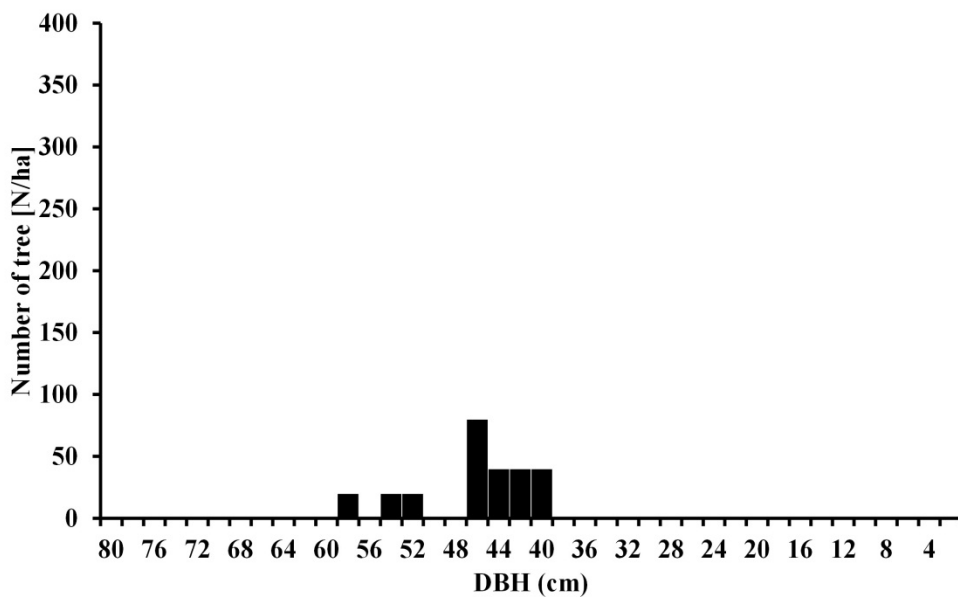


図 67 カラマツ L-06 林分における 30cm未満伐採後 170年経過したときの直径階別本数分布
 注) 収量-密度図の Y-N 曲線とあわせるために横軸は左右反転してある。

第5章 結論

本研究は、密度管理手法の一つである収量-密度図について、これまでの指標であった幹材積値を重量値とすることで、新しい概念の収量-密度図を構築することを一つの目的とした。重量値算出の際、既存研究では樹幹内容積密度を一定値と仮定して単木重量を算出している例が多い中、本研究では樹幹解析と軟X線デンシトメトリー法による年輪解析を組み合わせることで年輪毎の重量値を算出し、胸高直径と樹高の二つのパラメータによる重量式を構築した。このことから精度が高く新規性のある手法で単木毎の重量値を算出できた。また、人工林である海岸クロマツ林において成長段階に応じた多数の毎木調査を実施したことで、林齢毎の多数のY-N曲線を示すことができた。これらを組み合わせることで、重量値を指標とした収量-密度図の構築ができた。さらに、収量-密度図に時間軸としての平均的な林齢に応じたY-N曲線を提示することもできた。これらは、ソルバーの利用などコンピュータを最大限に活用することで比較的容易に実現できることを実証した。

緯度経度、気候帯、樹種が異なるモンゴルカラマツ天然林を対象として、重量値による収量-密度図の普遍性の検証することを二つ目の目的とした。検証の結果、海岸クロマツ林のように意図的に最多密度を維持する施業が行われていないカラマツの天然林においても、重量値による収量-密度図を構築することができた。これにより、重量値を指標とする収量-密度図の応用範囲が広いことを実証した。

三つ目の目的である森林構造の変化に伴うバイオマスの変動シミュレーションでは、海岸クロマツ林においては材線虫病のリスク評価として、カラマツ天然林においては山火事後のバイオマスシミュレーションとして、それぞれ重量値を指標とした収量-密度図が活用できることを実証した。

これらの結果から、重量値を指標とすることで森林を炭素吸収源として評価することが可能であるといえる。また、重量値を組み合わせた収量-密度図は、直径階級分布で森林構造を把握でき、予測した林分の再現性が優れている点などから、高炭素蓄積を目的とする将来予測が可能な密度管理として応用できることを実証できたといえる。さらに、その普遍性及び有用性が高いことから、世界中で持続可能な森林管理手法として活用できる可能性があり、特に、地球温暖化問題における森林の炭素固定機能を考える際に有益なものである。

重量値によって森林を評価・管理することは、これまでほとんど評価されてこなかった森林の炭素固定機能を適正に評価・管理できることにつながる。したがって、重量値を指標とする密度管理は、時代のニーズに適合した次世代型の密度管理手法の一つであり、今後必要とされる概念であると結論付ける。

おわりに

本研究を進めるにあたり、年輪解析を行うことで収量-密度図の問題点が明らかになった。その一つは、等限界直径線を用いることによる、理論重量値と実測重量値との誤差が指摘できる。各直径階の最大本数密度を通る曲線であるから、必然的に理論値の方が大きくなるが、収量-密度図を使用する場合には常にこの誤差を念頭に置いておく必要があるだろう。または、等限界直径線以外の線を用いる必要があるのかもしれない。二つ目は、菊沢がこれまで示してきた間伐後に一定の林分成長量を加算した時の Y-N 曲線の移動経路と、本研究において個体別成長量を加算した時の移動経路が一致しなかったことである。樹齢と連年成長の関係が右下がりであることや、直径成長と樹齢の関係が直線関係ではないことから、大きい木も小さい木も同じだけ成長するのではなく、樹齢に応じて直径および成長量は変化すると考えられる。このため、Y-N 曲線が上方に平行移動することは考えにくい。むしろ左側（直径級大）よりも右側（直径級小）の方が先行するように上昇していくと考えられる。他の研究にみられるように、比較的若い人工林、特に一斉林に対して短期的収穫予測をする場合には、その直径階分布範囲が比較的狭いことと若齢期に成長が良いと考えられることから、Y-N 曲線が平行移動して上昇するようにみえる可能性が考えられる。Y-N 曲線の移動経路については、今後の重要な検討課題である。今後、収量-密度図を利用して、より精度の高い将来の森林構造の予測を行うためには、さらに多くの毎木調査データを追加するとともに、定点調査地を設け、連年の年輪幅変動も加味した各曲線の精度を高めていくことが必要である。

謝辞

学部生の頃より長きにわたりご指導ご鞭撻くださった主指導教員である野堀嘉裕教授には特に感謝の意を表す。モンゴルでは調査のお手伝いをしてくださり、また終止熱心なご指導を頂いた武田一夫教授（帯広畜産大学）・Lopez Larry 教授（山形大学）・溝田智俊教授（元岩手大学）・石田祐宣助教授（弘前大学）に感謝の意を表す。さらに、収量-密度図についてご指導くださった小山浩正教授（山形大学）、学位論文の内容において細部に至るまでアドバイスやご意見をくださった國崎貴嗣教授（岩手大学）に感謝の意を表す。

本研究を進めるにあたり、貴重な海岸クロマツ林の伐採と毎木調査は非常に重要な位置づけであった。これらの調査協力をしてくださった庄内森林管理署の職員の方々、並びに伐採作業をしてくださった(有)遠田林産の作業員の方々にこの場をおかりして厚くお礼申し上げます。さらに、X線撮影において施設・機材等を快くお貸しくださり、使用方法等をご指導くださった秋田県立大学付属木材高度加工研究所の高田克彦教授、そして WinDENDRO を長期間にわたりお貸しくくださった野田正人氏に心から感謝の意を表す。

森林情報学研究室の修士・4年生の学生諸君には、毎木調査の手伝いや試料加工の手伝いなど多くの作業を手伝って頂いたことに感謝の意を表す。

引用文献

- 安藤貴 (1966) 林分密度管理図とその使い方. 農林出版
- 安藤貴 (1968a) 同齡単純林の密度管理に関する生態学的研究. 林試研報 210
1-153
- 安藤貴 (1968b) 密度管理. 農林出版, 246pp, 東京
- 安藤貴 (1982) 林分の密度管理. 農林出版, 126pp, 東京
- Chandra A, Seca G and Hena M. K. A. (2011) Aboveground biomass production of *Rhizophora apiculata* Blume in Sarawak mangrove forest. *Am J Agric Biol Sci* 6 469-474
- Deshar R, Sharma S, Mouctar K, Wu M, Hoque A and Hagihara A (2012) Self-thinning exponents for partial organs in overcrowded mangrove *Bruguiera gymnorrhiza* stands on Okinawa Island, Japan. *Forest Ecology and Management* 278 146-154
- 深沢和三 (1967) スギ樹幹内の材質変動に関する研究 産地を異にする林木樹幹の未成熟材などの区分とその材質特徴. 岐阜大学農学部研究報告 47-127
- 深沢和三・大谷諄 (1972) ミズナラ材密度の樹幹内変動に及ぼす年齢効果. 北海道大學農學部 演習林研究報告 29 (2):171-188
- 藤森隆郎 (2005) 間伐はなぜ必要か. 森林科学 44:4-8
- 芳賀敏郎 (2003) 身近な Excel ソルバーによる非線形回帰. 日本統計学会講演報告集 71 127-128
- Hishinuma Y, Nakata R and Fukazawa K (1992) Analysis, Using a Three-dimensional View, of the Process of Tree Growth (2) : Distributions of basic density and fiber direction responding to a stem form. *Research bulletins of the college experiment forests*

Hokkaido University 49 (1):23-35

Hoque, R.A.T.M., Sharma S, Deshar R, Analuddin K and Hagihara A (2010) Allometric relationships for estimating the aboveground mass and leaf area of mangrove *Bruguiera gymnorrhiza* trees in Manko Wetland, Okinawa Island, Japan. Proceedings of 2010 International Conference on Environmental Science and Development. 441-446

飯塚和也・生方正俊・坂本庄生 (2001) アカエゾマツの成長および容積密度数の産地間変異. 日本林學會誌 83 (1):53-57

猪瀬光雄 (1997) 北海道の森林資源の現状を考える. 北方林業 49 : 269-272

IPCC (2003) Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. 631pp, IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Hayama

石橋聡・鷹尾元・高橋正義・駒木貴彰・飯田滋生 (2006) 北海道地方版カラマツ収穫予想表. 森林総合研究所北海道支所

石原辰雄 (2001) 経営系学部数学教育における Excel ソルバー機能の活用. 年会論文集 (17):194-195

伊藤潤哉 (2008) モンゴル北部・永久凍土地帯における森林火災跡地での現地調査. 平成 19 年度帯広畜産大学講演会報告(36):57-59

片倉正行 (2001) 間伐等森林施業が炭素貯留に与える影響調査. 長野県林業総合センター業務報告(平成 12 年度) 32-33

嘉戸昭夫・西村正史 (2004) クロマツ海岸林の密度管理図. 富山県林業技術センター研究報告 (17):1-9

河原輝彦・長谷川敬一 (1987) クリが優占する落葉広葉樹林における林分構造の経年推移. 林試研報 344:117-129

川名明・片岡寛純 (2006) 造林学 (三訂版). 東京, 株式会社 朝倉書店

- 菊沢喜八郎 (1978a) トドマツ人工林における限界直径点の動き. 日本林學會誌 60 (8):313-314
- 菊沢喜八郎 (1978b) 北海道における天然生広葉樹林の収量-密度図. 日本林學會誌 60 (2):56-63
- 菊沢喜八郎 (1979) ミズナラを主とする広葉樹林の収量-密度図. 日本林學會誌 61 (1):8-14
- 菊沢喜八郎 (1980) 秋田スギ人工林における等限界直径線の二, 三の性質. 日本林學會誌 62 (6):234-237
- 菊沢喜八郎 (1981a) 収量-密度図-1-その考え方と使いかた. 北方林業 33 (3):67-71
- 菊沢喜八郎 (1981b) 収量-密度図-2-Y-N 曲線の性質. 北方林業 33 (4):107-110
- 菊沢喜八郎 (1981c) 収量-密度図-3-Y-N 曲線の位置関係. 北方林業 33 (5):132-134
- 菊沢喜八郎 (1981d) 収量-密度図-4-ミズナラ林の収量-密度図. 北方林業 33 (6):164-166
- 菊沢喜八郎 (1981e) 収量-密度図-5-間伐による Y-N 曲線の移動. 北方林業 33 (7):190-193
- 菊沢喜八郎 (1981f) 収量-密度図-6-間伐効果のあらわしかた. 北方林業 33 (8):215-223
- 菊沢喜八郎 (1983a) 北海道の広葉樹林. 北海道造林振興協会
- 菊沢喜八郎 (1983b) 林分の緊密度とそれを応用した収量-密度図の改良. 北海道林業試験場報告 1-7
- 吉良龍夫 (1957) 密度・競争・生産. 大阪営林局

- 小塚力 (2010) 海岸林の造成と管理の史的展開. 森への働きかけ—森林美学の新体系構築に向けて, 湊克之他編, 183-197, 海青社, 滋賀
- 木平勇吉 (1995) システム収穫表プログラム. 文部科学省研究費補助金試験研究(B)研究報告書
- 真鍋昭 (1982) トドマツ人工林の収穫量と収益の. 予測システムに関する研究.
- 真坂一彦 (2001) クロマツ海岸林の間伐方法 どれくらい伐ったら良いの?. 北海道立林業試験場 光珠内季報 125:1-5
- 松本光朗・中島徹・細田和男 (2011) システム収穫表 LYCS の改良. 日本森林学会誌 93 (4):187-195
- 右田伸彦・米沢保正・近藤民雄 編集(1973) 木材科学(上). 共立出版株式会社, 537pp, 東京
- Minato K, Ujiie M and Hishinuma Y (1989) Growth and Wood Quality of Sugi and Hinoki Trees in the Plantations of the Wakayama Experiment Forest. Research bulletins of the college experiment forests Hokkaido University 46 (2):223-247
- 守口 海・植木達人・井上 裕(2011) : Gompertz 型自己間引き曲線の係数推定. 日本森林学会誌 93 (3):113-122
- 日本国 (2008) 京都議定書 3 条 3 及び 4 の下での LULUCF 活動の補足情報に関する報告書.
- 野堀嘉裕・永田義明・千葉茂 (1988) カラマツ属の育種に関する研究(XI) 軟 X 線写真によるカラマツの年輪幅, 容積密度のクローン間差異の検定. 日本林学会北海道支部会論文集 36 105
- 野堀嘉裕・坂本武・佐藤清左衛門 (1990) 植栽密度別アカエゾマツ人工林の成長経過と収量-密度図. 日本林学会北海道支部論文集 38 177-179

- 野堀嘉裕・林田光祐・中島勇喜 (2000) 日本海沿岸北部における海岸林の特徴
現況. 東北森林科学会 5 (2):69-78
- Nobori Y(2000) Forest Window. Japan society of Forest planning Press, 100pp
Tokyo
- 野堀嘉裕・佐久間陽之・鈴江宏一郎・高橋教夫 (2002) 植生図からみた日本海
沿岸北部における海岸域の土地利用. 森林計画学会誌 36 (1):11-19
- Nobori Y, Keiko S, Onodera H, Noda M and Katoh T (2004) Development of stem
density analyzing system combined X-ray densitometry and stem
analysis. Journal of Forest Planning 10(2):47-51
- 野堀嘉裕・瀧誠志郎・本田愛・斉藤正一 (2010) ミズナラ二次林樹幹部の重量
成長について. 東北森林科学会誌 15 (2):58-63
- 野々田秀一・渋谷正人・斎藤秀之・石橋聰・高橋正義 (2008) トドマツ人工林
への広葉樹の侵入および成長過程と間伐の影響. 日本森林学会誌 90
(2)2008:103-110
- 温室効果ガスインベントリオフィス編 (2012) 日本国温室効果ガスインベント
リ報告書 2012年4月. 573pp, 国立環境研究所, つくば
- Parker M.L and Meleskie K.R (1970) Preparation of X-ray negatives of
tree-ring specimens for dendrochronological analysis. Tree-ring
bulletin 30 (1-4):11-22
- Polge H (1970) The use of X-ray densitometric methods in dendrochronology.
Tree-ring bulletin 30 (1-4):1-10
- 四手井綱英・只木良也 (1962) 林木の競争に関する研究(III) : アカマツ幼樹
を用いた小型林分での機械的な間伐試験. 日本林學會誌 44 (5):129-139
- Shinozaki K and Kira T (1961) The C-D rule, its theory and practical uses
(Intraspecific competition among higher plants X). Journal of biology,

Osaka City University 12 69-82

- 白石則彦 (2005) 収穫予測システムの過去・現在・未来. 森林技術 764 9-12
- 只木良也 (1963) 競争密度効果を基にした幹材積収穫予測. 林試研報
154:1-19
- 高宮立身 (2001) 間伐が森林の炭素貯留量に与える影響について (I) -スギ
30年生林分の間伐区と無間伐区における貯留量の比較-. 日林九支研論集
54 163-164
- 高宮立身 (2002) 間伐が森林の炭素貯留量に与える影響について (II) -スギ
25年生林分の間伐区と無間伐区における貯留量の比較-. 日林九支研論集
55 177-178
- 武田一夫 (2005) モンゴル北部森林地帯における地球温暖化の永久凍土や森林
におよぼす影響に関する調査. 平成 16 年度帯広畜産大学講演会報告
(33):41-43
- Taki S, Nobori Y and Yasuda K (2009) The estimation of the amount of carbon
fixation of the coastal black pine forest. Conference on Sustainable
Forest Management and Carbon Sequestration in Taiwan and Japan 56-67
- 瀧誠志郎・野堀嘉裕 (2011) CO₂ 固定機能, 海岸林との共生. 中島勇喜・岡田
穰 編著, 山形大学出版会, 1-3)-(2)-b) 62-67
- Taki S, Nobori Y and Lopez Caceres, ML (2012) Method for estimation of stem
carbon fixation of Japanese black pine by combining stem analysis and
soft X-ray densitometry. J For Res DOI:10.1007/s10310-012-0382-x
- 梅津勘一 (1996) 庄内砂丘の海岸林. 土木学会誌 81 (14):22-23
- 梅津勘一 (2003) 庄内砂丘の海岸林 : 大いなる遺産を未来につなぐ. 東北公
益文科大学総合研究論集 : forum21 5 195-219
- 山形県森林研究研修センター森林環境部 (2008) 樹形を目安とした庄内海岸ク

ロマツ林の管理. (online), available from

〈 <http://www.pref.yamagata.jp/ou/norinsuisan/142003/H20shingijutsu.html>〉, (accessed December 15, 2012).

八坂通泰・滝谷美香・山田健四 (2011) システム収穫表「北海道版カラマツ人工林収穫予測ソフト」の開発. 北海道林業試験場研究報告 (48):65-74

八杉龍一・小関治男・小谷雅樹・日高敏隆 編集(2002) 岩波 生物学辞典 第4版. 株式会社 岩波書店, 東京

摘要

重量値による収量-密度図の構築

我が国における収穫予測を含む森林の密度管理には、様々なものがあり利用されているが、本研究では、階級分布も含めた収穫予測ができる収量-密度図に着目した。いずれにしても、これまでの森林の密度管理手法は、幹材積の収量を把握・管理するものであった。

地球温暖化防止京都会議(COP3)では、森林を炭素吸収源とした。森林を炭素吸収源として捉える際には、幹材積よりも重量値を基準に把握・管理すべきだと考えた。特に、木材生産を目的としていない森林を炭素吸収源として評価するには重要な意味を持つ。また、時代のニーズに適合した次世代型の密度管理の一つの形だと考える。さらに、これまでの諸密度管理に共通する最多密度曲線は、本来重量値によって定義づけられるものである。

そこで、本研究では重量値による収量-密度図を構築することを一つ目の目的とした。収量-密度図上に最多密度曲線を引くためには、調査地において初期密度が大きく、すでに最多密度に達して、自然間引きを起こしている必要がある。そこで、庄内地域の海岸クロマツ林を調査地とした。海岸クロマツ林は、初期密度が大きく、最多密度に達しておりすでに自然間引きが起きていることが期待できる。

続いて、重量値による収量-密度図の普遍性の検証のために、緯度経度・気候帯が海岸クロマツと異なるモンゴル北部フスグル地方のシベリアカラマツ天然林において重量値による収量-密度図の構築を二つ目の目的とした。

最後に三つ目の目的は、重量値による収量-密度図を使った森林動態シミュレーションである。ここでは、間伐以外による森林動態をシミュレーションした。

本研究では、収量-密度図を作成するにあたり、樹幹解析と年輪解析を使用し

て、重量値を年輪毎および高さ方向別に算出した。これを基に相対成長関係から、重量値による収量-密度図を作成した。なお、諸係数は、最小二乗法を繰り返し行い最適解を自動算出する Microsoft 社製の Excel2010 のソルバー機能を使用した。

重量値による収量-密度図は海岸クロマツ林とモンゴルカラマツ天然林のどちらでも構築することができた。海岸クロマツ林における最多密度線の傾きは -0.5075 となり、自然間引きの法則を忠実に再現するものとなった。なお、モンゴルでは便宜上 -0.5 とした。また、海岸クロマツ林では B ポイントから林齢別 Y-N 曲線を算出し収量-密度図上に描画した。さらに、重量値の実測値と理論値を比較したところ、クロマツ林では約 8%、モンゴルでは約 6% 程度理論値の方が多くなることがわかった。これは、等限界直径線の性質から必然的に平均値より大きくなる。

海岸クロマツ林において、各林分の Y-N 曲線を算出してみると、材線虫被害木の伐採が行われている影響から最多密度に達していない林分がみられた。そこで、2011 年度の材線虫被害木伐採実績のデータを基に、5 年後までのシミュレーションを行った。なお、シミュレーションを行う上で、年輪解析のデータを基に、樹齢に伴う連年の直径成長と樹高成長を加味した。その結果、毎年同規模の材線虫被害による伐採を行うとバイオマスは減少し続け、林分が衰退してしまうことがわかった。しかし、伐採後に 3 年程度の材線虫被害がなければ、ある程度林型が維持できる可能性が示唆された。

モンゴルカラマツ林では、森林火災が頻繁に発生しているため、森林火災の規模を樹高 9m 以下 (Low)、15m 以下 (Mod)、胸高直径 30cm 未満 (Hi) が火災で焼失するとして、調査林分の中で最大バイオマスだった林分に到達するまでの時間をシミュレーションした。Low では 80 年、Mod では 170 年、Hi では 170 年以上かかるという結果だった。したがって、森林火災が毎年頻発する場合、

下層にある新規侵入個体の成長は期待できない。このため上層木だけが残存する形となり、将来的には森林が崩壊していく可能性が考えられる。逆に200年単位での森林火災であれば、火災後も森林として再生できる可能性があると考えられる。

本研究における収量-密度図は、森林を炭素吸収源として評価をするものである。重量値であることで、炭素重量に簡単に換算することもできる。さらに、目標とする炭素蓄積量に向けた施業計画を立てることに応用できる可能性がある。すなわち、重量値による森林の評価・管理は、時代のニーズにあった次世代型の森林評価方法の一つといえる。これまでほとんど改変されてこなかった収量-密度図だが、直径階級分布で把握でき、予測した林分の再現性が優れている点などから、炭素吸収源として森林を評価・管理していく上で有用である。

以上のことから本研究は、世界中で高炭素蓄積を目指す森林管理や森林バイオマス利用などを推し進めていくための持続可能な森林管理に貢献するものである。そして重量値によって森林を評価・管理することは、これまでほとんど評価されてこなかった森林の炭素固定機能を適正に評価・管理できることになり、今後必要とされるべき概念である。

Summary

Construction of the Yield-Density diagram by using total tree weight

The stand density control of the forest includes the yield prediction, yield table, stand density control diagram and yield-density diagram. All of these are intended to understand and manage the yield as stem volume. However, only yield-density diagram can predict the harvest and the diameter class distribution. Therefore, the focus of this research has been the yield-density diagram.

Prevention of global warming conference in Kyoto (COP3) defined forests as carbon sinks. As carbon sinks, forest should be understood and managed based on the total tree weight rather than on the stem volume.

One of the aims of this study is to construct the yield-density diagram by using total tree weight. Forests that are not intended for timber production have important implications. Therefore, the coastal black pine forests in Shonai region was chosen for this study. So far, there is no research about constructing yield-density diagram for forests in other countries. Therefore, constructing the yield-density diagram for larch forests in northern Mongolia as an oversea forest is the second objective of this study. The last objective is to simulate the forest dynamics by yield-density diagram.

The yield-density diagram was made for the coastal black pine forests in Shonai region and larch forests in Mongolia. In the coastal black pine, the Y-N curves for each different forest age were drawn on the yield-density diagram. The accuracy of the yield-density diagram indicates that the total tree weight is 6 % and 8% lower than the theoretical value for black pine and larch forests in Mongolia respectively. Based on the data of felling of wilt-damaged trees in the year 2011, felling of the same

number of trees for the next five years was simulated and forests dynamics were analyzed.

The results show that after cutting trees with the same dimensions from 2011 and the subsequent 5 years, leads to the continuous decline of the stand biomass. However, if no cutting is done for three years after 2011 because of the absence of wilt damaged trees, then on the fourth year the stand biomass is the same as 2011 or more.

In Mongolia, forest fires are a common occurrence and thus stand biomass changes abruptly. In this study, we simulated the time it will take for a larch forest after a fire event, to reach its maximum biomass. The results show that the time necessary ranges between 80 to 170 years, depending on the intensity of the fire event. Therefore, if the frequency of fires increases, the growth of new trees would not be possible. There is a possibility that in the future the stability of the forest will be at risk, since only predominant trees remained and there is no possibility of a natural regeneration within the stand. On the other hand, if severe fire occurrences are every 200 years, the forest will be able to regenerate successfully.

In this research, it was possible to construct the yield-density diagram by using total tree weight and applied it to predict forest dynamics in forests in Japan and in Mongolia. The yield-density diagram in this research is used to evaluate forests as carbon sinks and as such, it contributes to forest management practices that aim at high carbon stocks.

本研究内容の主な掲載論文等

掲 載 論 文

1. Seishiro Taki, Yoshihiro Nobori and Maximo Larry Lopez
Caceres (2012)
Method for estimation of stem carbon fixation of Japanese
black pine by combining stem analysis and soft X-ray
densitometry
Journal of Forest Research DOI 10.1007/s10310-012-0382-x

書 籍

1. 瀧誠志郎・野堀嘉裕 (2011)
CO₂ 固定機能
中島勇喜・岡田穰編著：海岸林との共生
山形大学出版会，ISBN978-4-903966-10-6
1-3) - (2) - b) 62-67

学 会 発 表

1. 瀧誠志郎・野堀嘉裕
庄内クロマツ林における炭素重量を使った収量-密度図の構築
(Pb179)
第 123 回日本森林学会大会 (2012 年 3 月，宇都宮)
テーマ別セッション T16 「樹木の成長と環境」

付 図

庄内地方における海岸クロマツ林	1
每木調査地 FOREST WINDOW 画像	1
樹幹解析による SDA 画像.....	11
直径階別本数分布.....	25
モンゴル北部フブスグル地域におけるシベリアカラマツ天然林	45
每木調査地 FOREST WINDOW 画像	45
樹幹解析による SDA 画像.....	51
直径階別本数分布.....	55

庄内地方における海岸クロマツ林

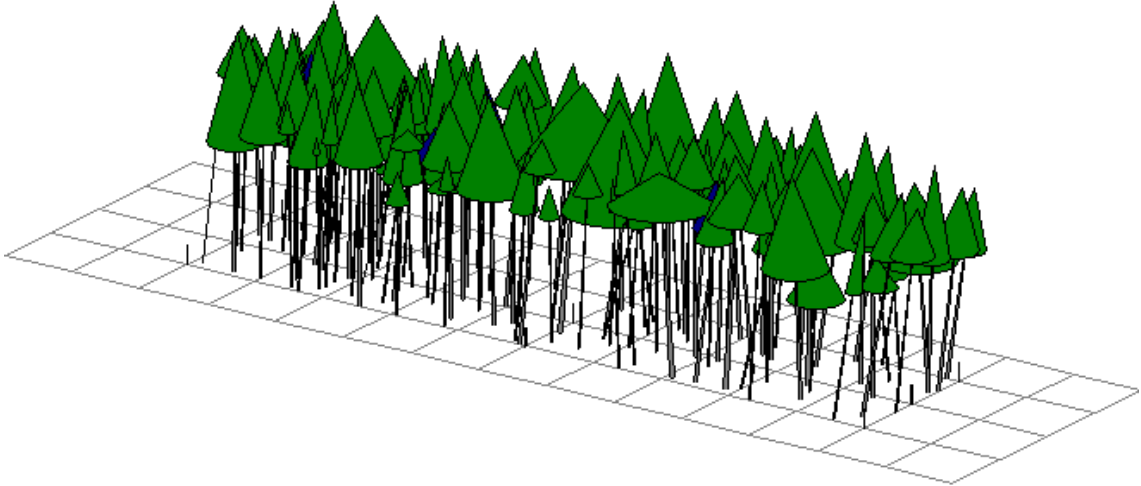
毎木調査地 Forest Window 画像

注) メッシュはすべて 5m

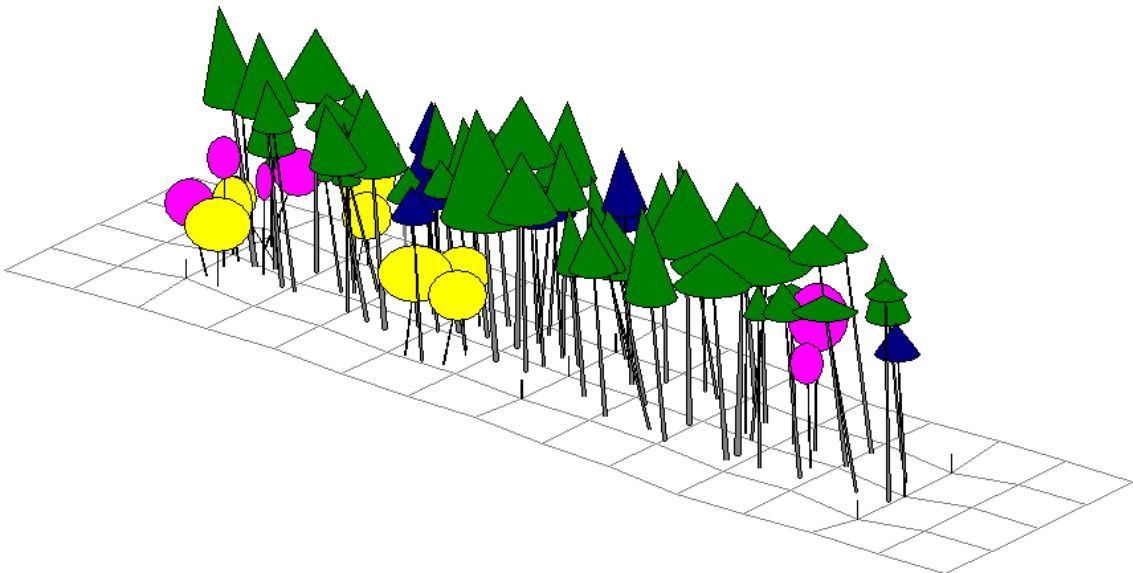
緑色の円錐形：クロマツ

その他の色：広葉樹（サクラ・ニセアカシア・カシワ・ミズキなど）

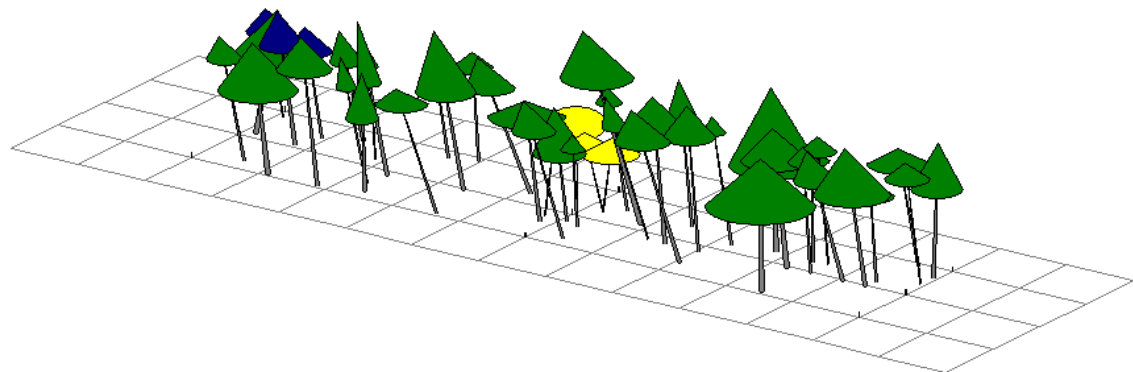
P-01



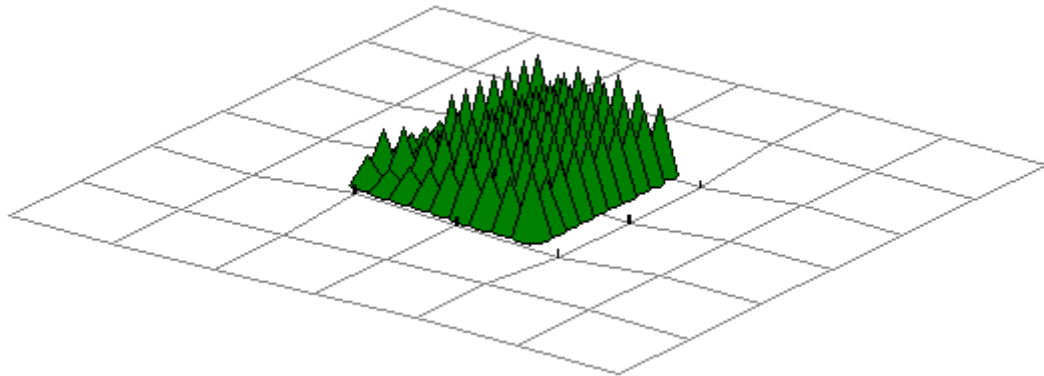
P-02



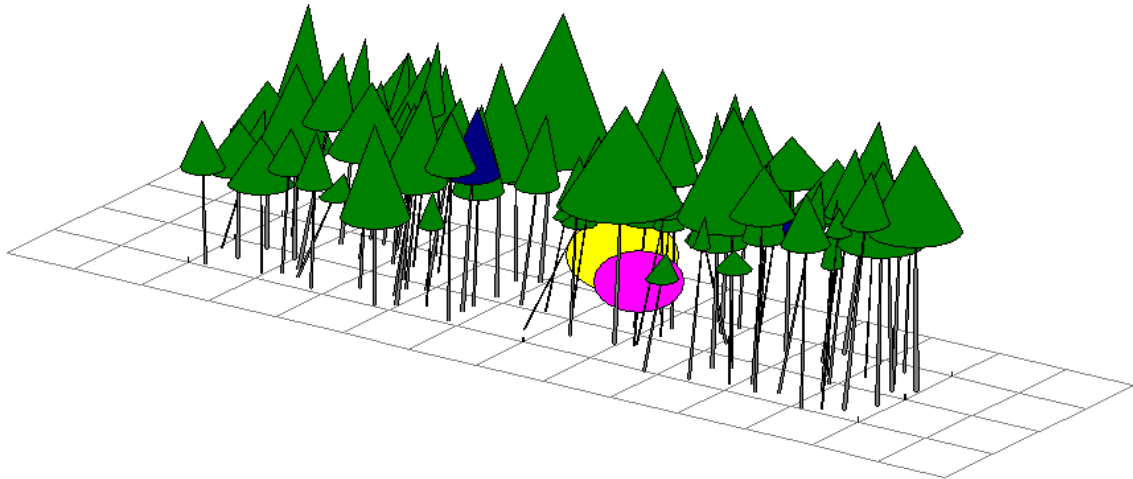
P-03



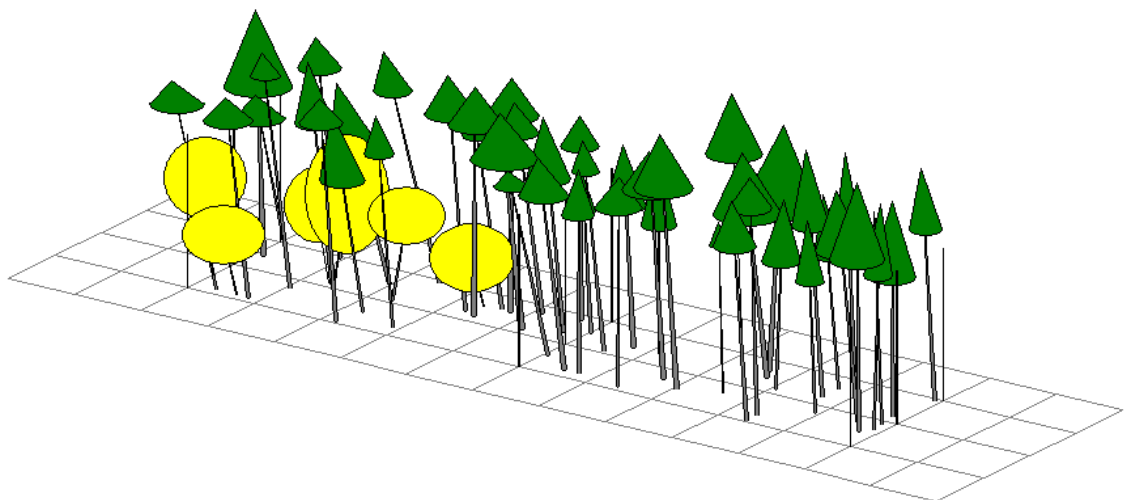
P-04



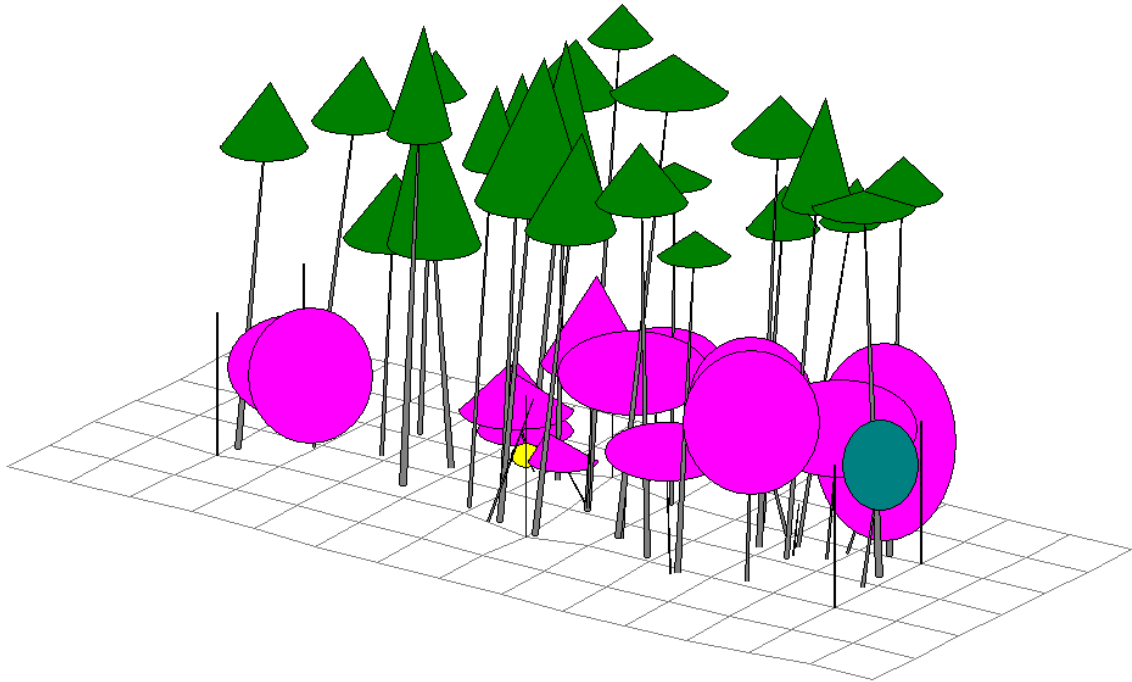
P-05



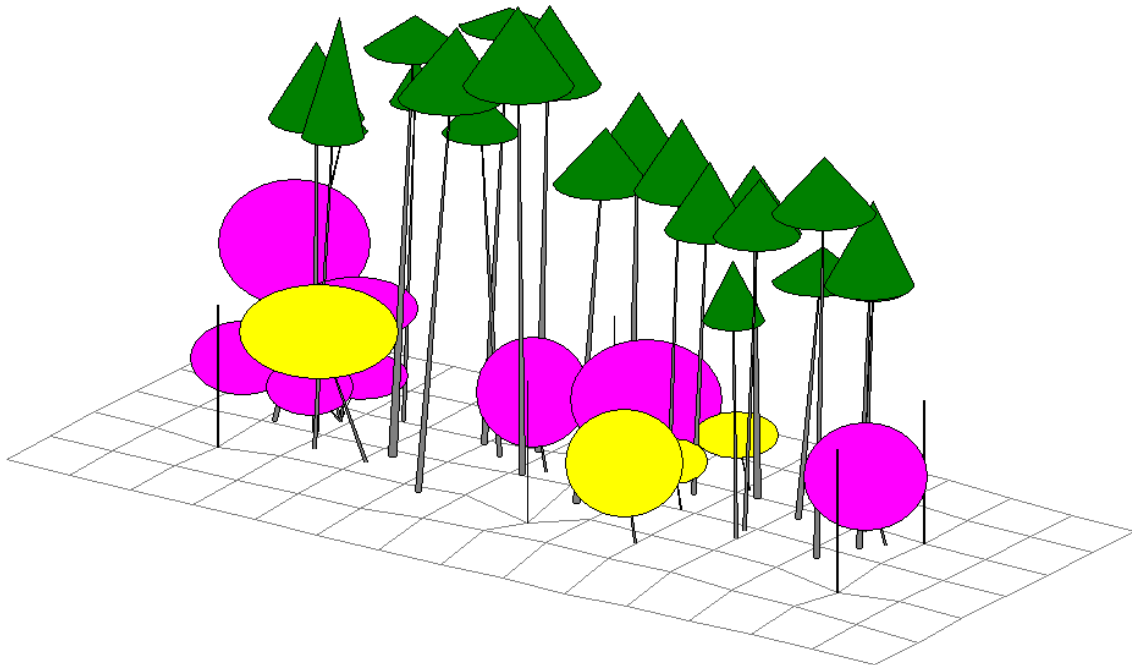
P-06



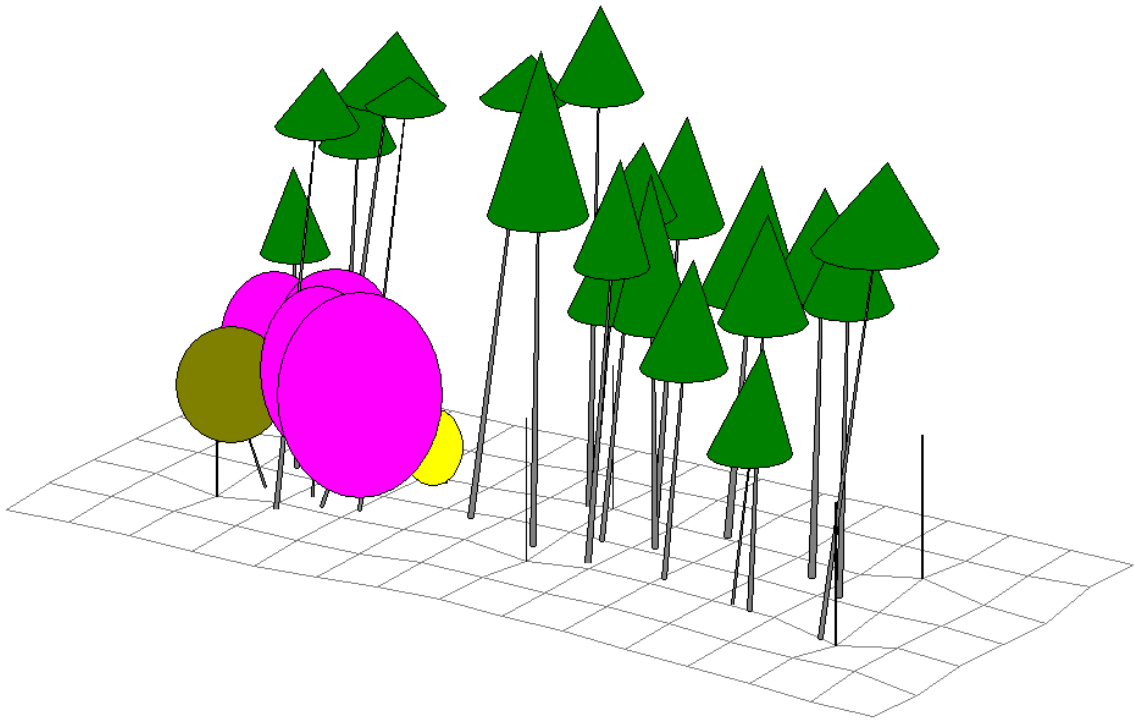
P-07



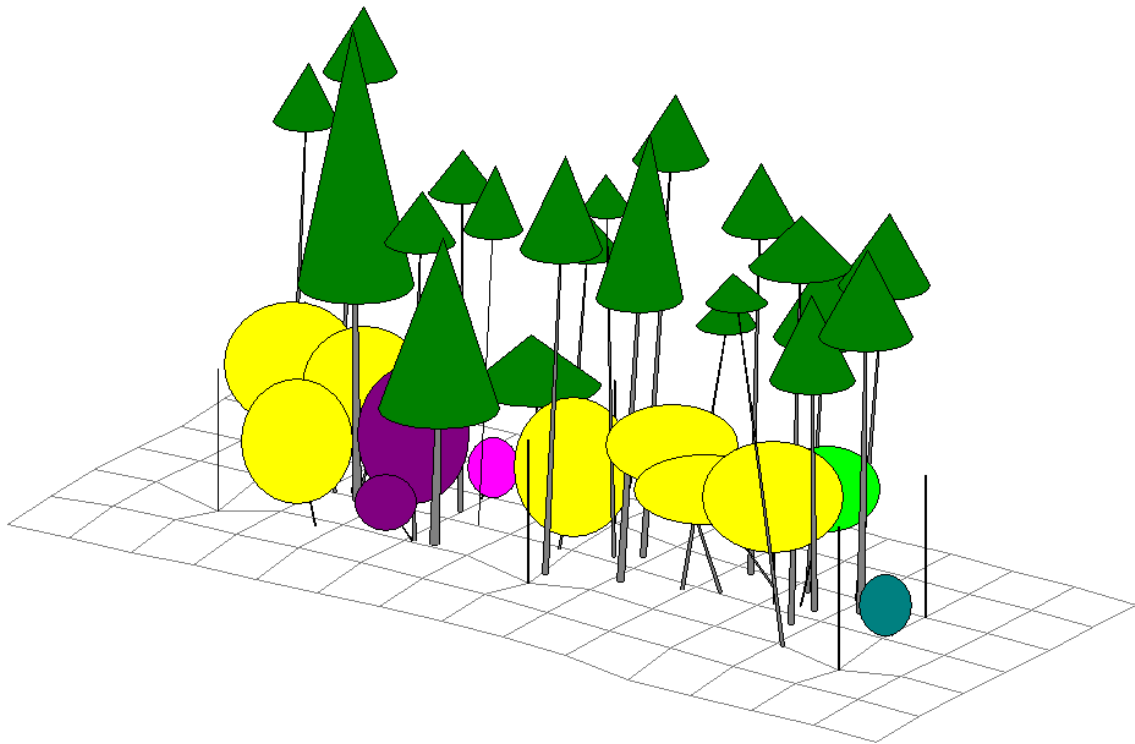
P-08



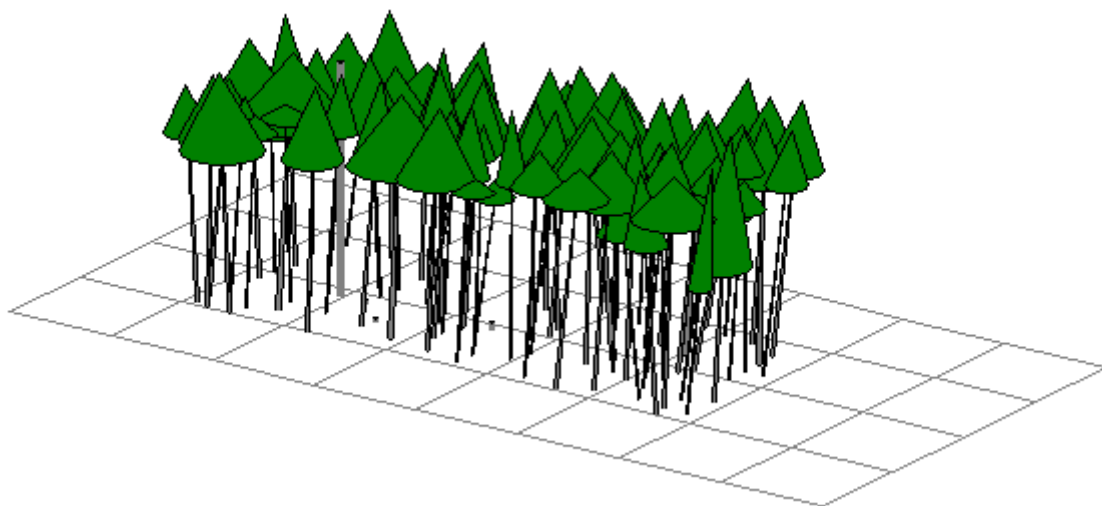
P-09



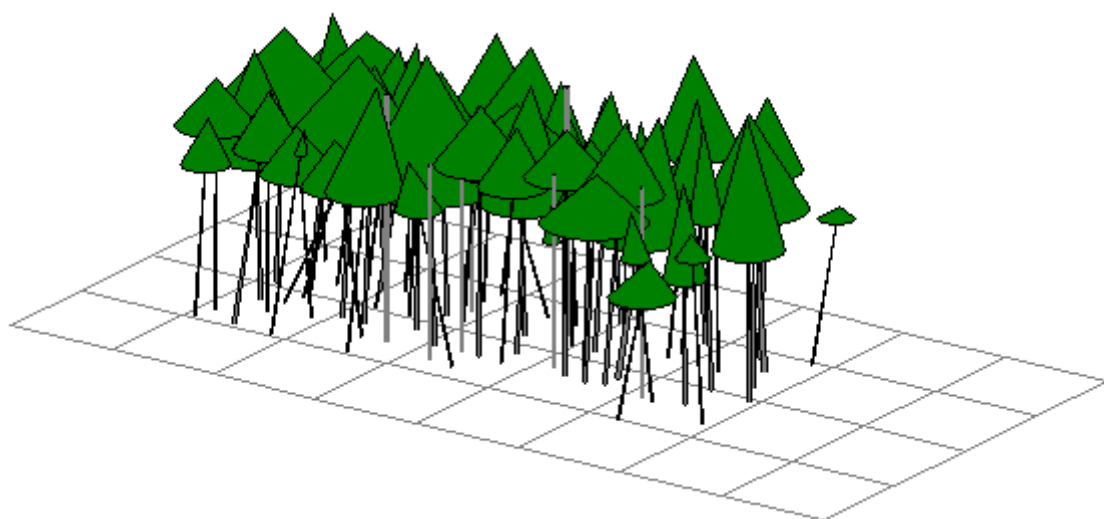
P-10



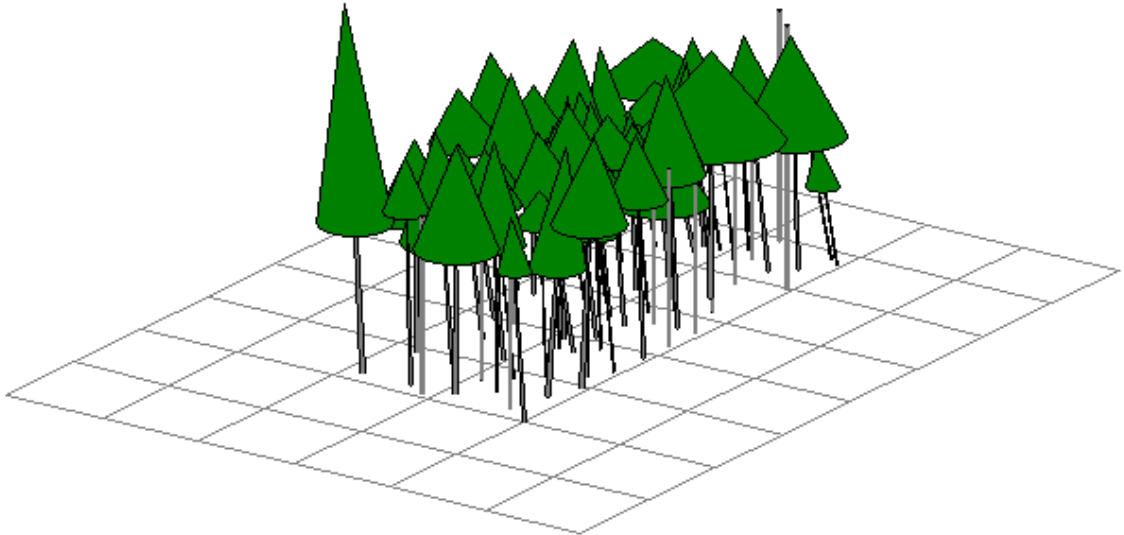
P-11



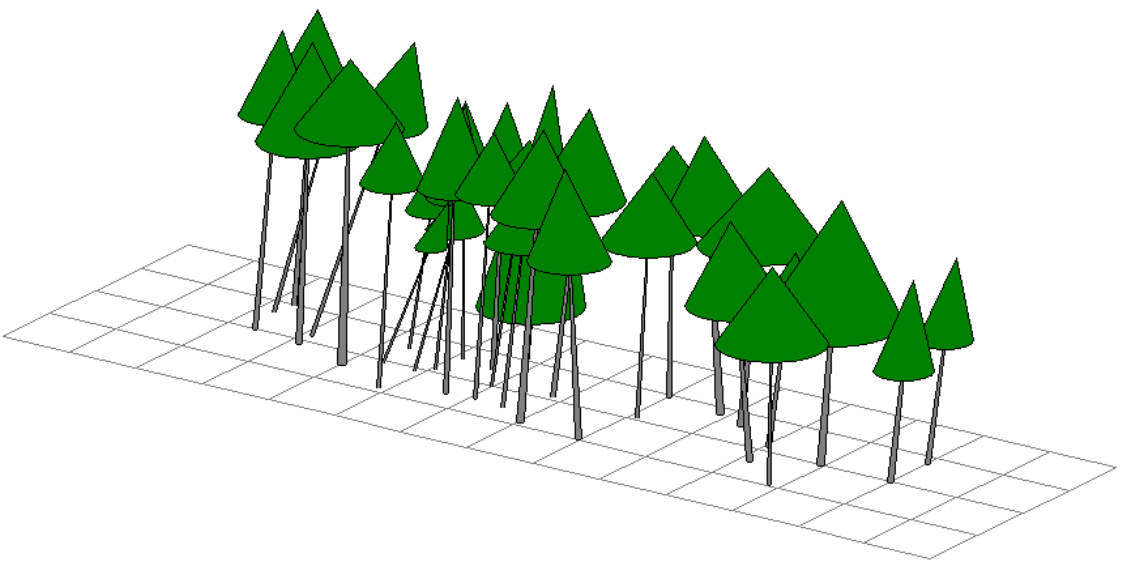
P-12



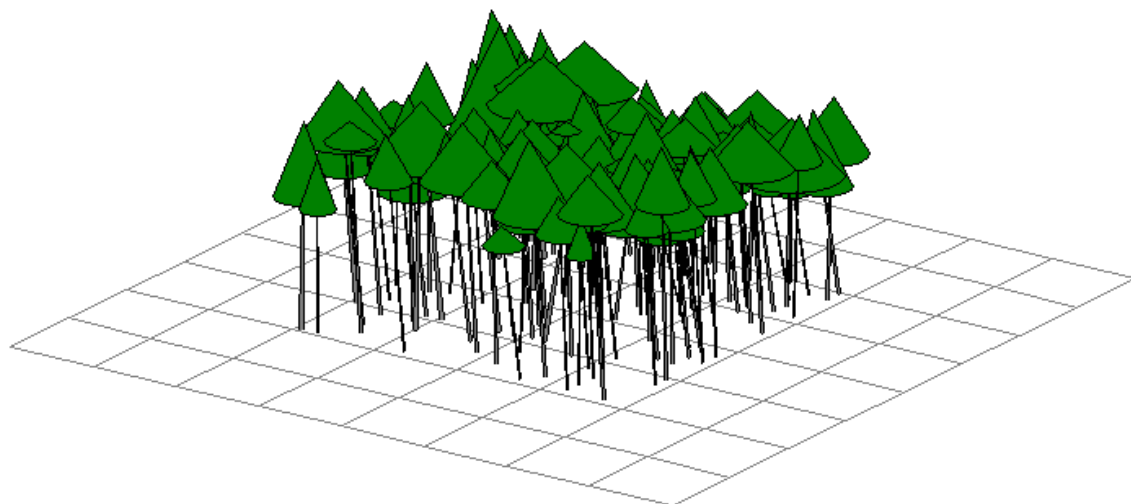
P-13



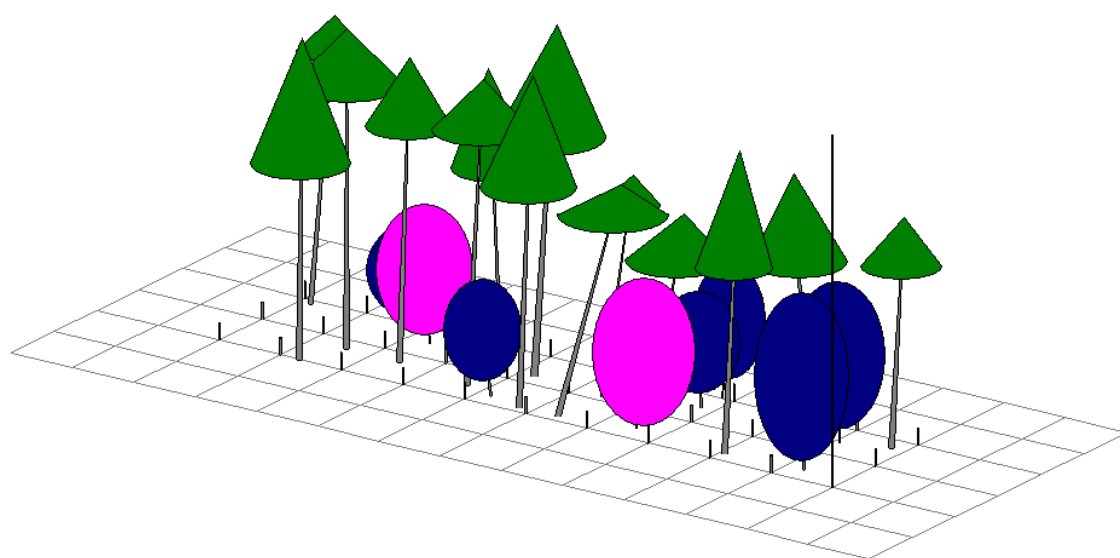
P-14



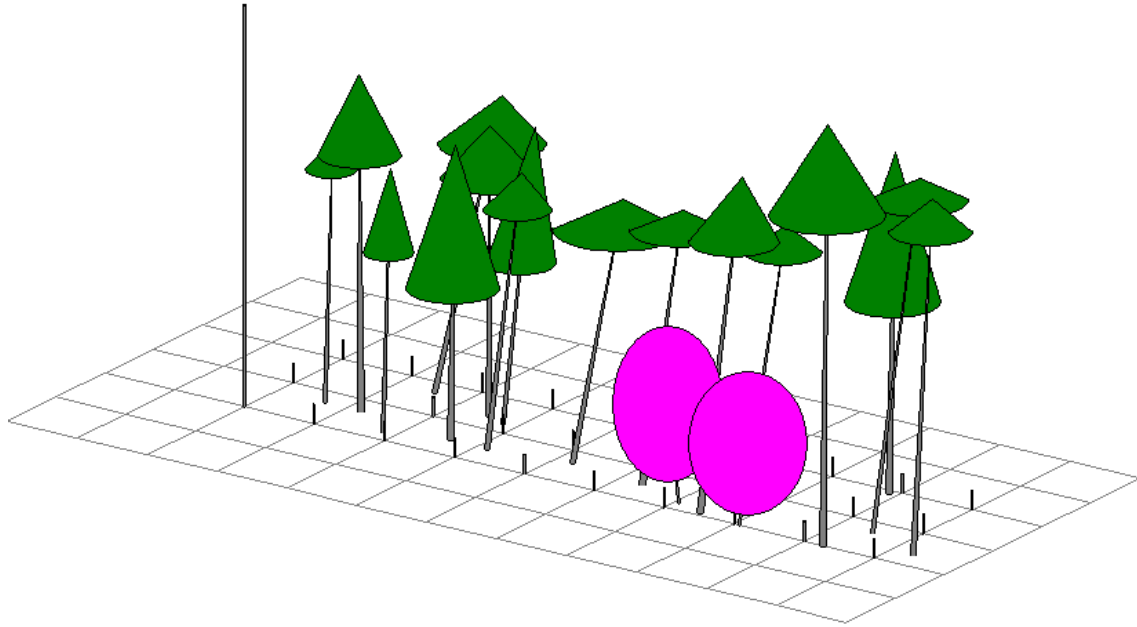
P-15



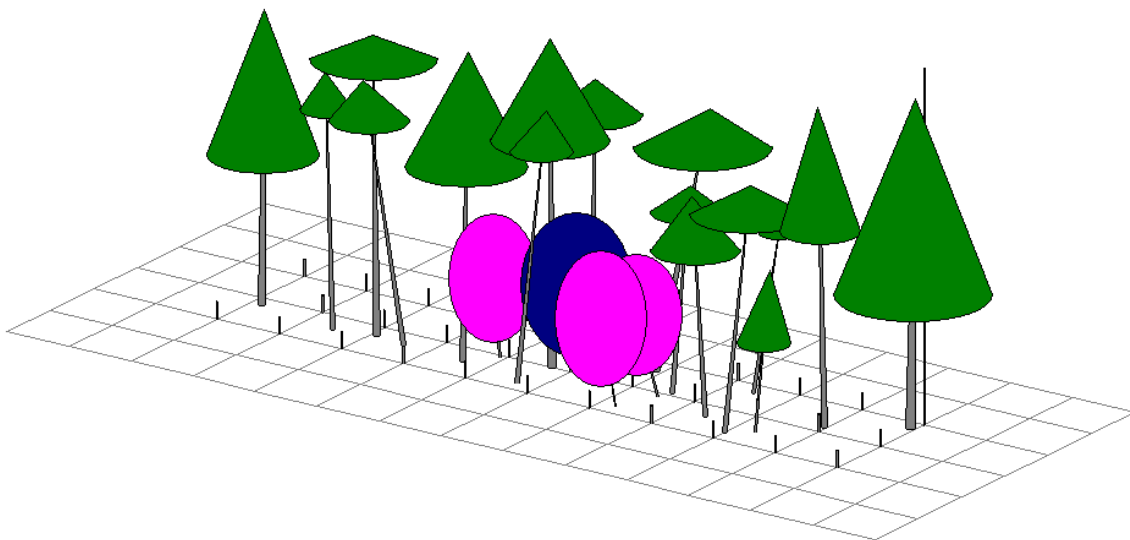
P-16



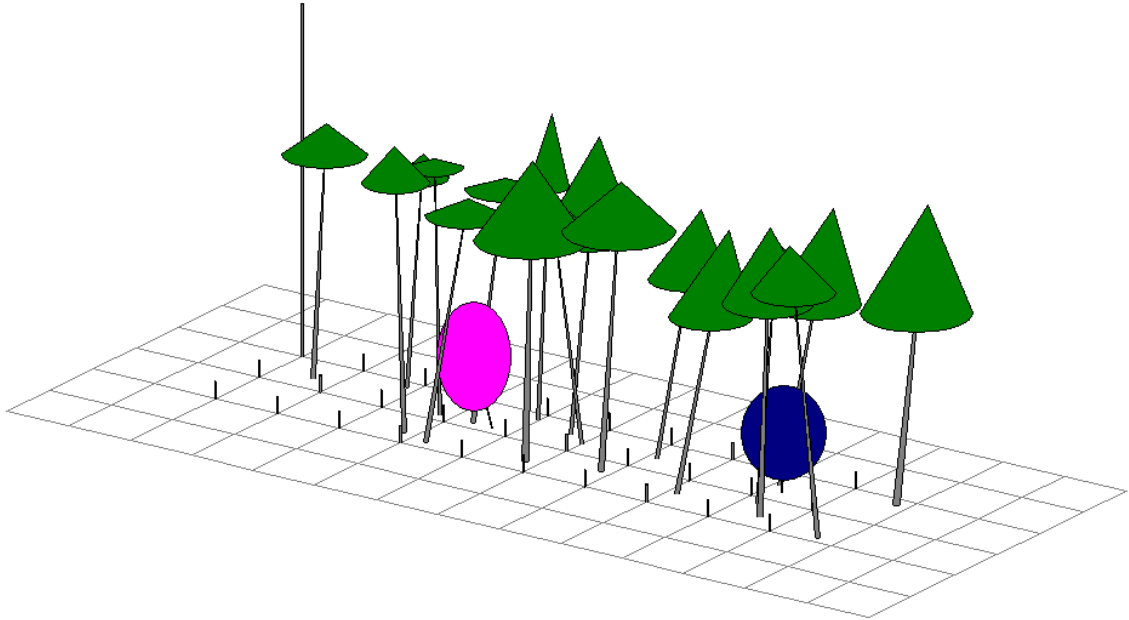
P-17



P-18

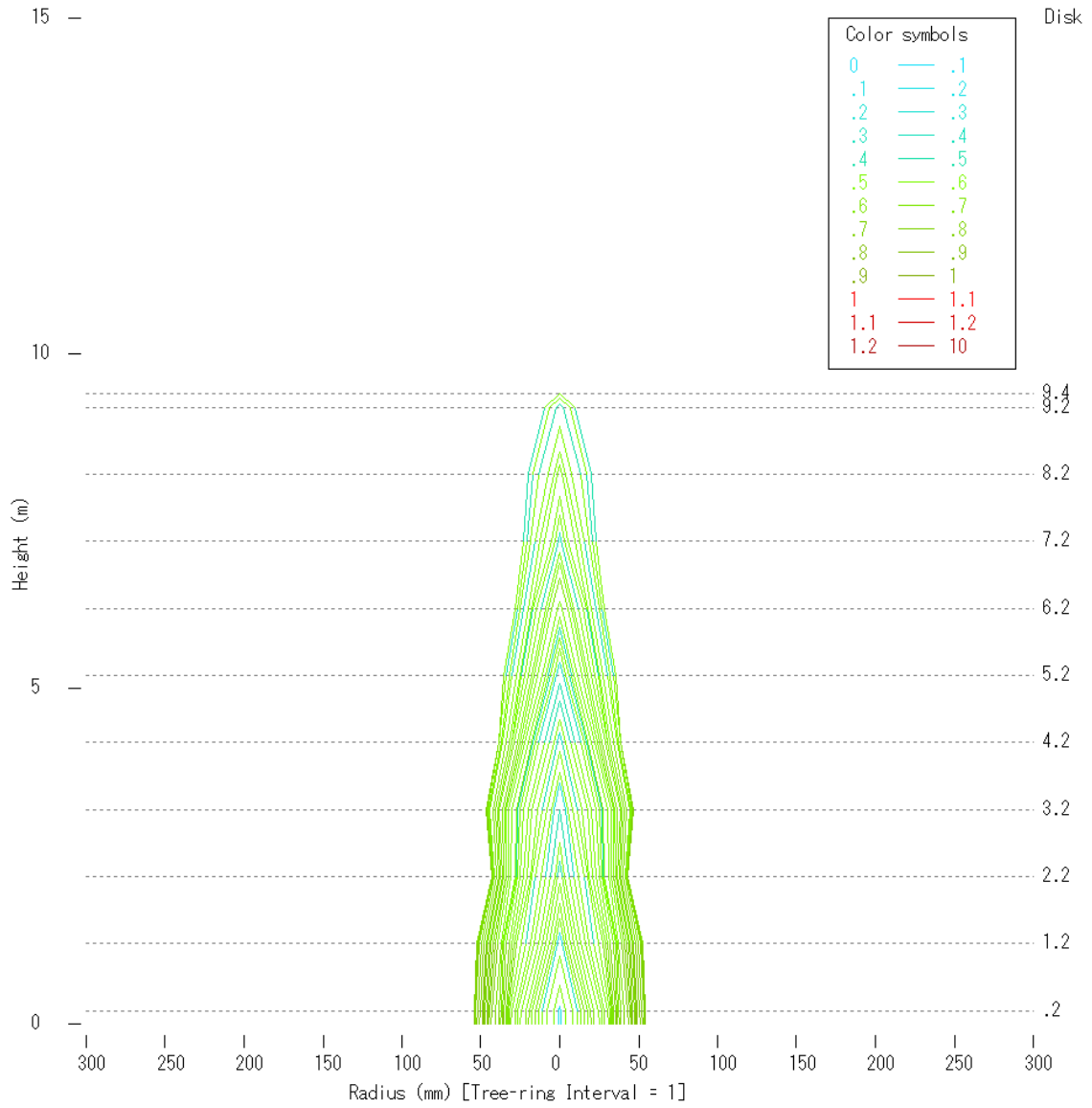


P-19

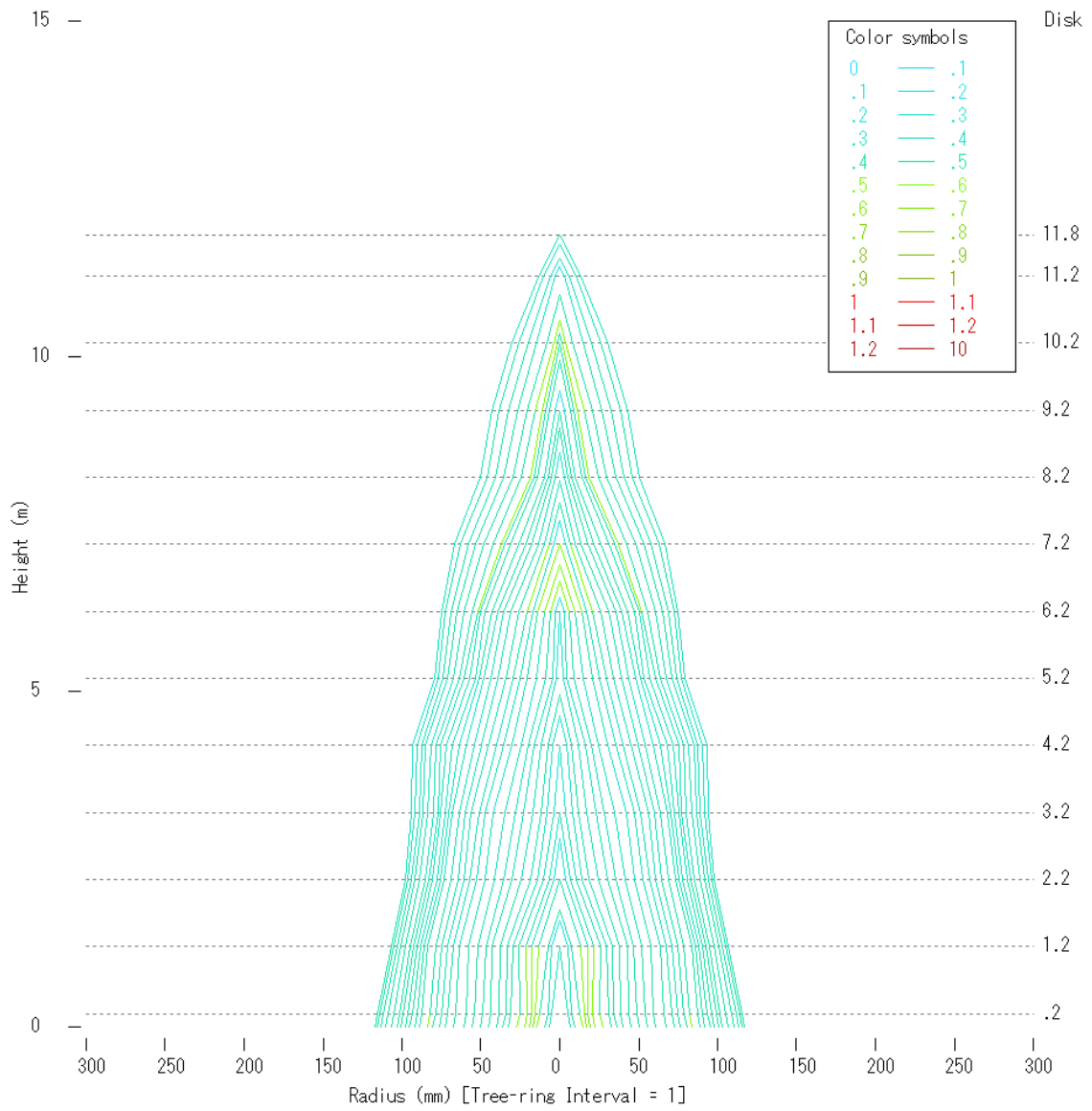


樹幹解析による SDA 画像

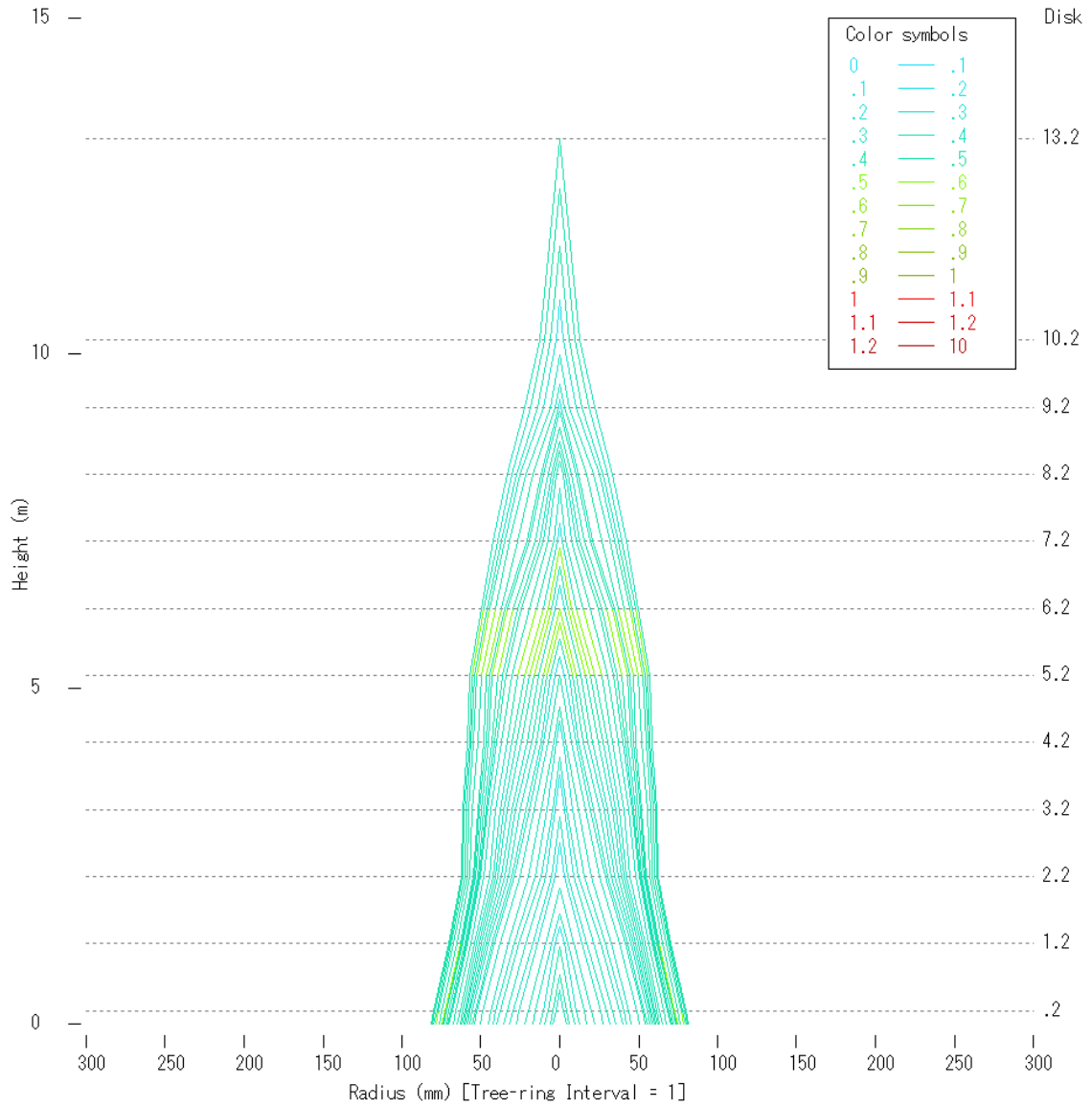
031



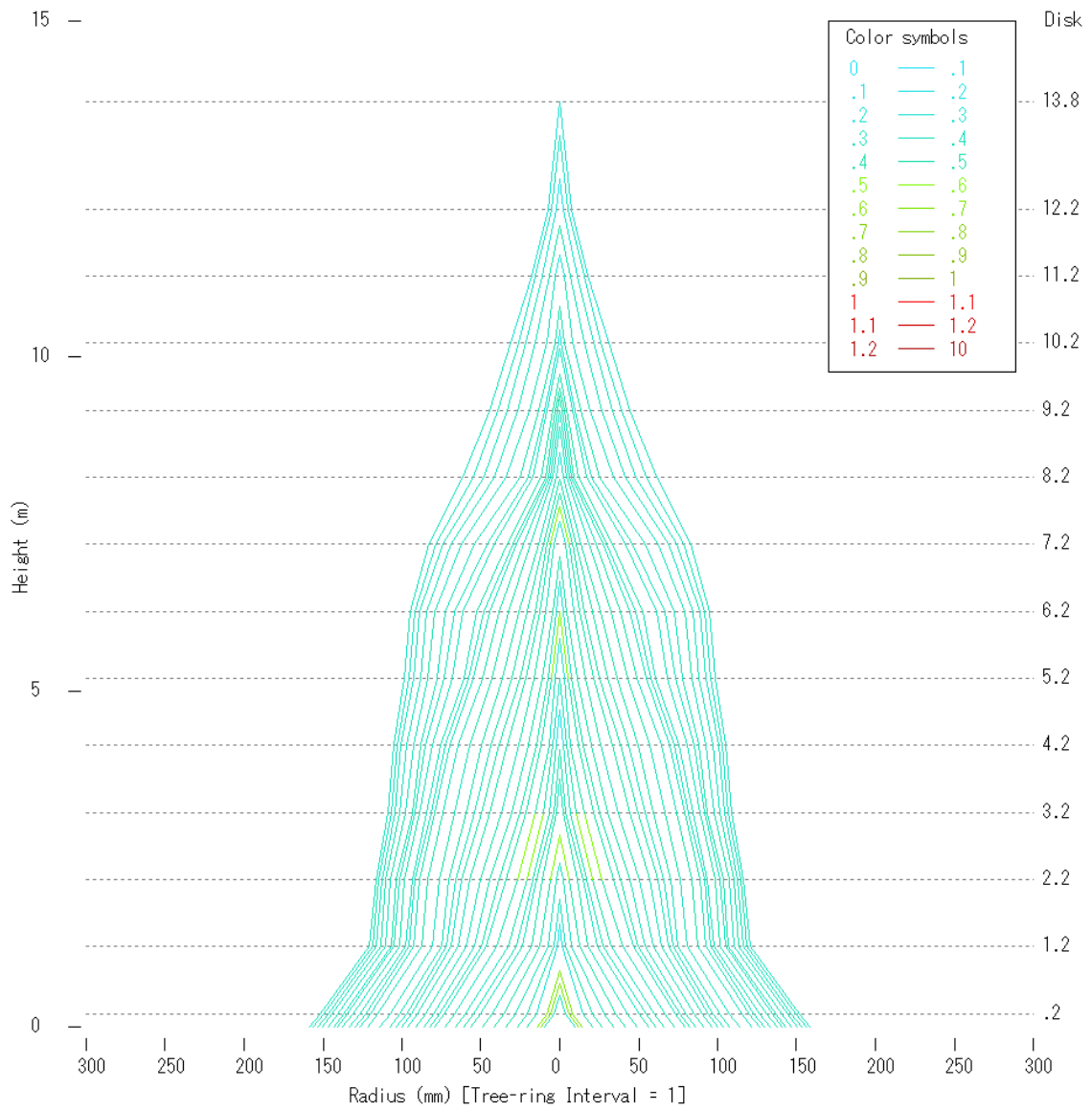
072



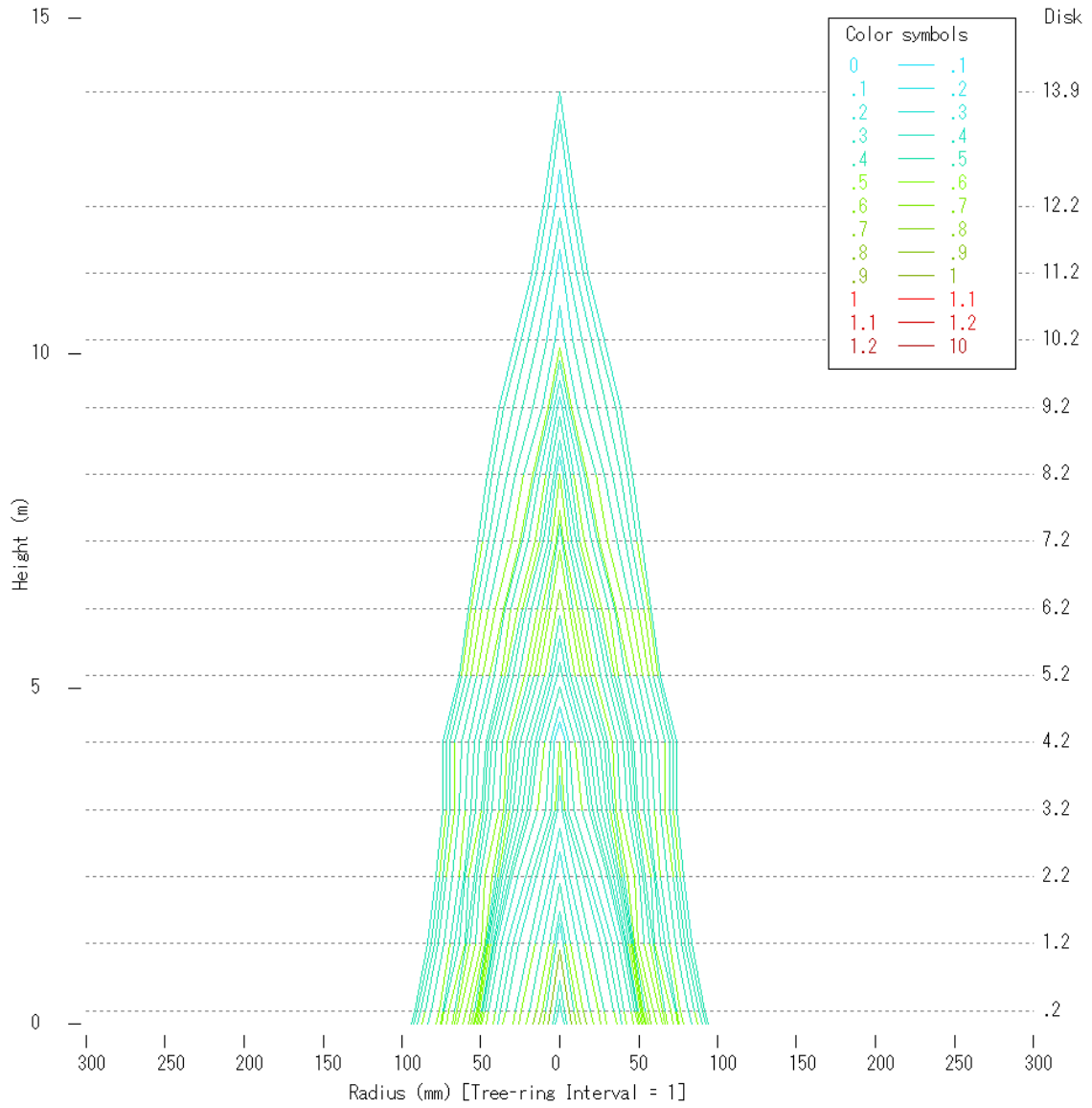
080



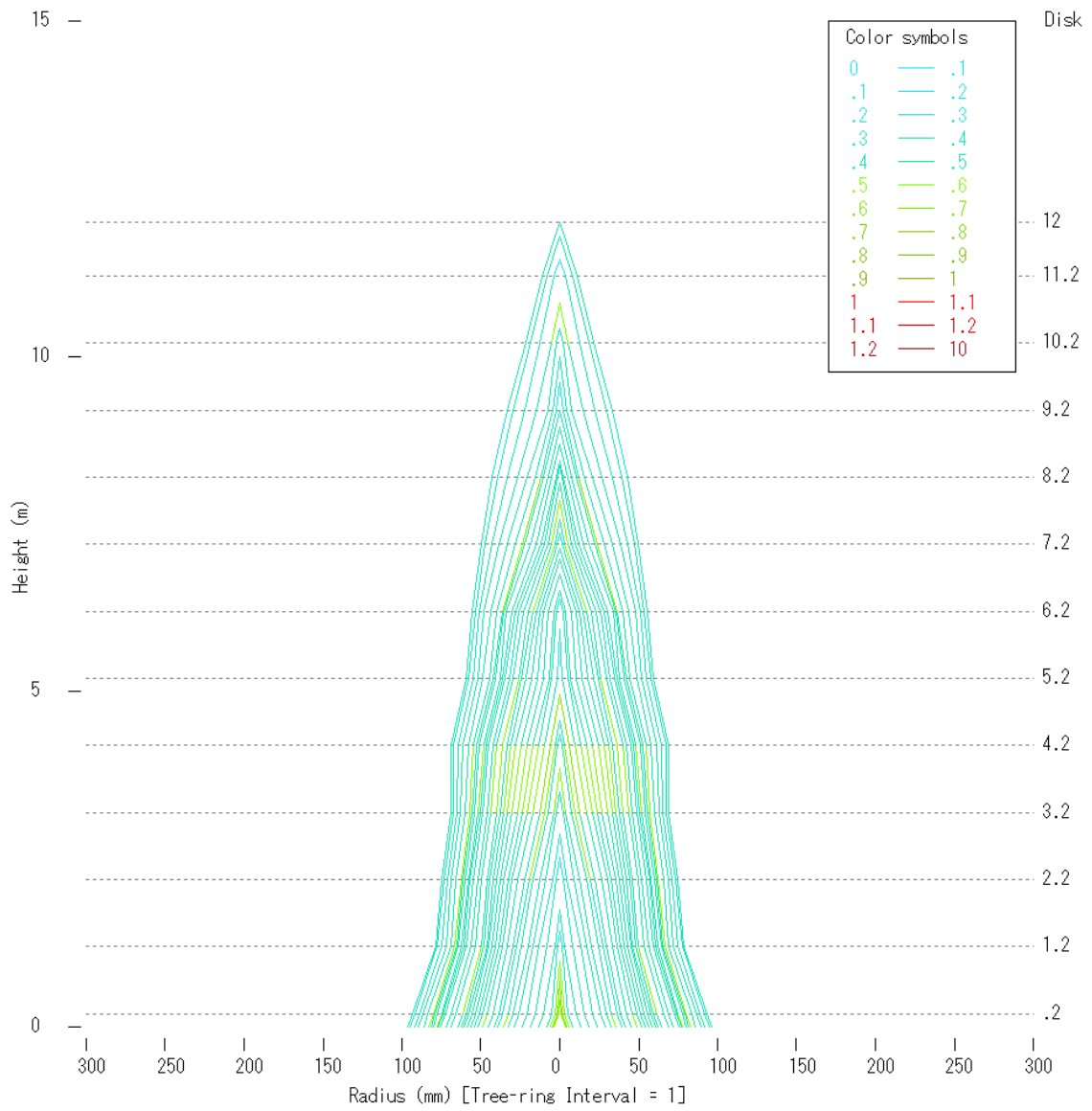
081



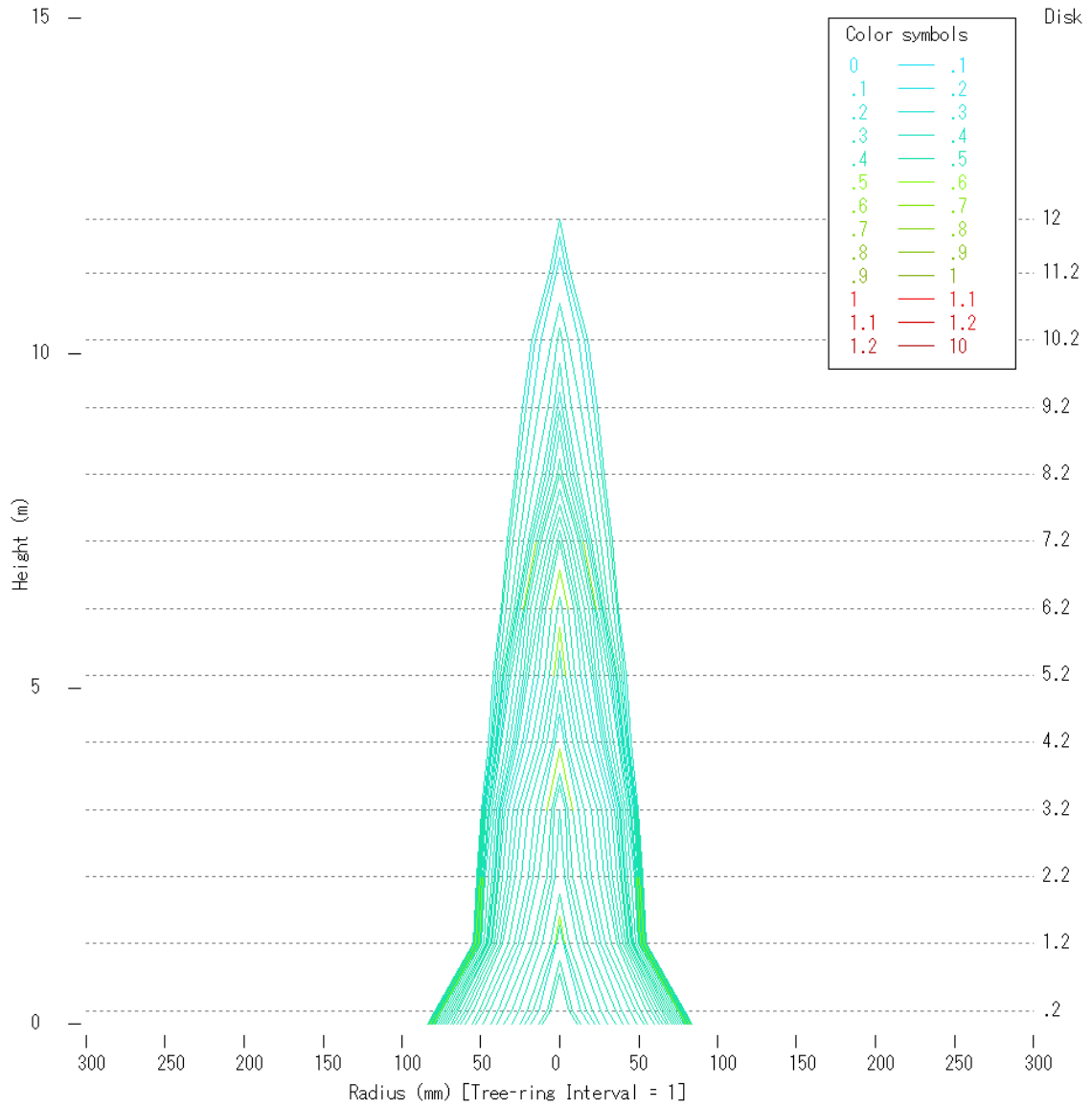
082



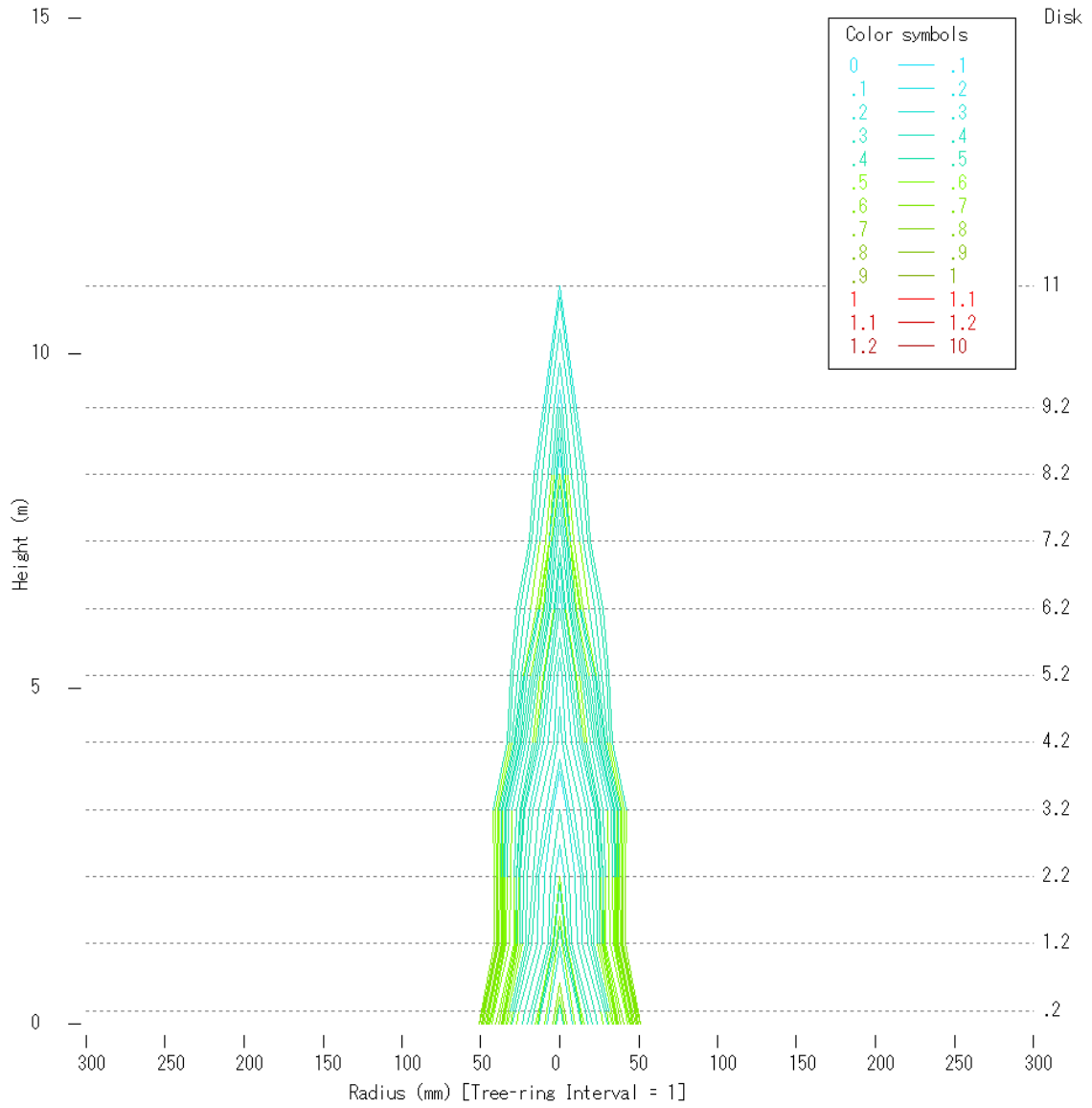
085



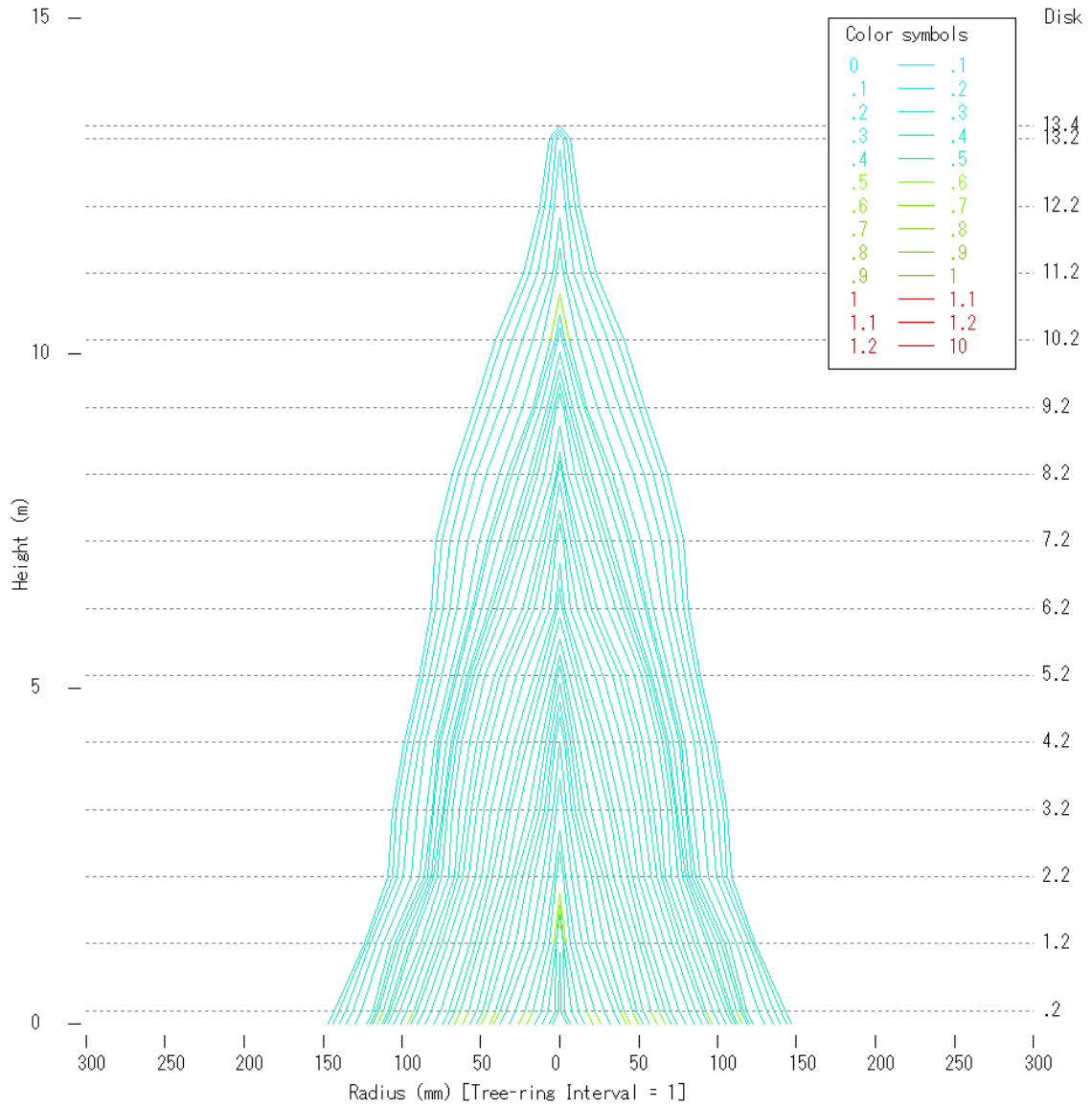
086



089

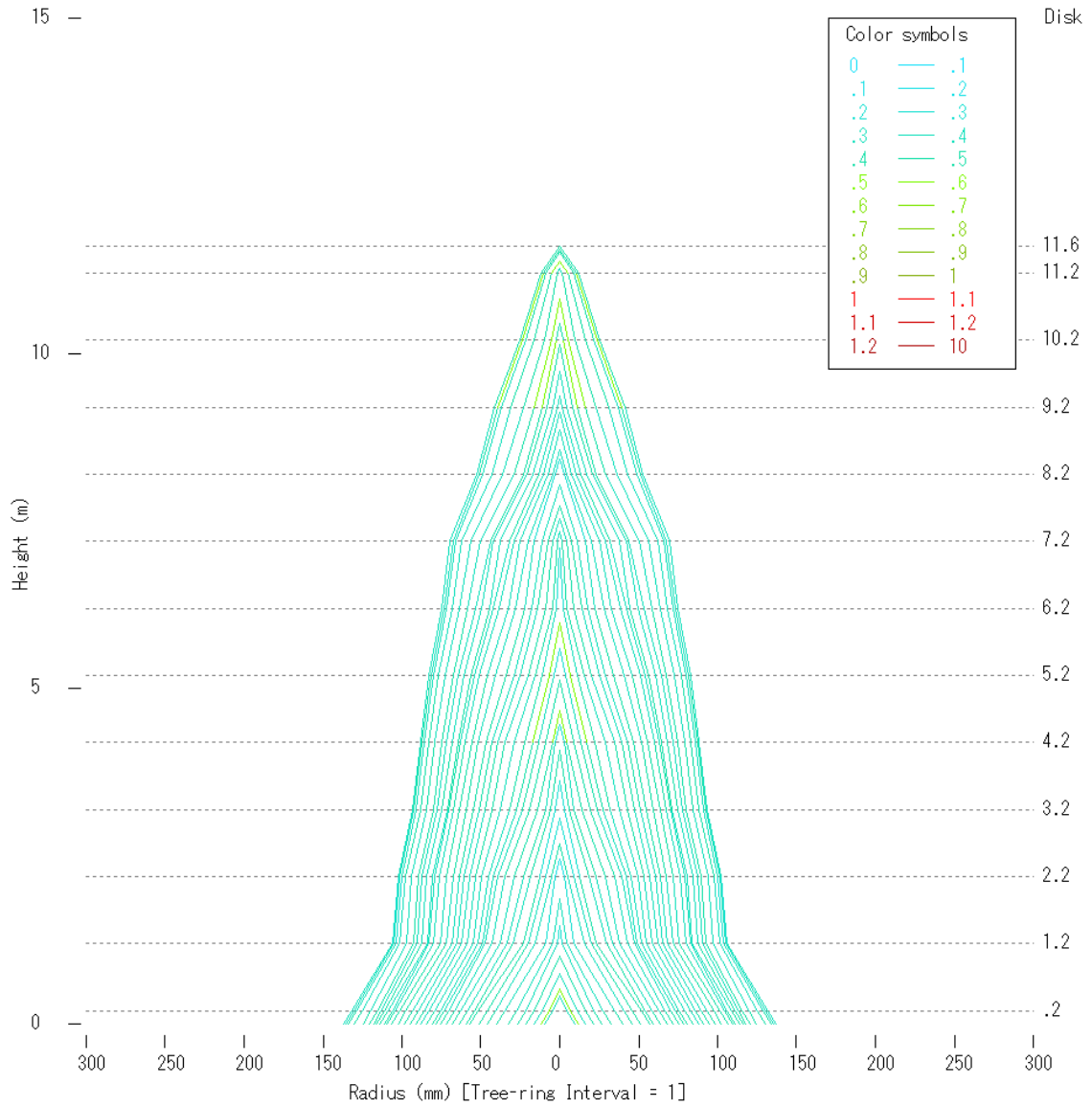


094

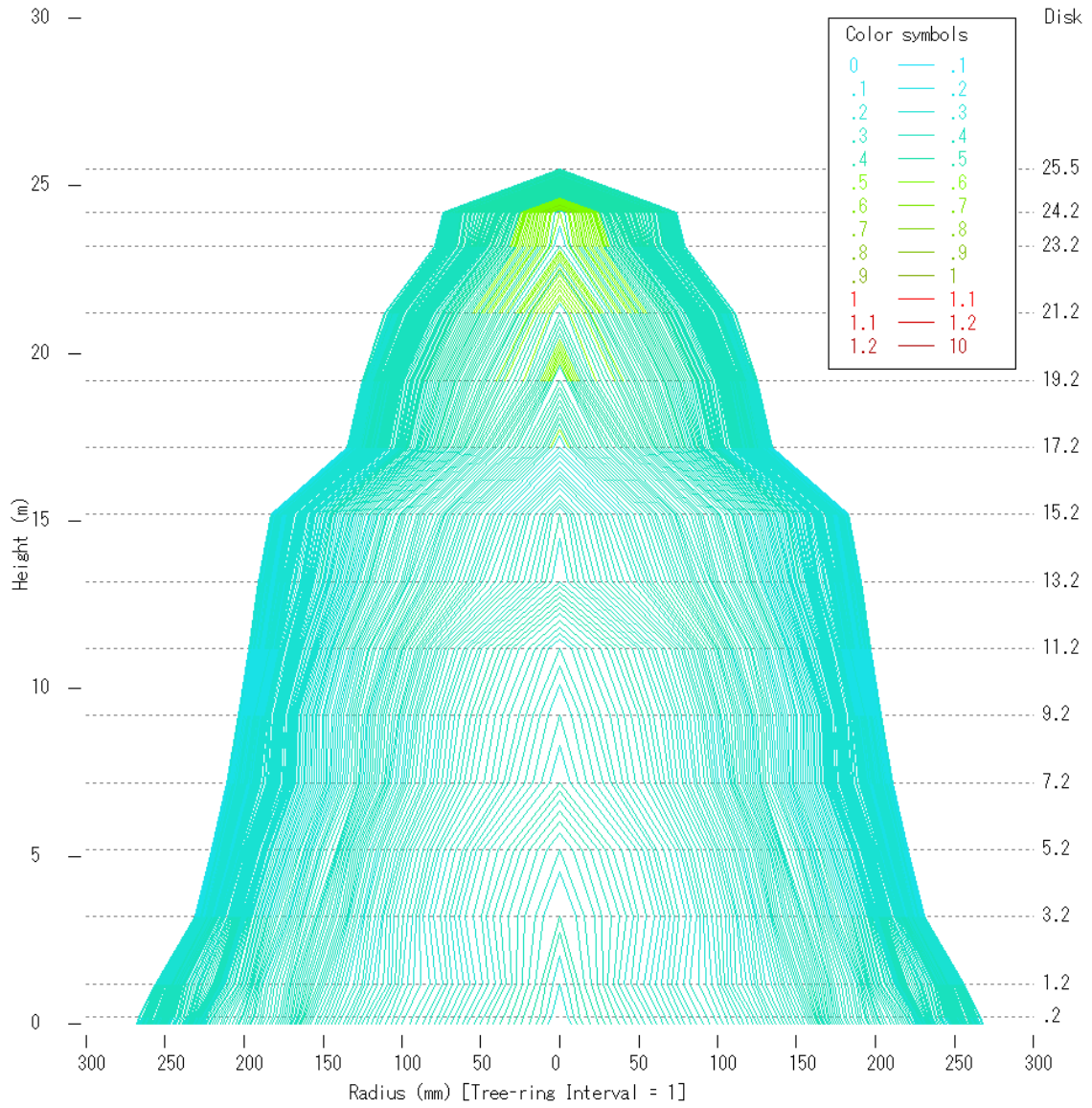


No.94

096

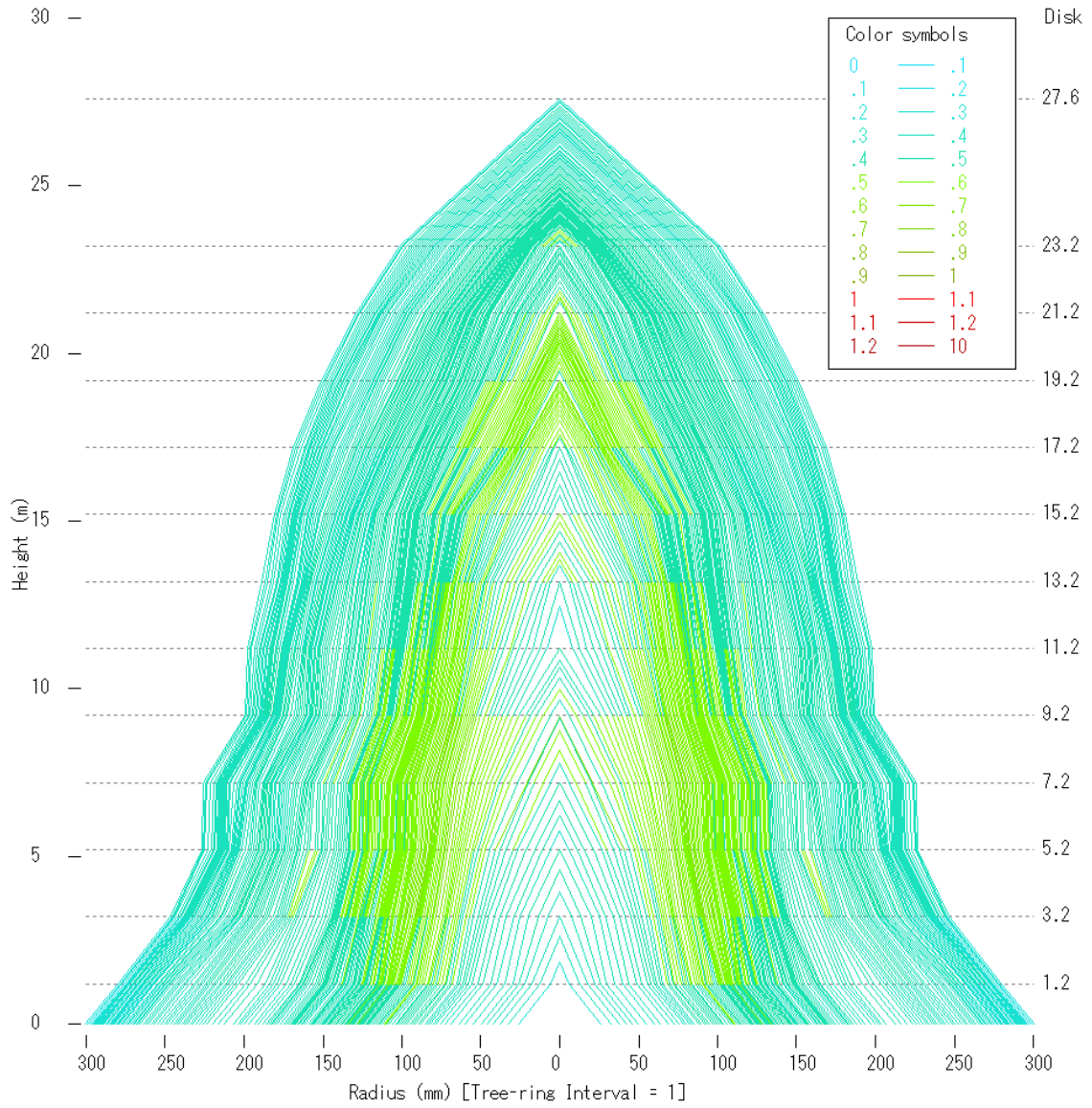


221

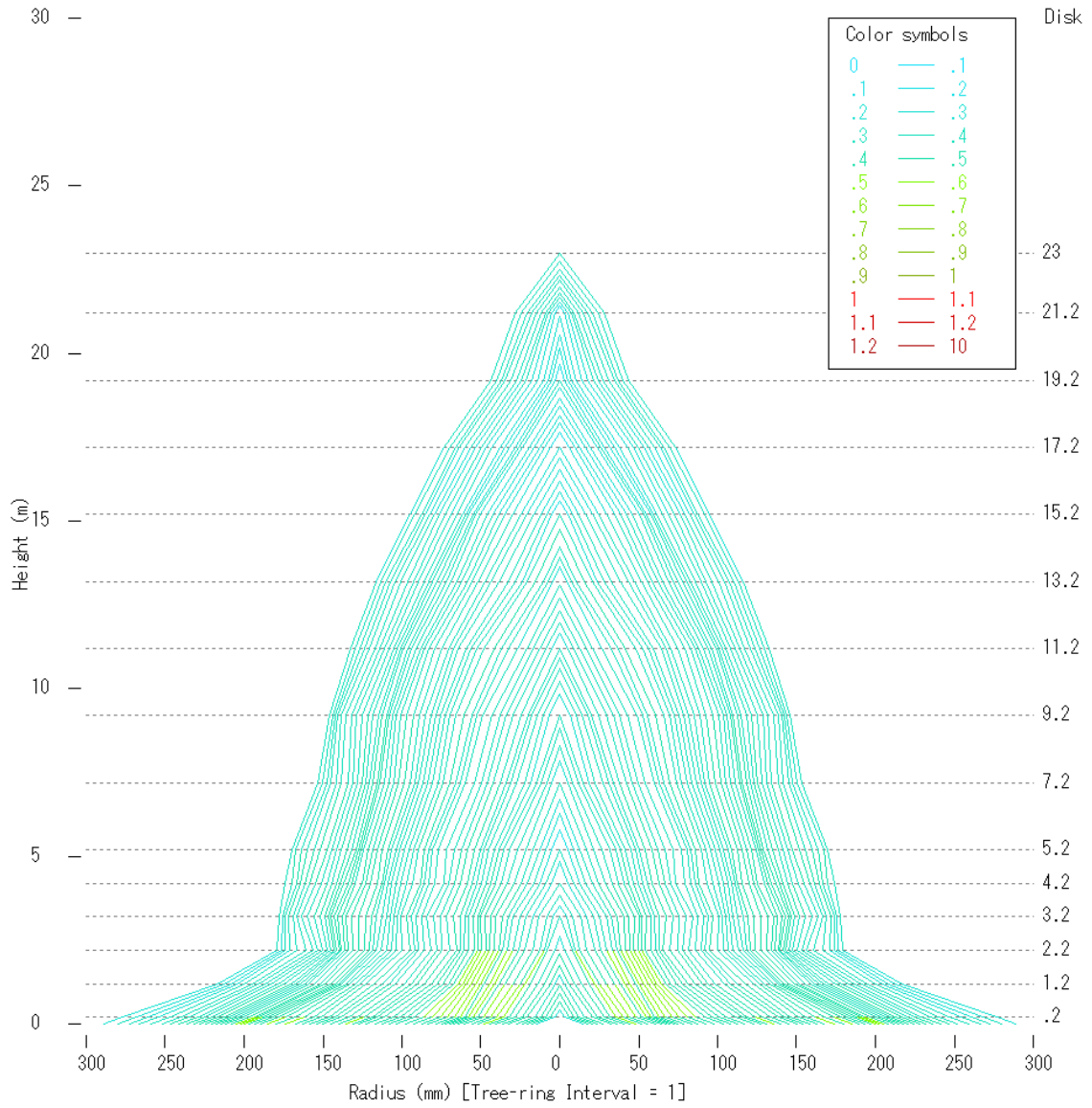


No.221

222



224



直径階別本数分布

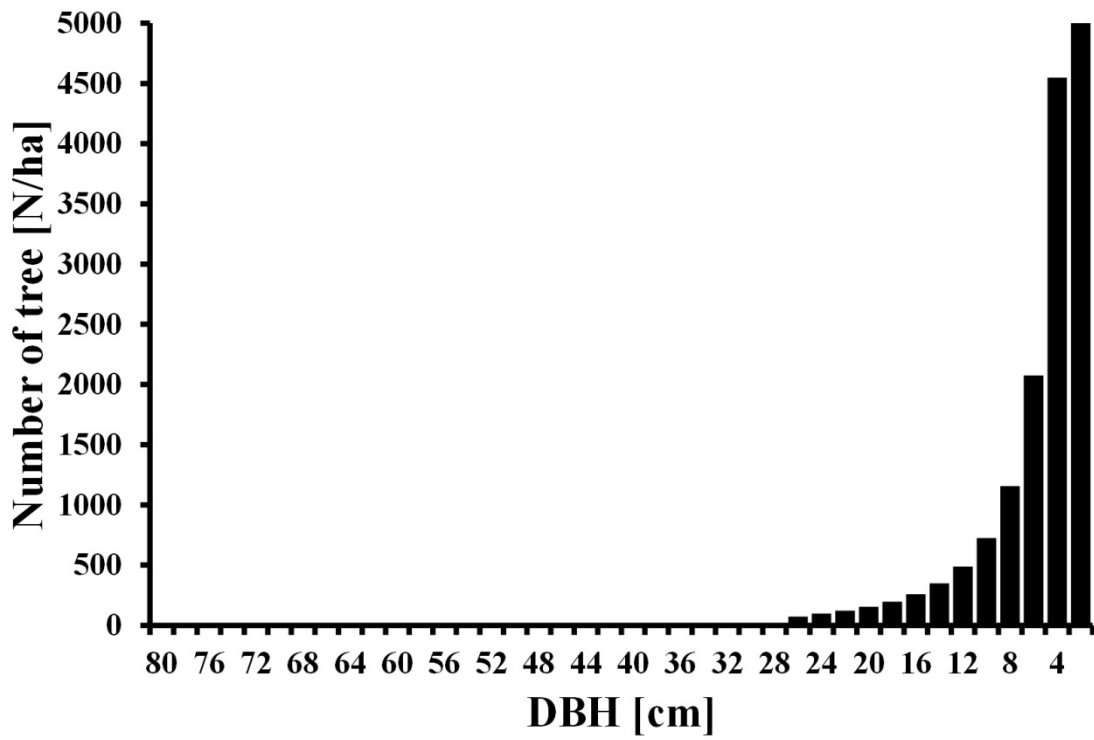
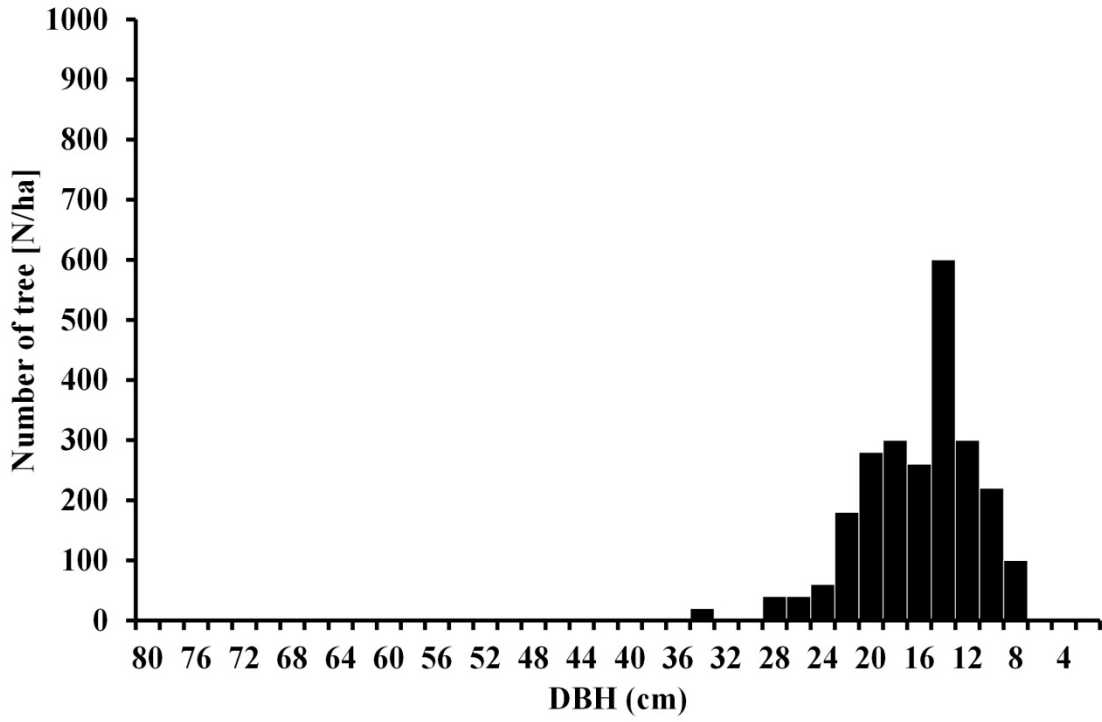
上段 : 毎木調査データに基づく直径階別本数分布 (実測値)

下段 : Y-N 曲線に基づく直径階別本数分布 (理論値)

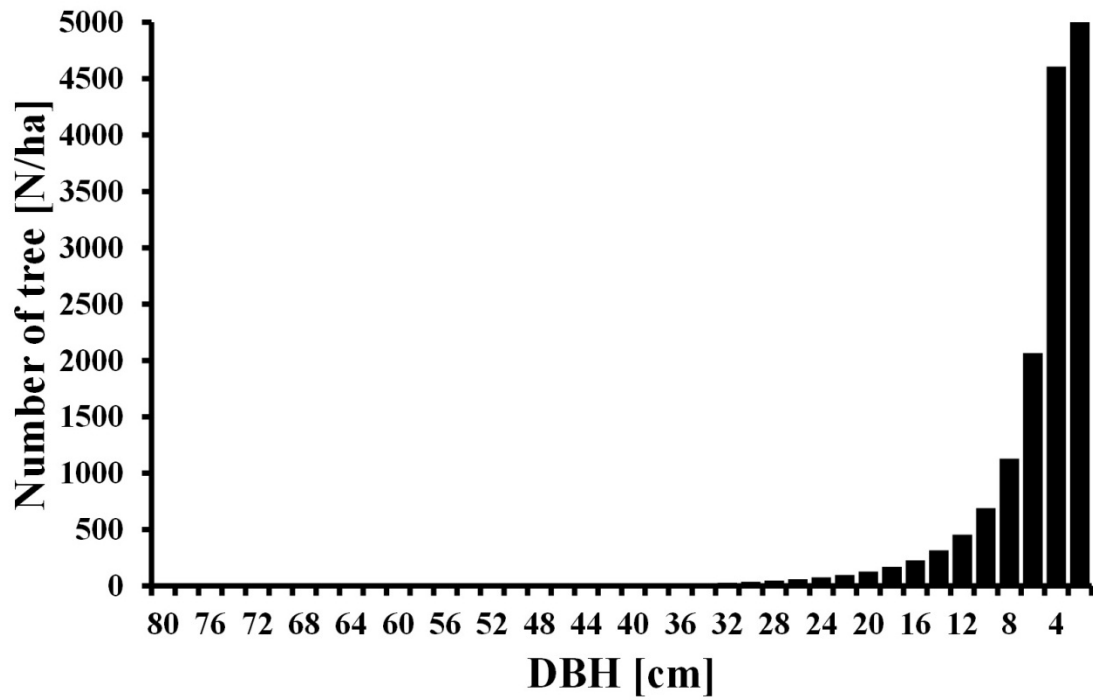
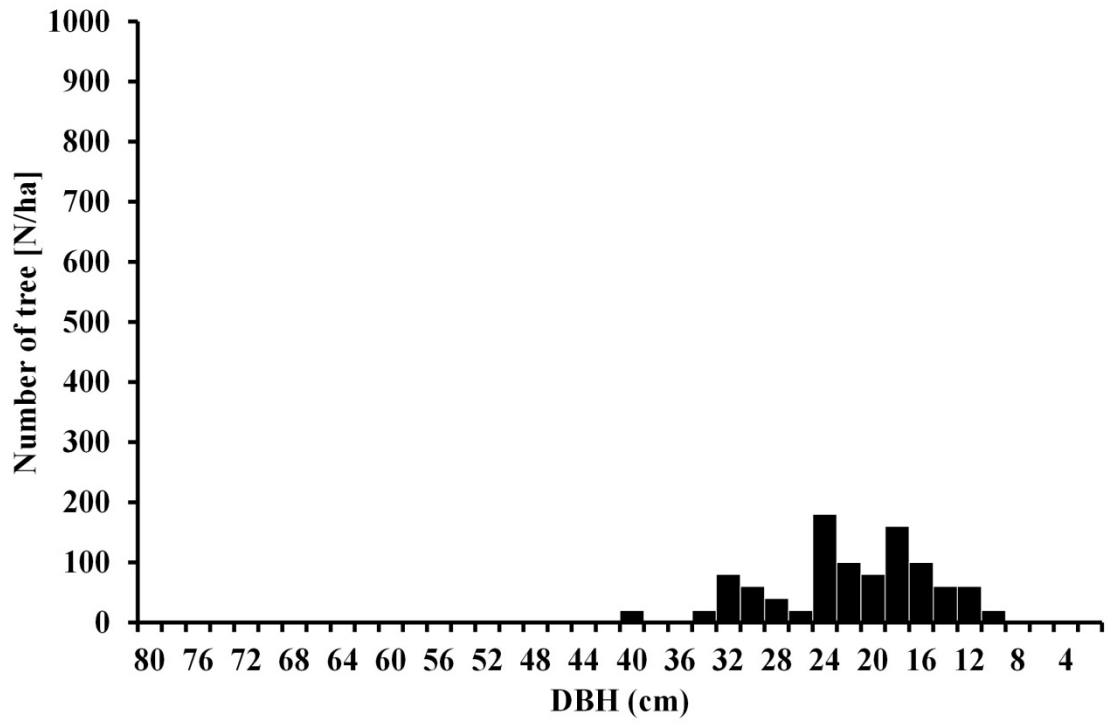
注) 収量-密度図上の Y-N 曲線にあわせて横軸 (DBH) は左右反転してある。

縦軸 (本数密度) の上限値 : 実測値は 1000 理論値は 5000

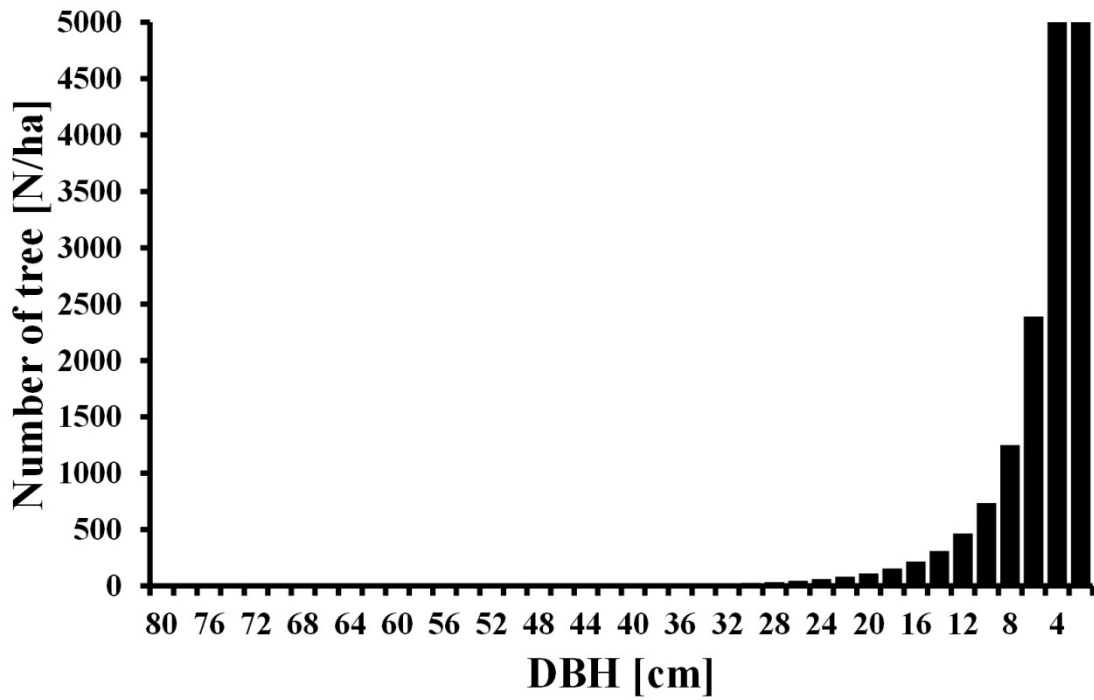
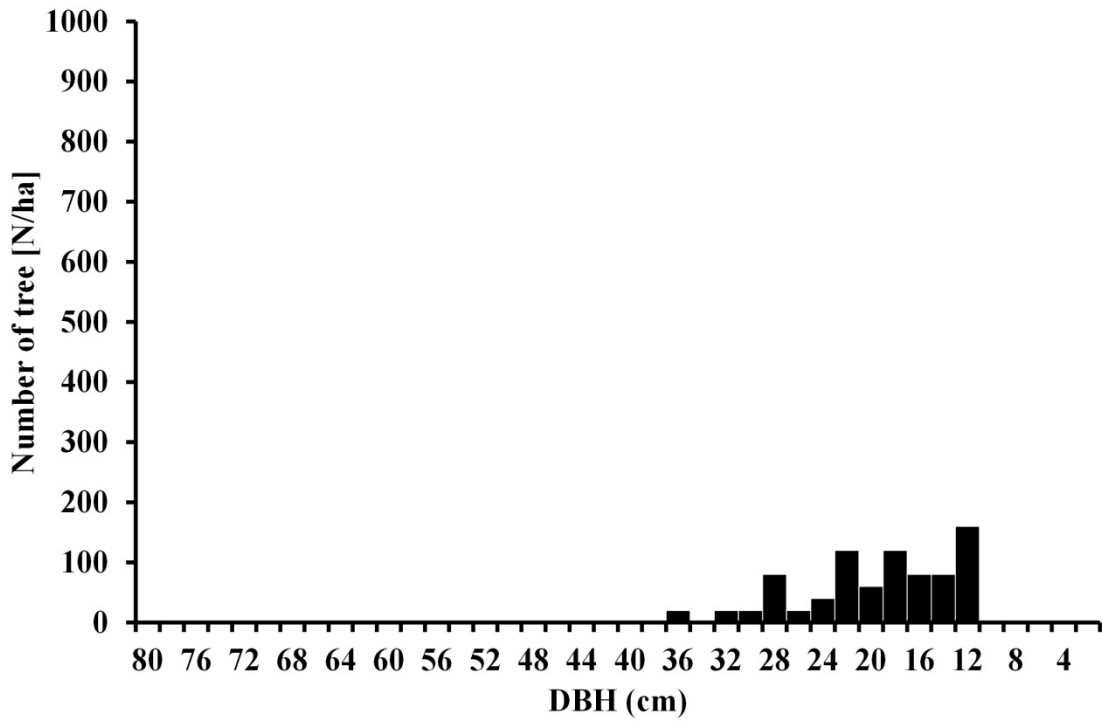
P-01



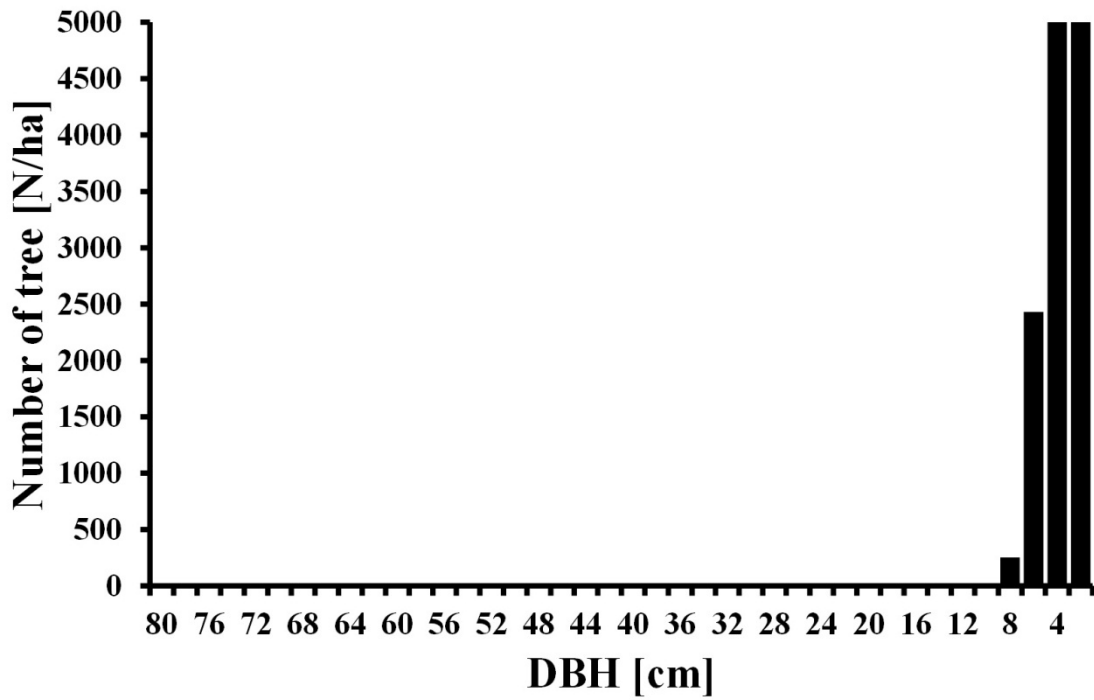
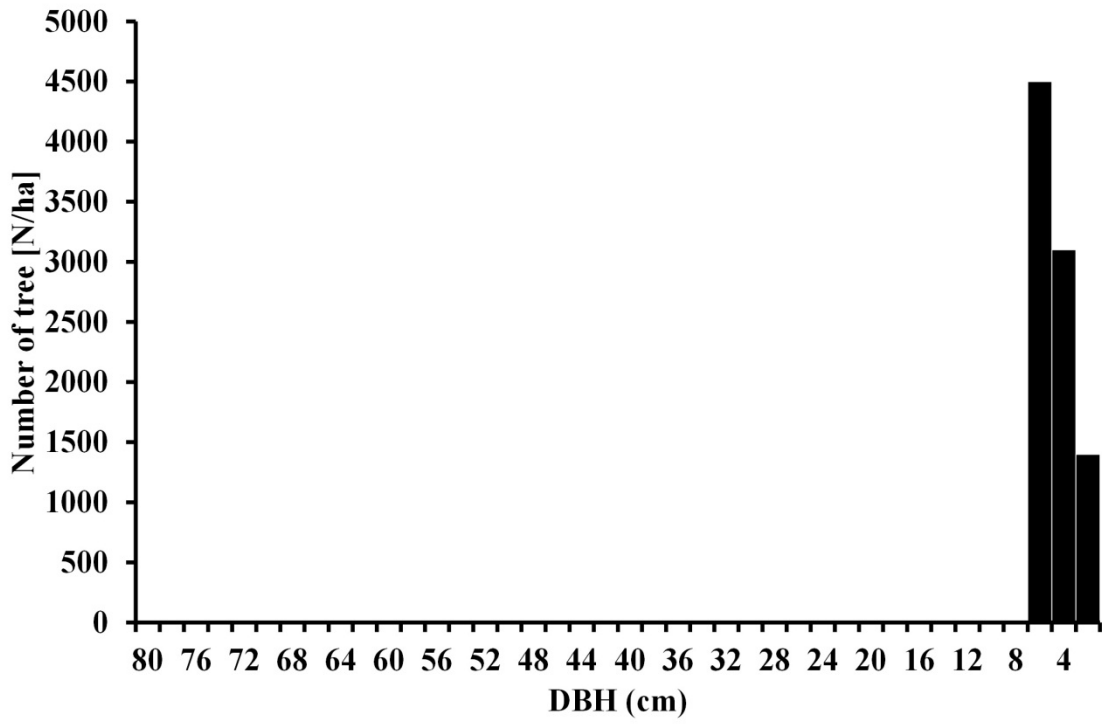
P-02



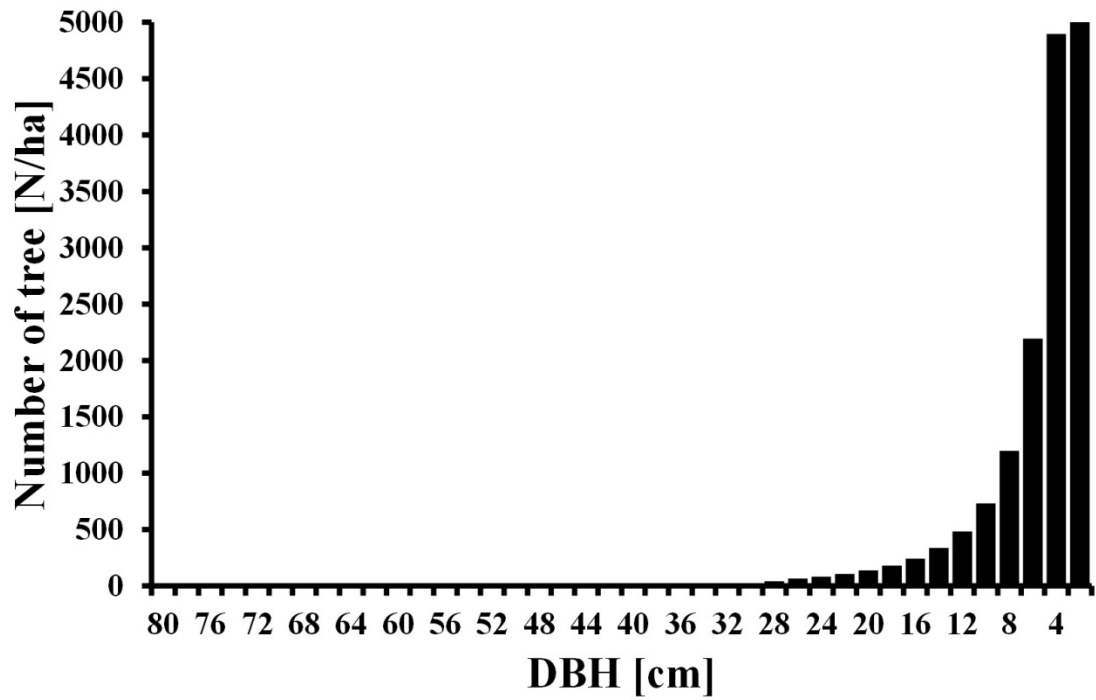
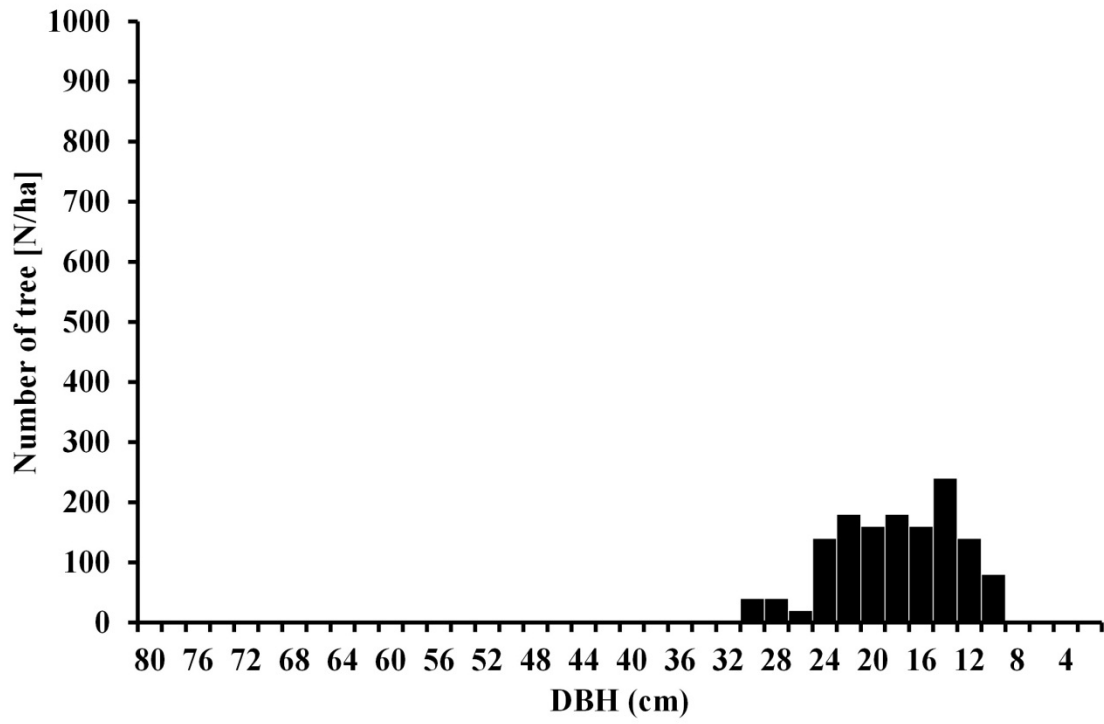
P-03



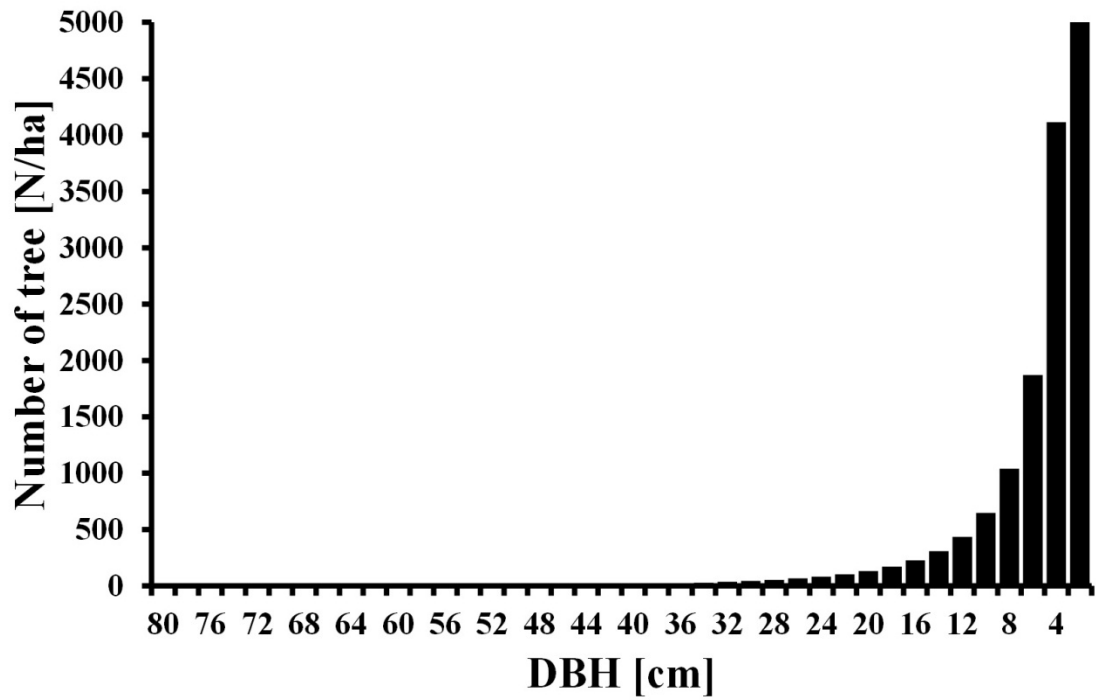
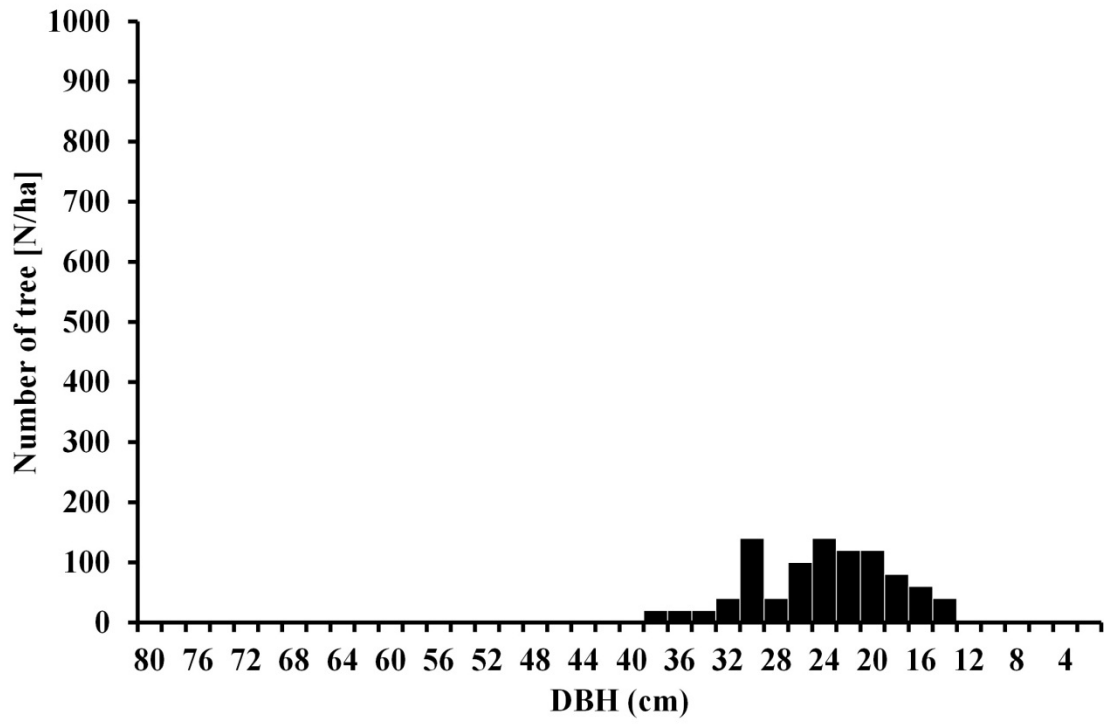
P-04



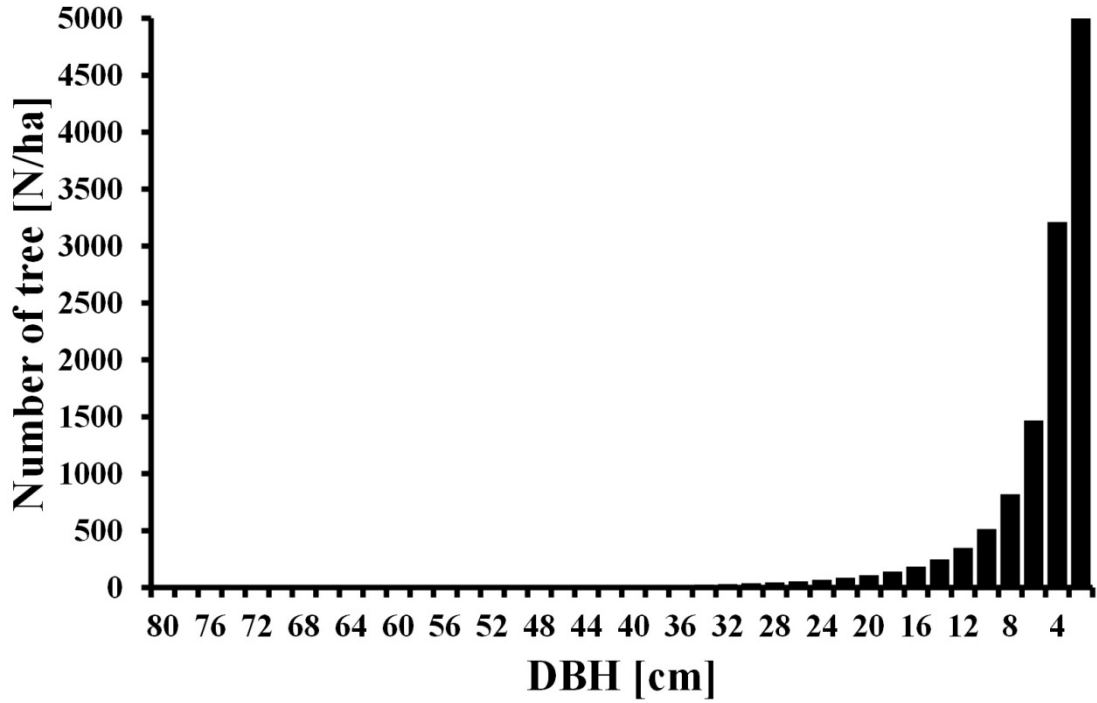
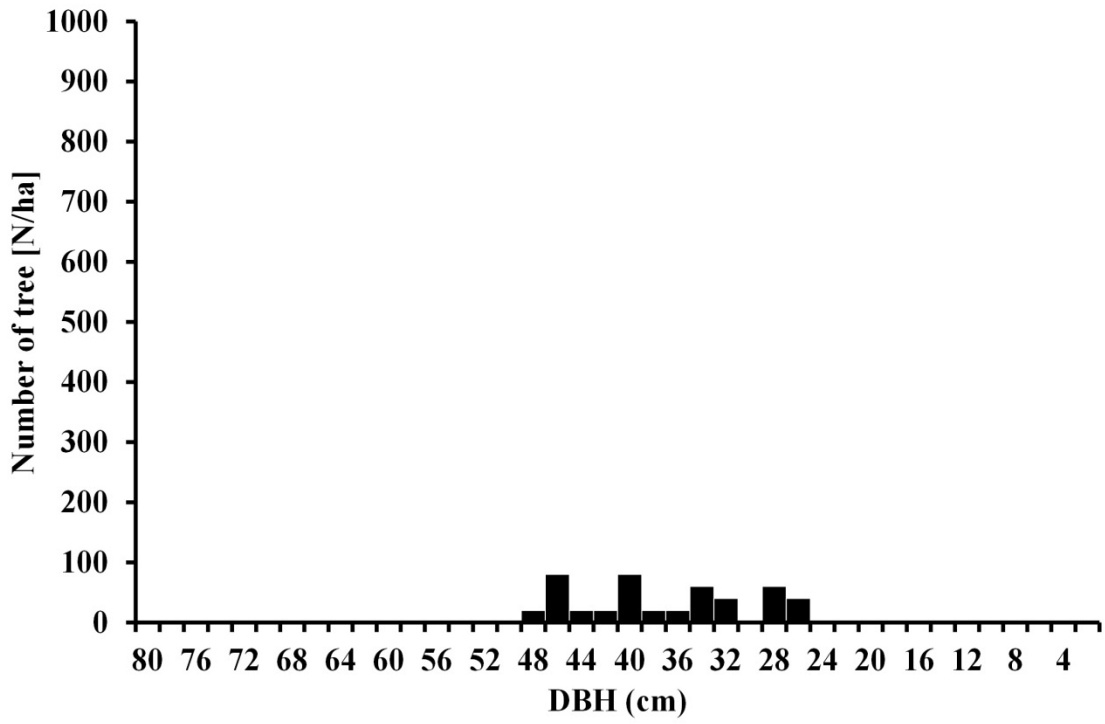
P-05



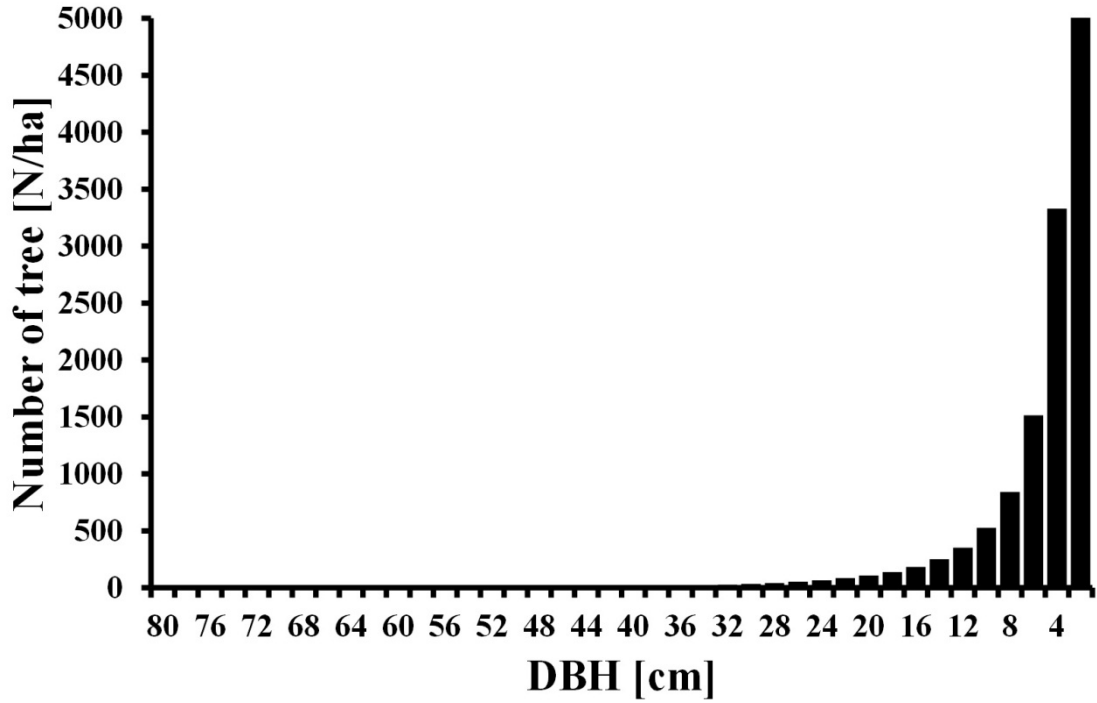
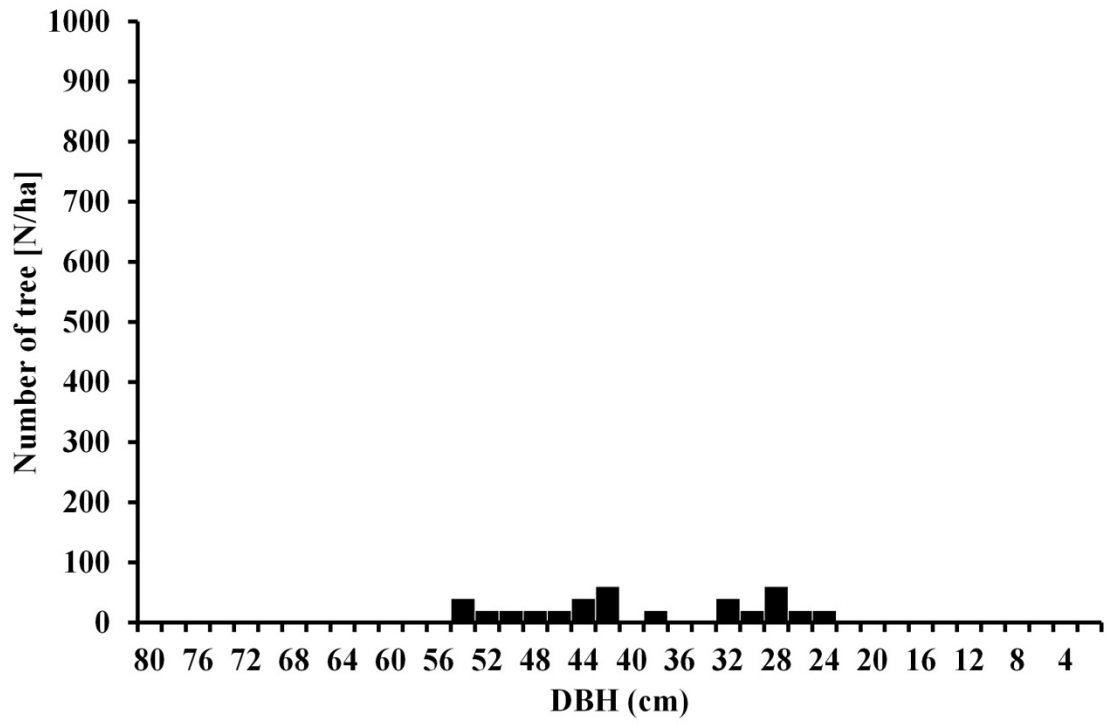
P-06



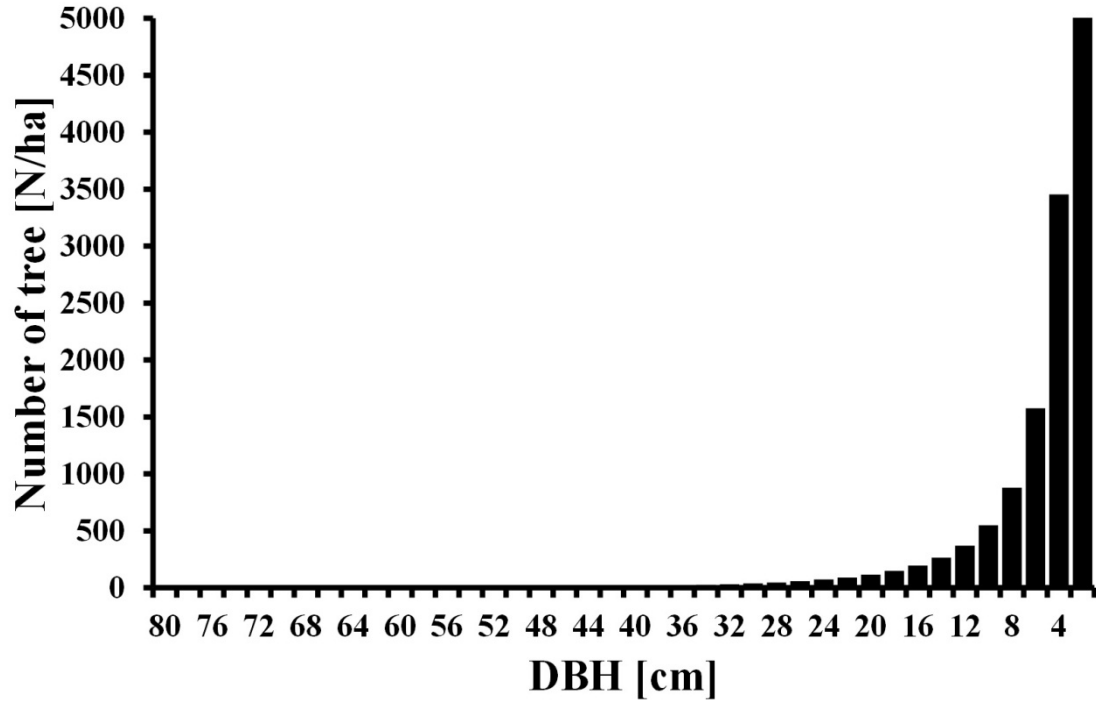
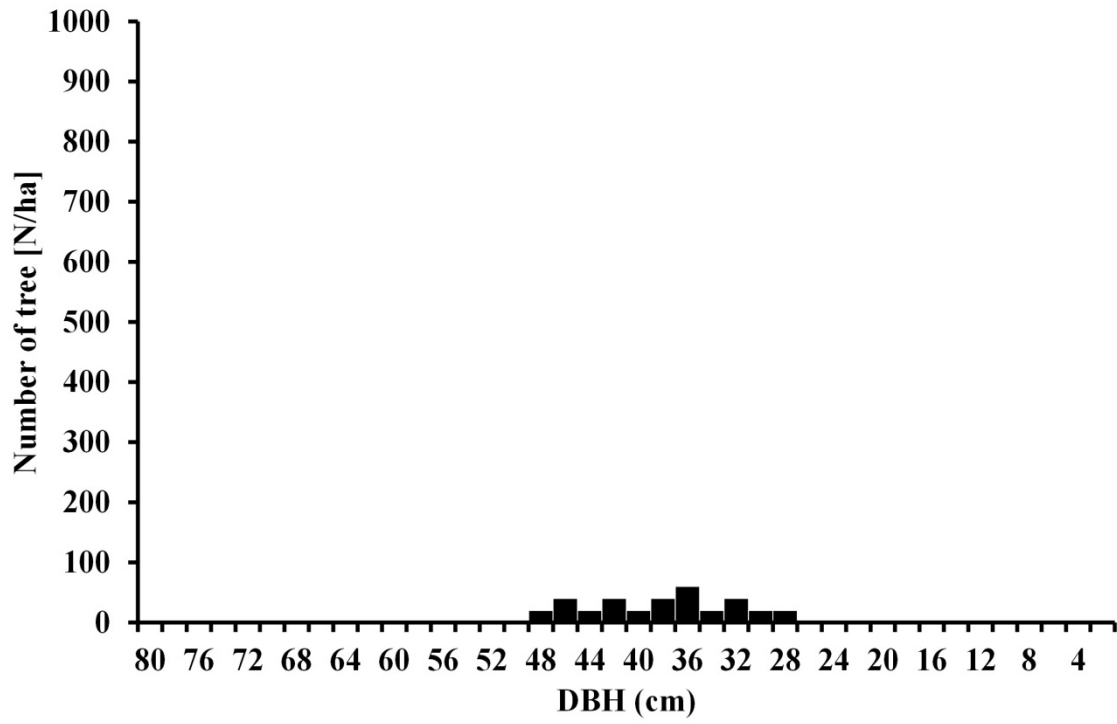
P-07



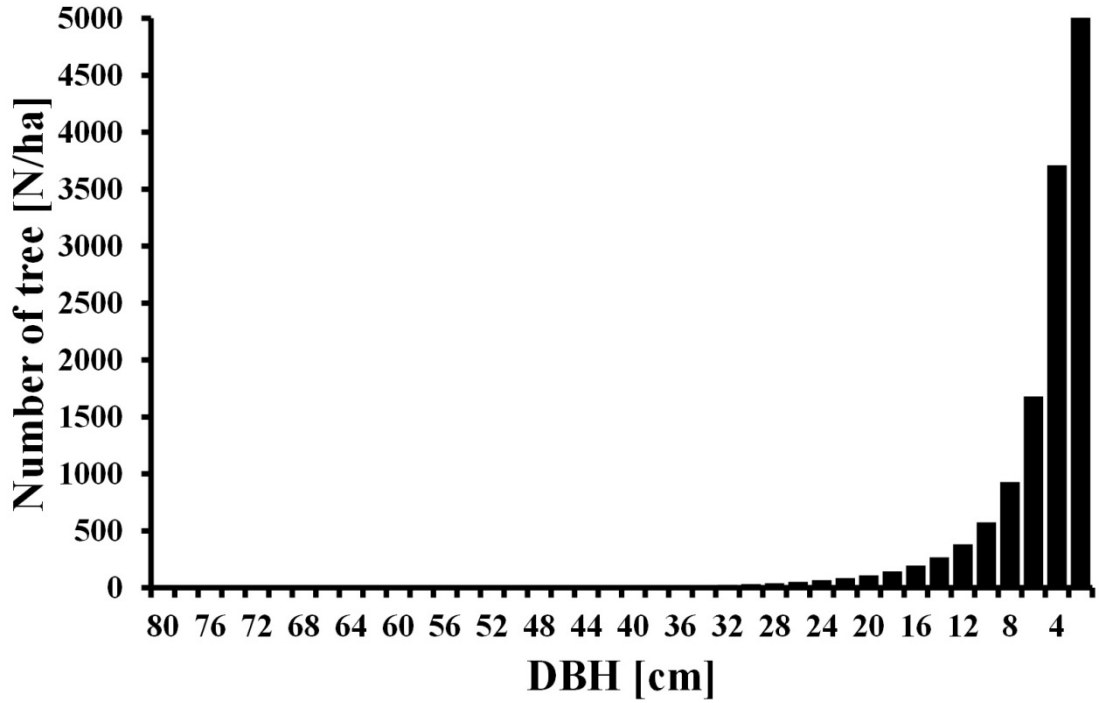
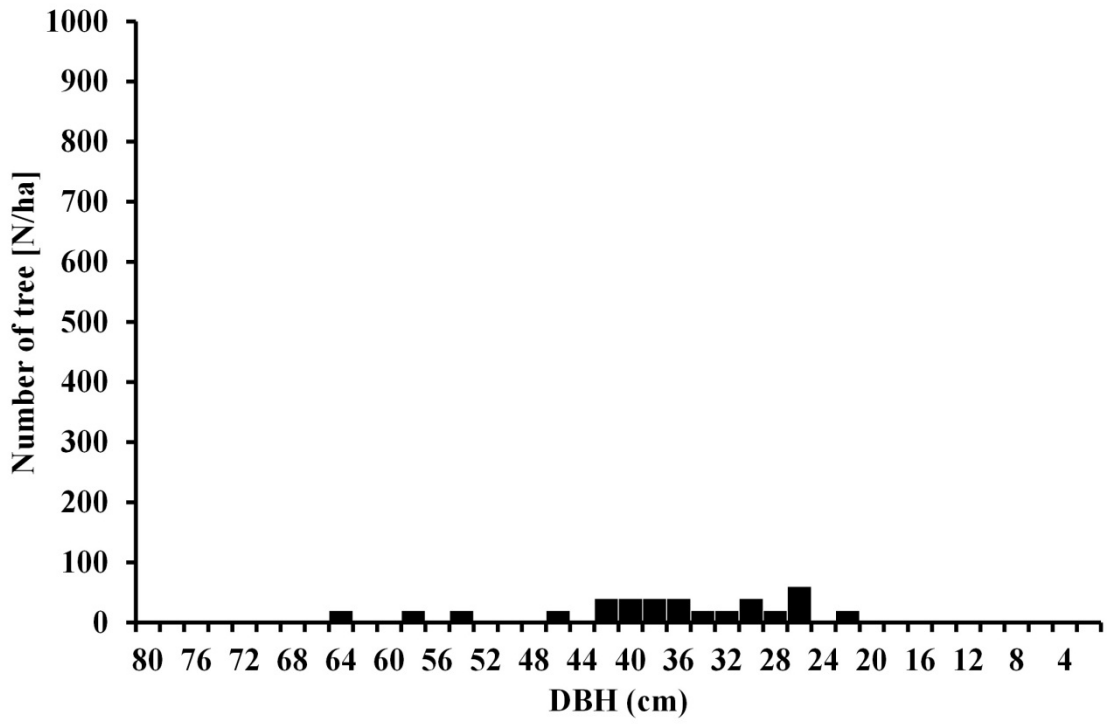
P-08



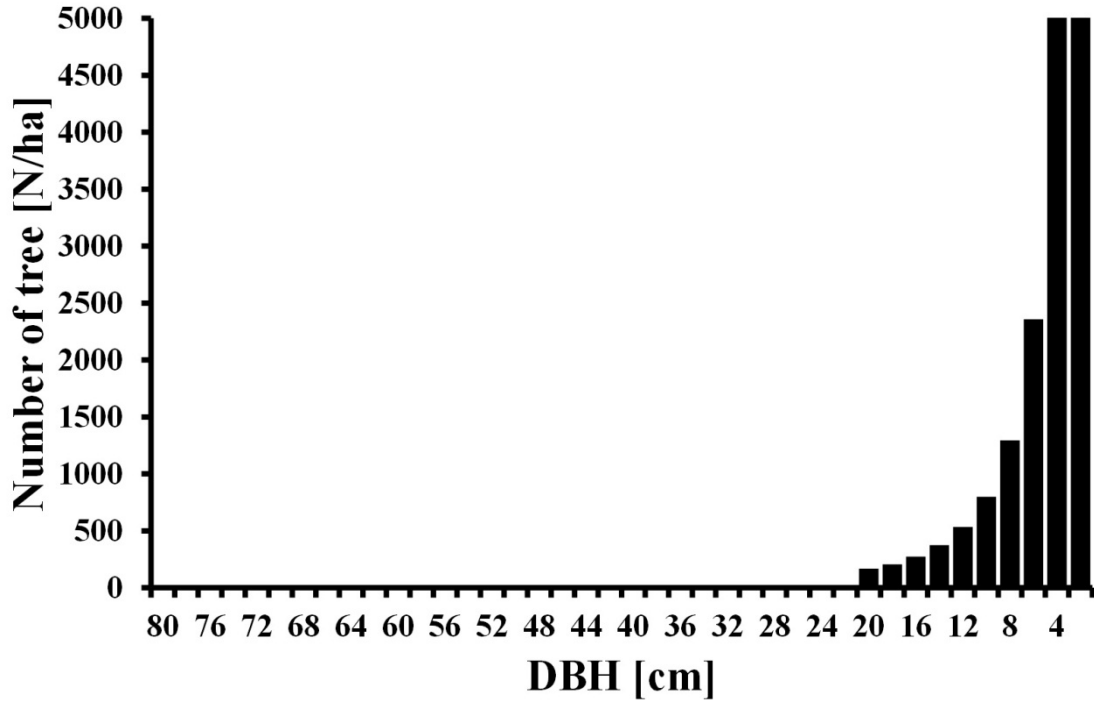
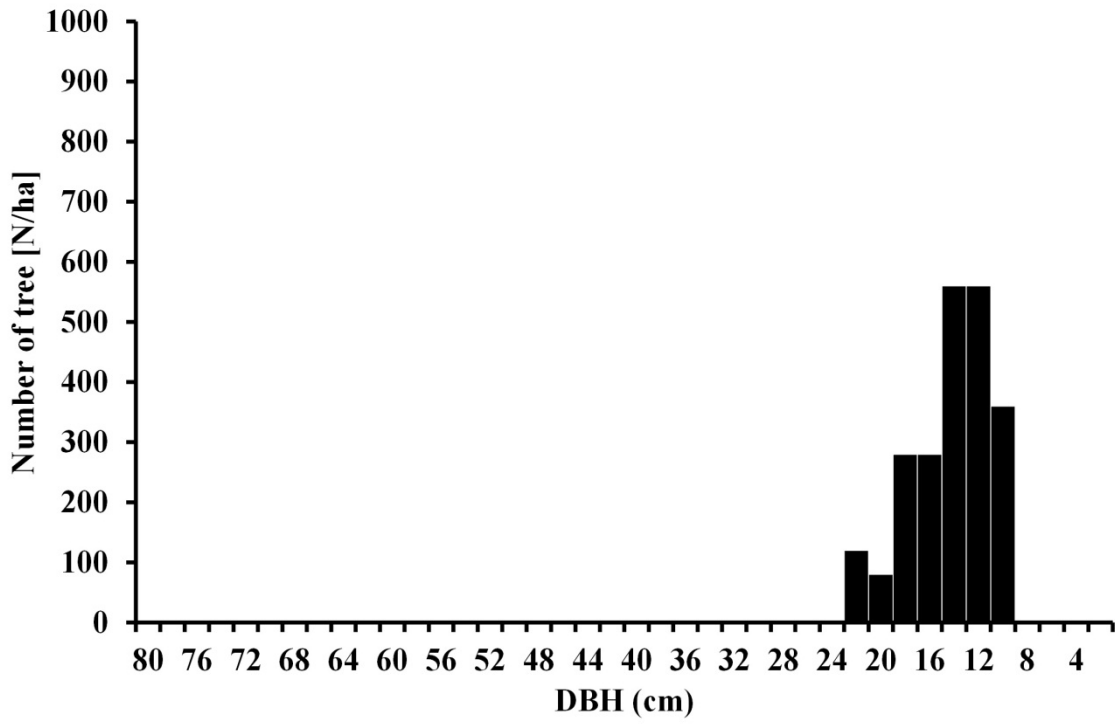
P-09



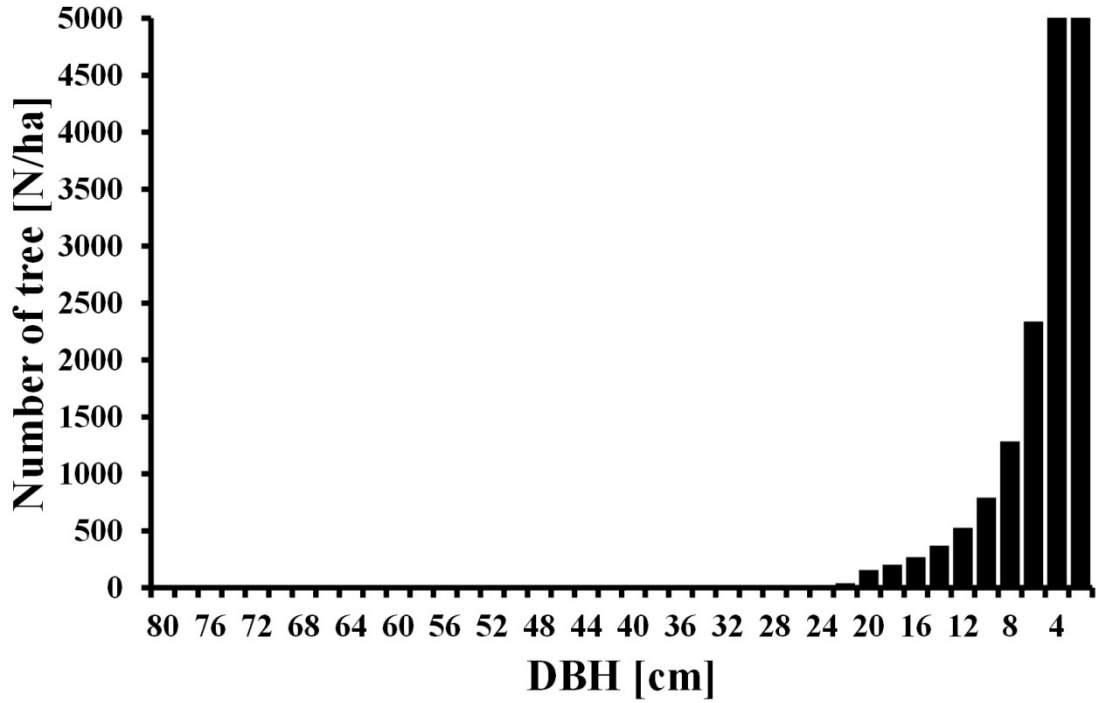
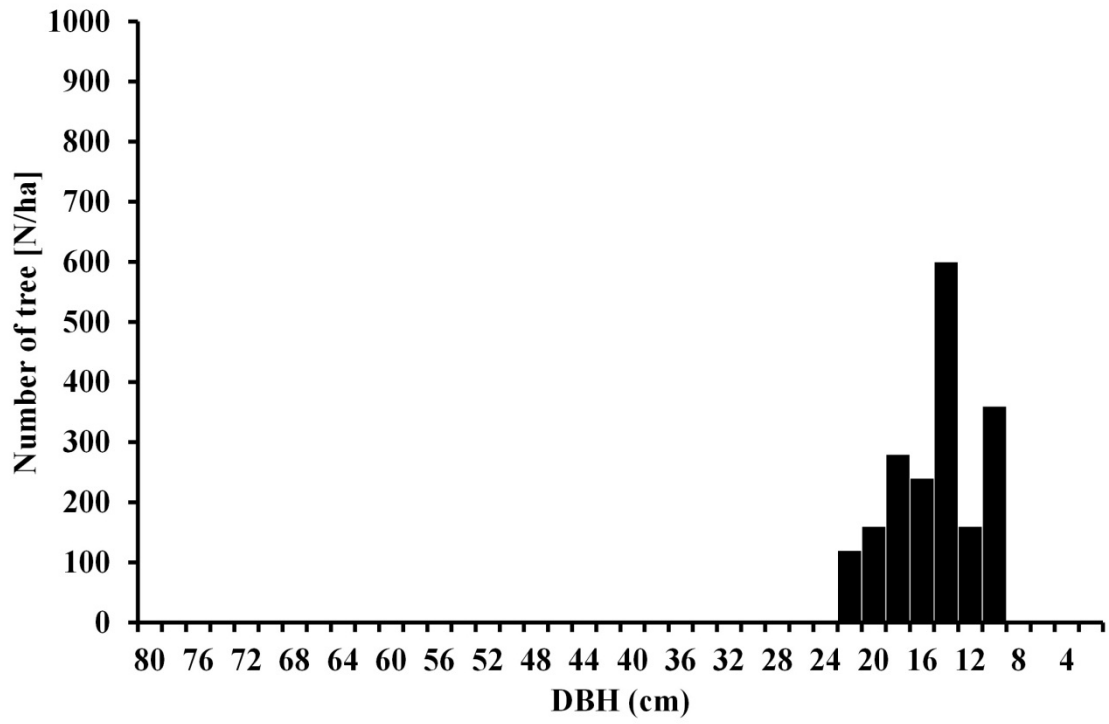
P-10



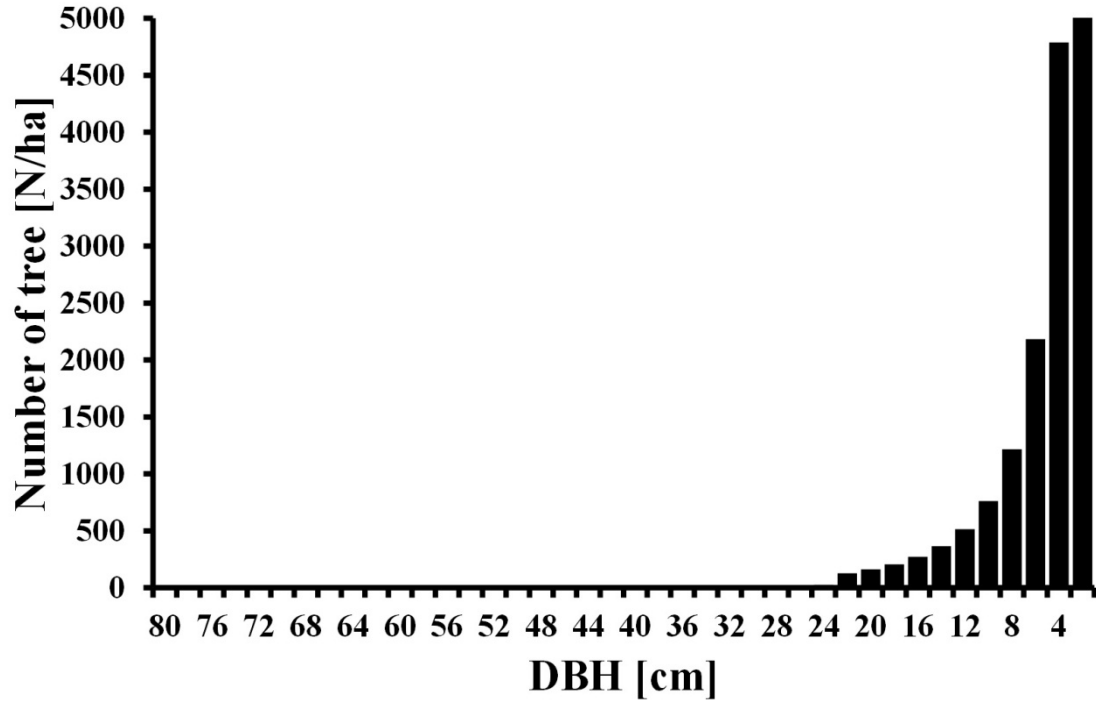
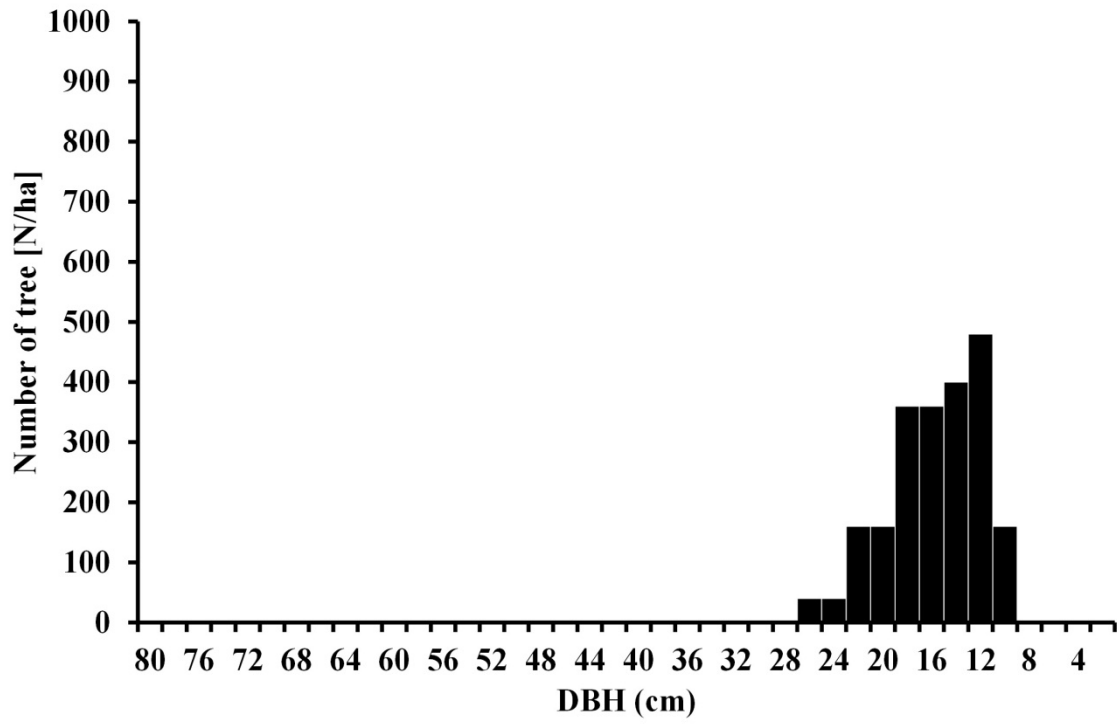
P-11



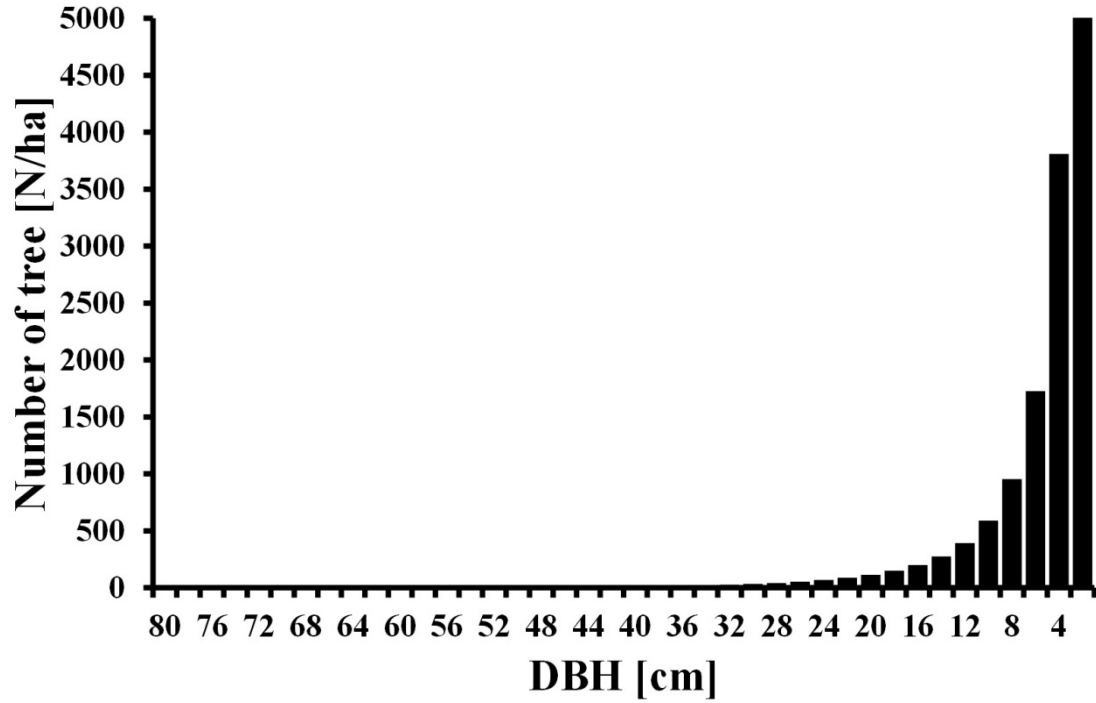
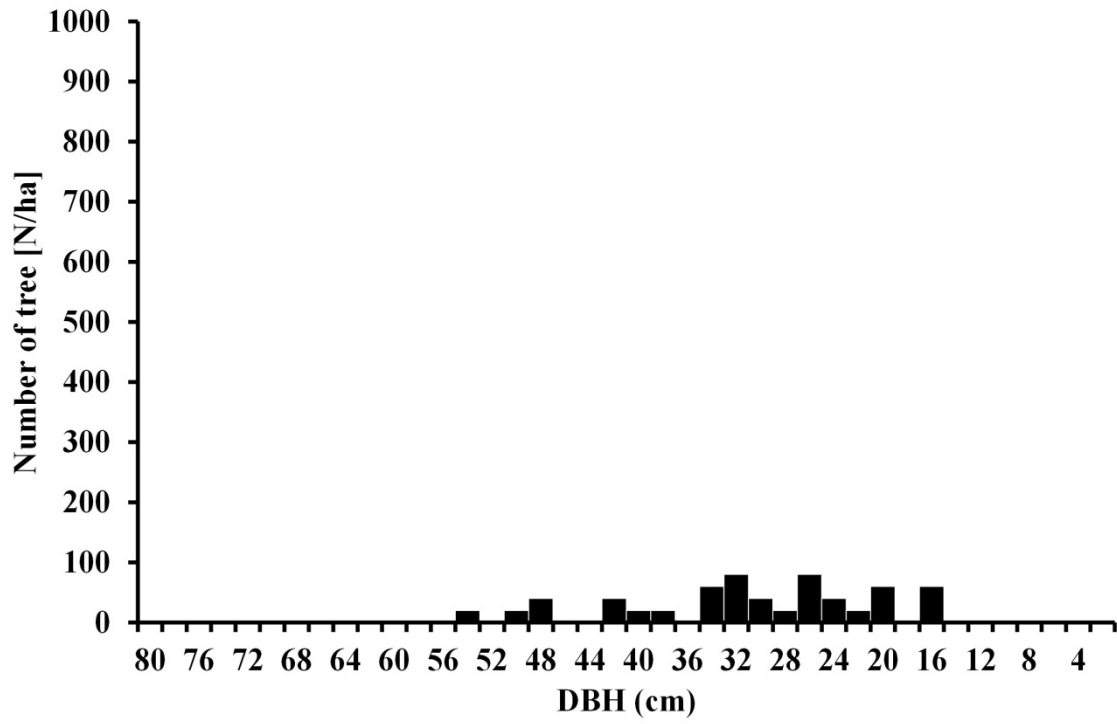
P-12



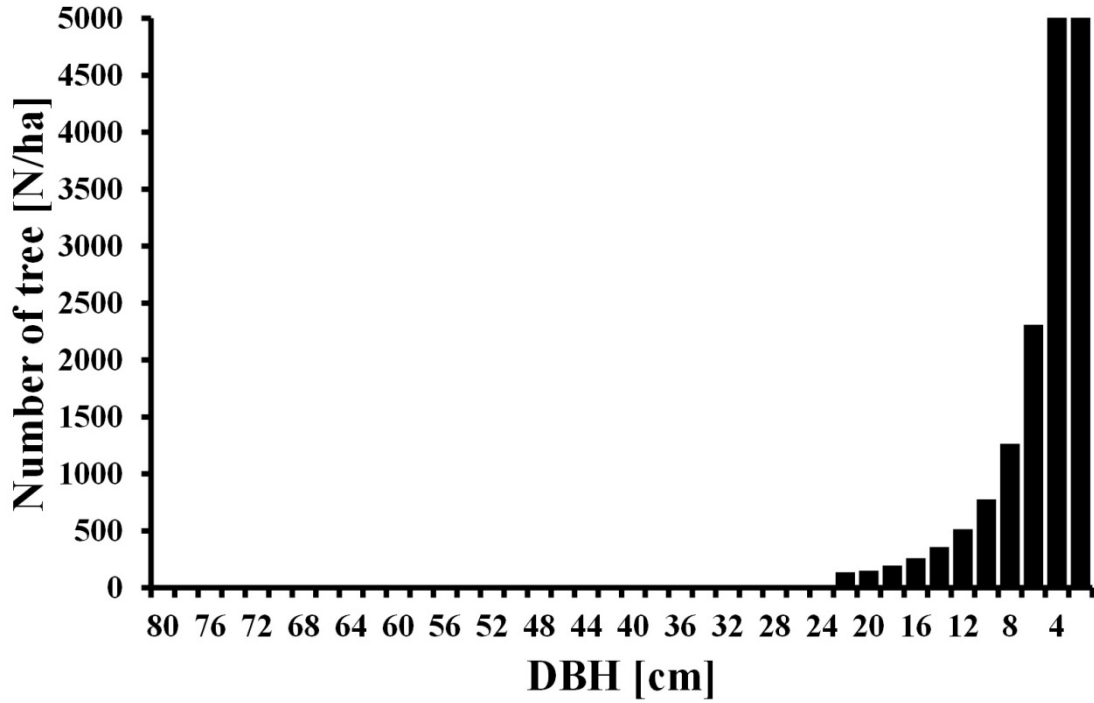
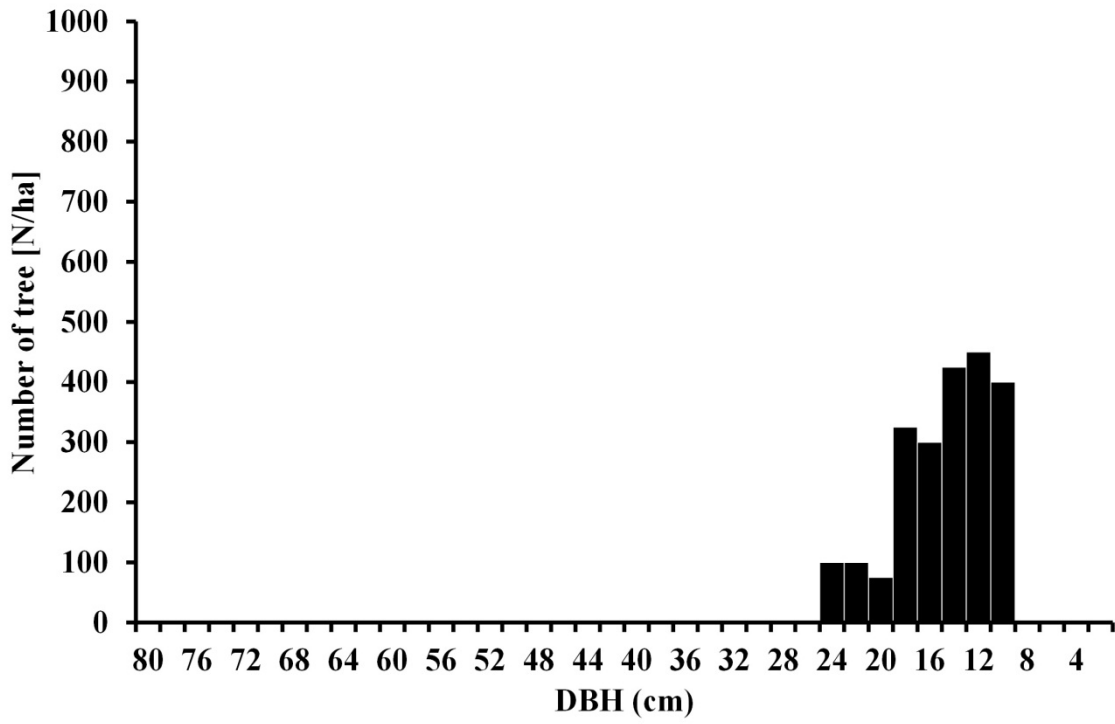
P-13



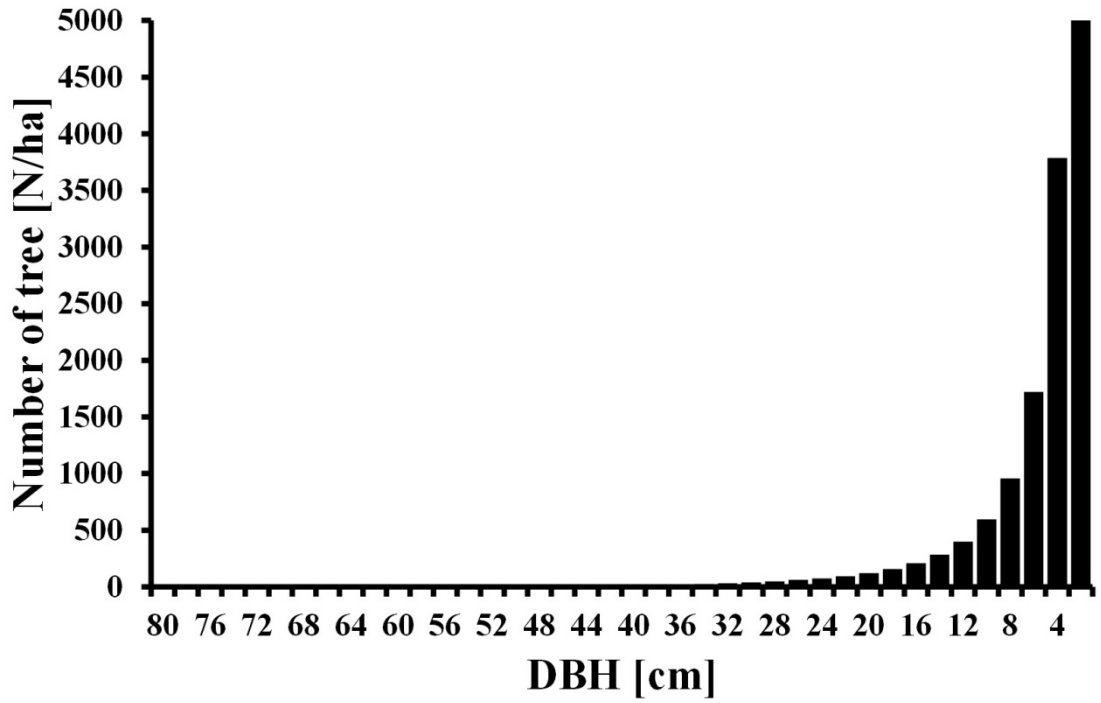
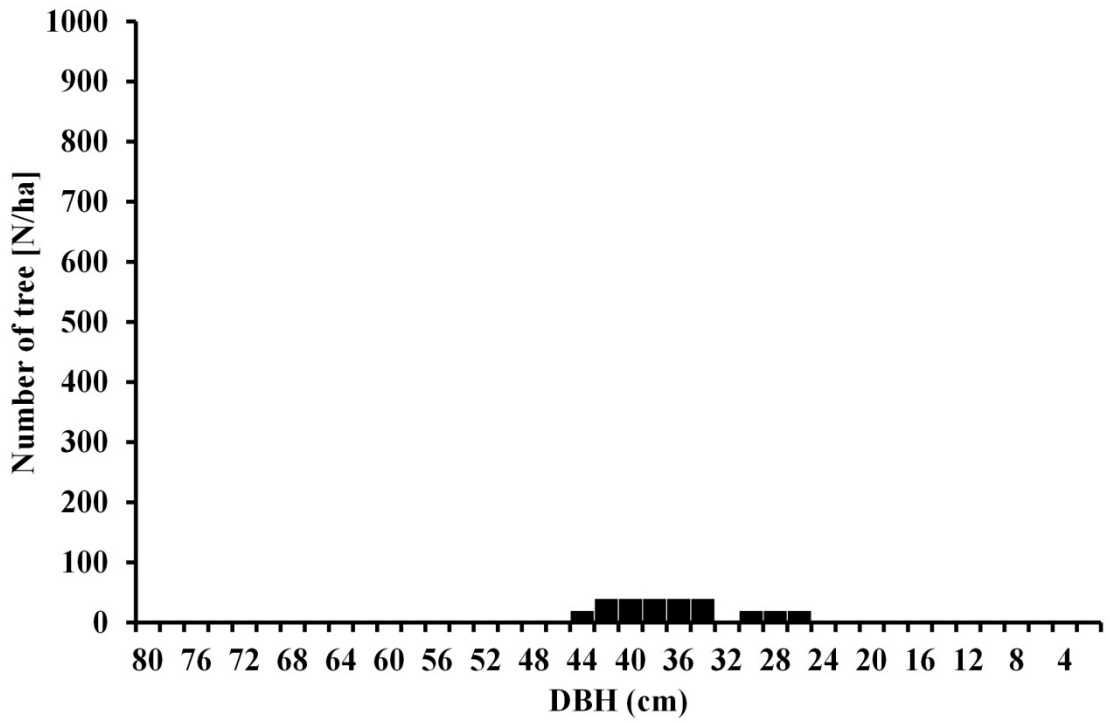
P-14



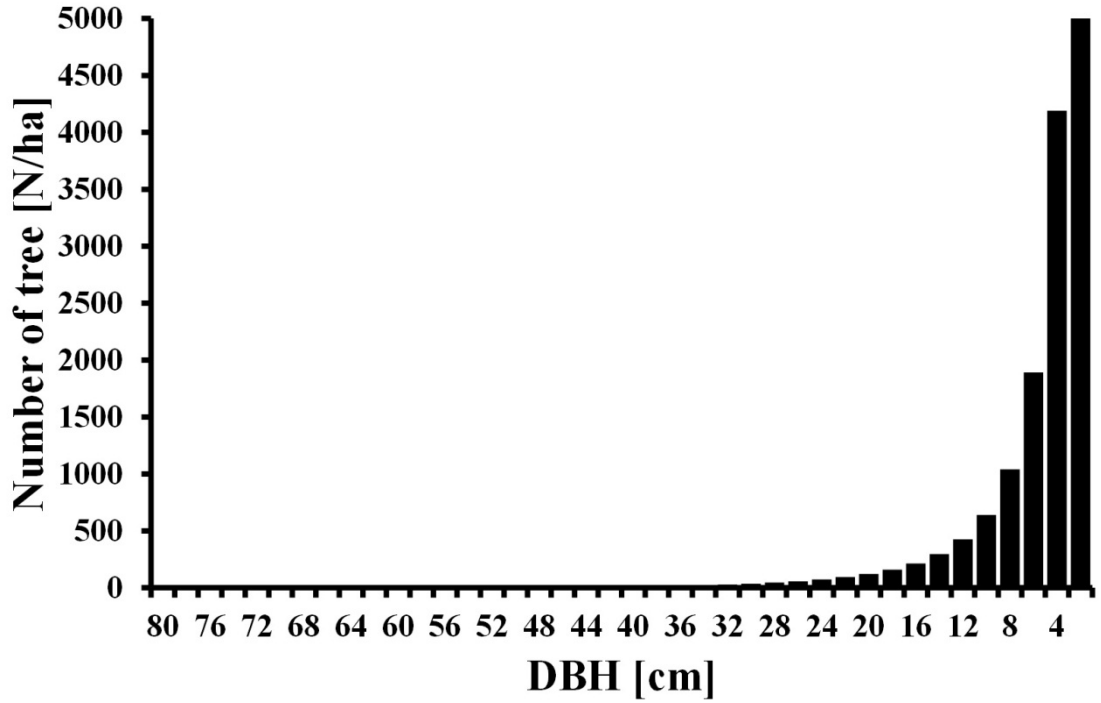
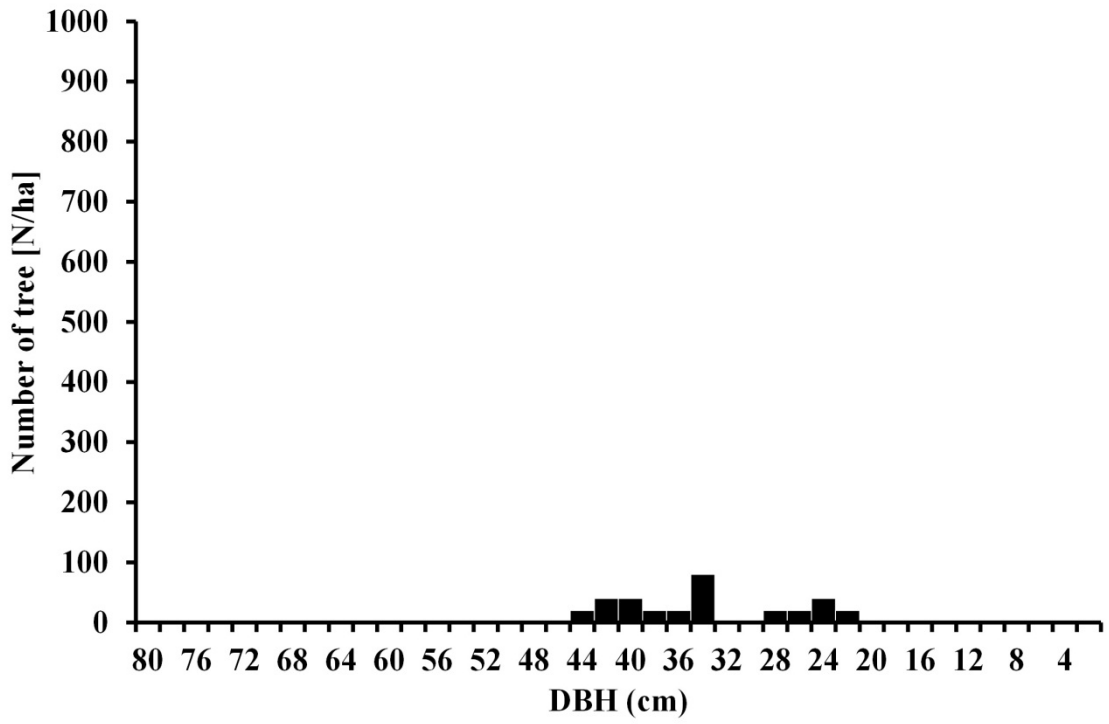
P-15



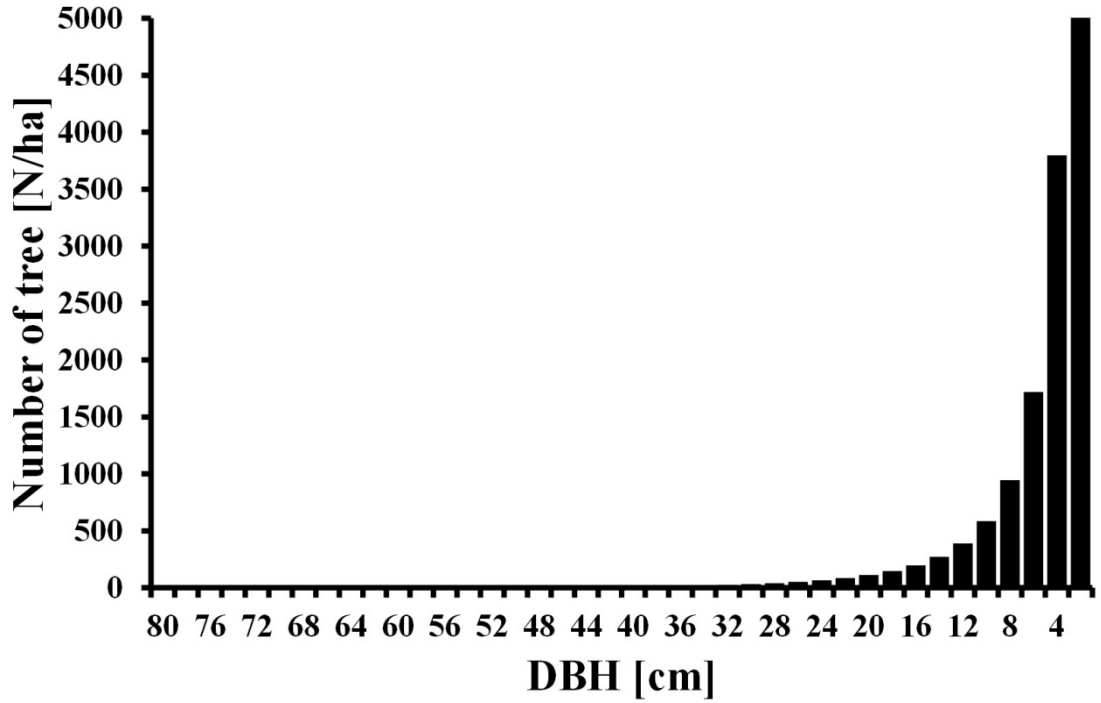
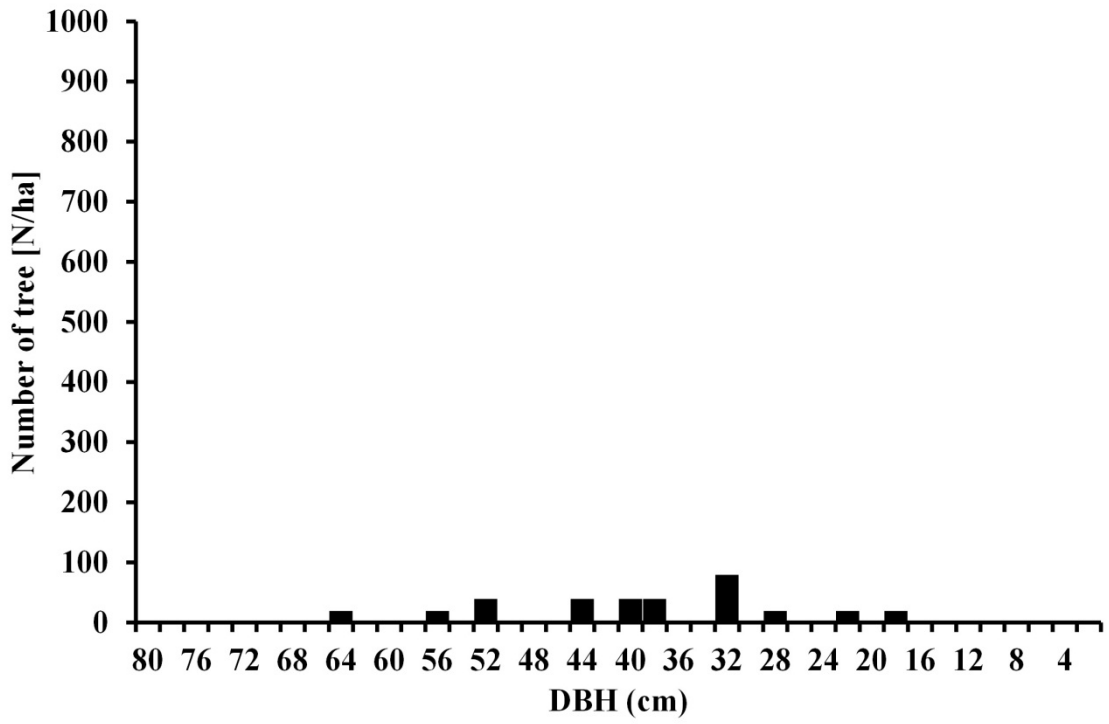
P-16



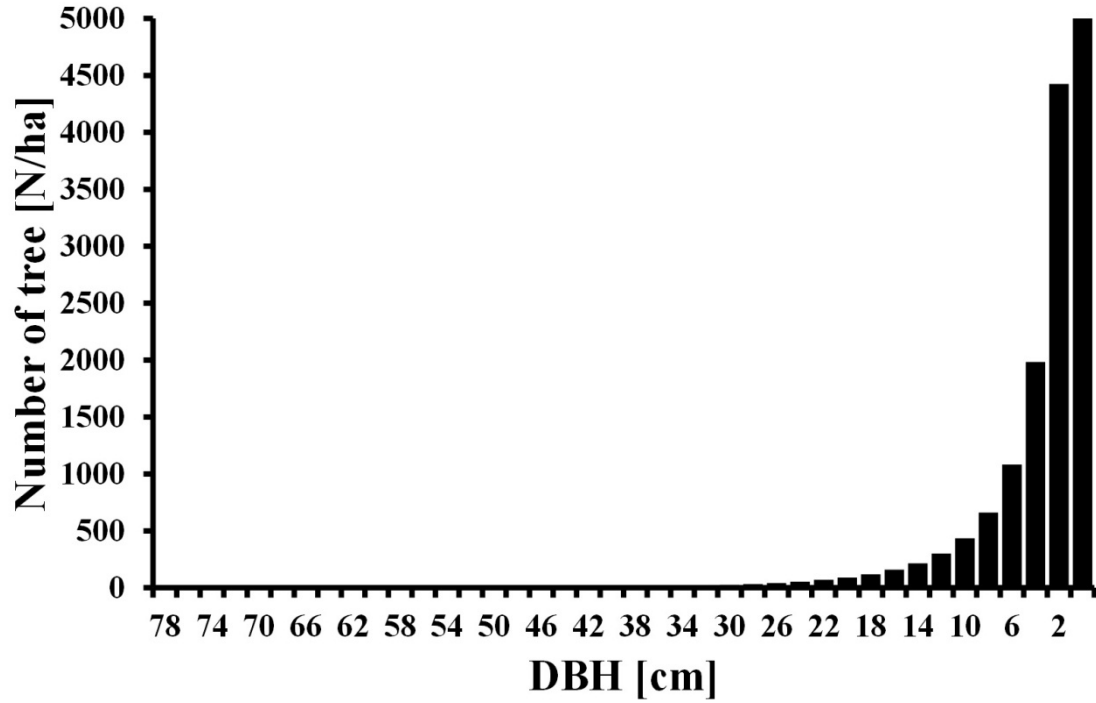
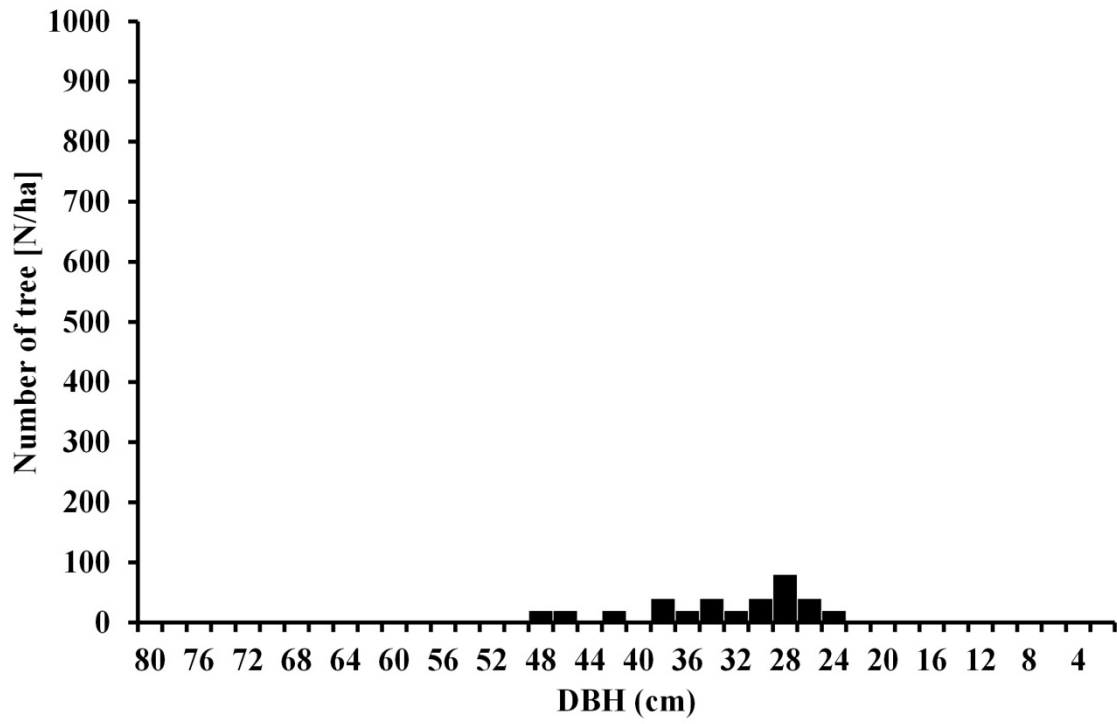
P-17



P-18



P-19



モンゴル北部フブスグル地域におけるシベリアカラ マツ天然林

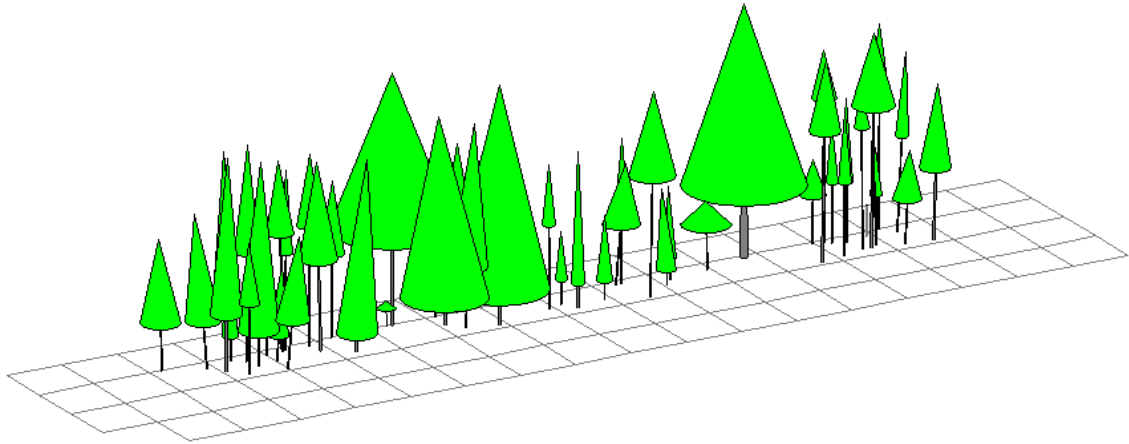
毎木調査地 Forest Window 画像

注) メッシュはすべて 5m

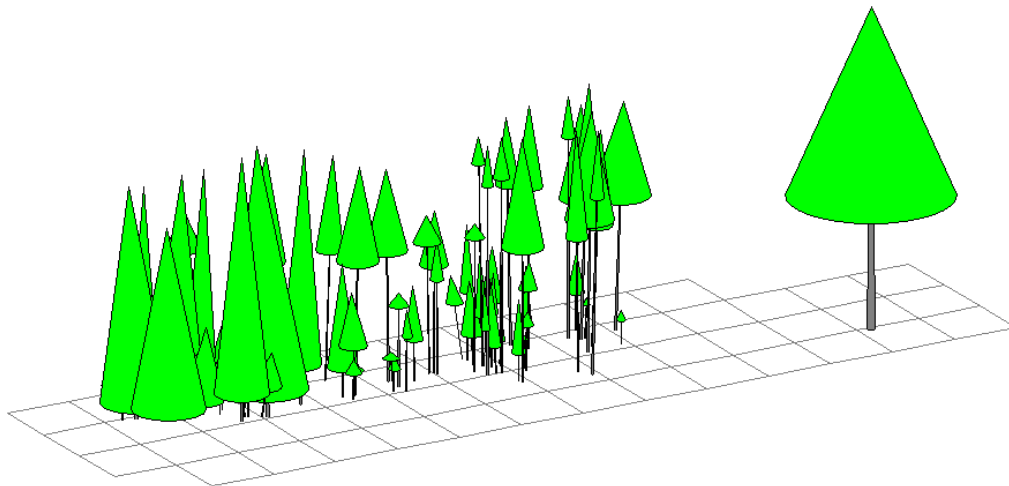
黄緑色：カラマツ

濃い緑：トウヒ

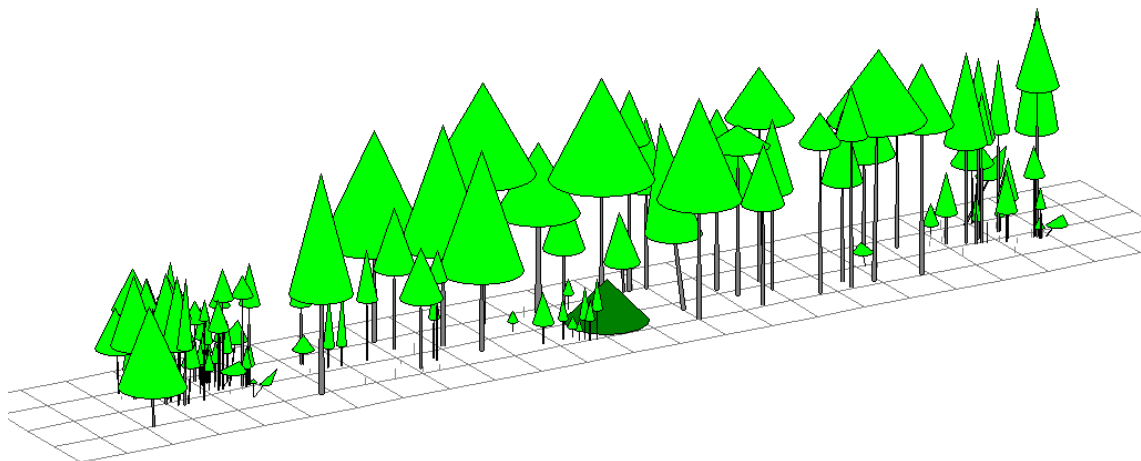
L-01



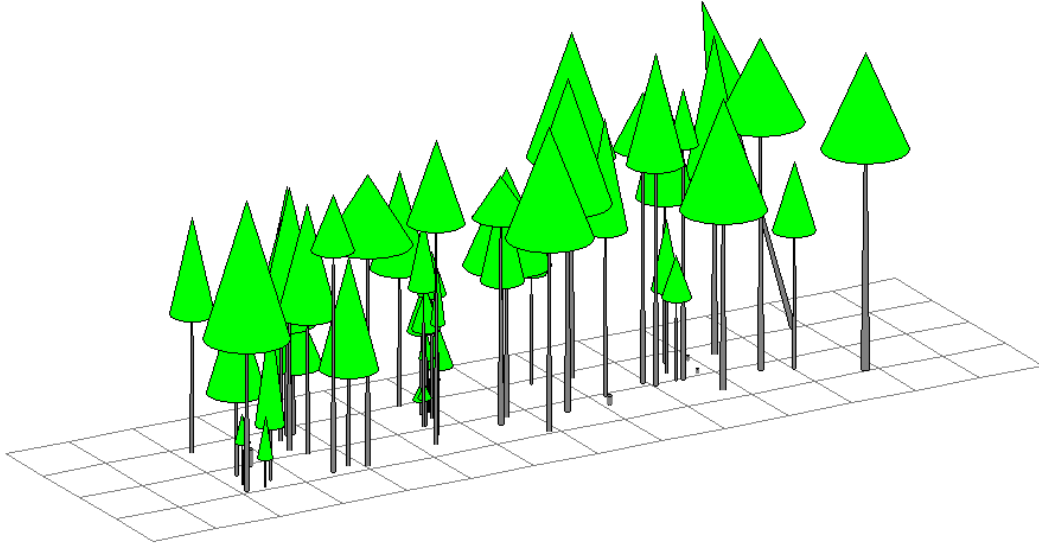
L-02



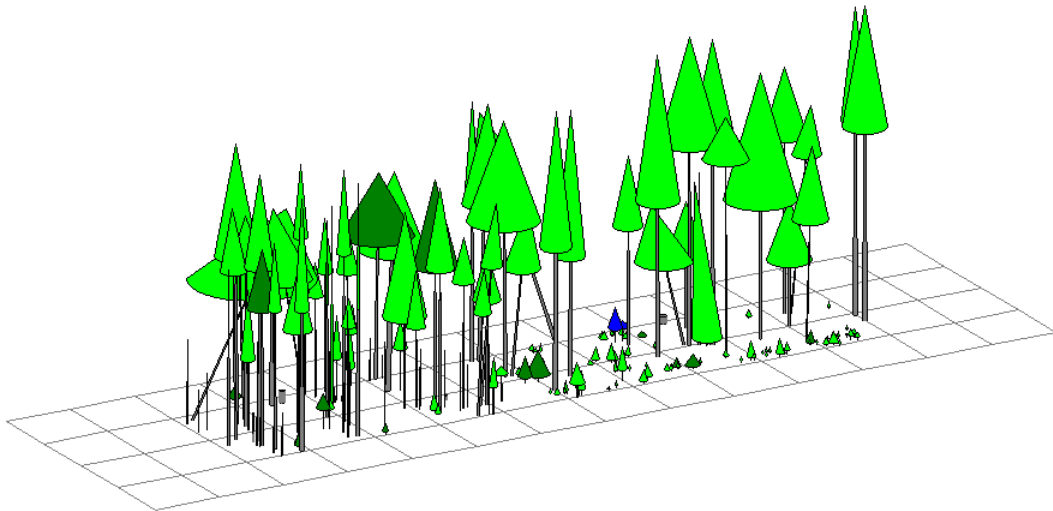
L-03



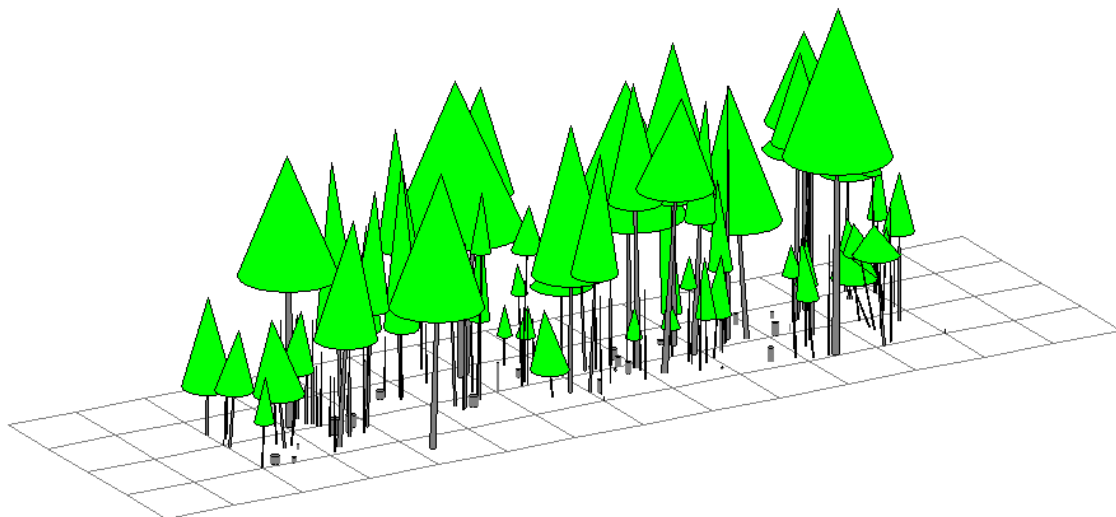
L-04



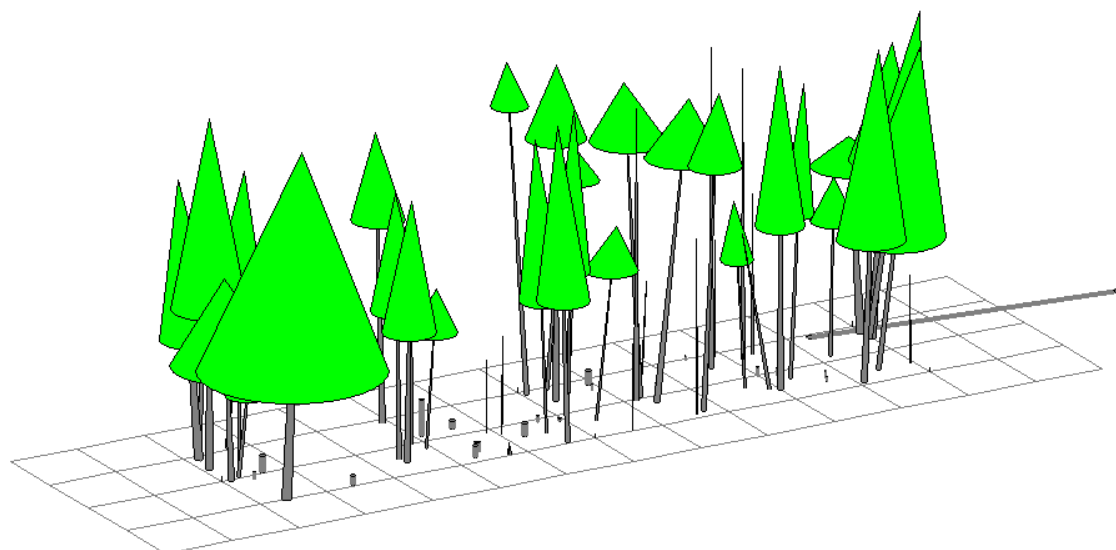
L-05



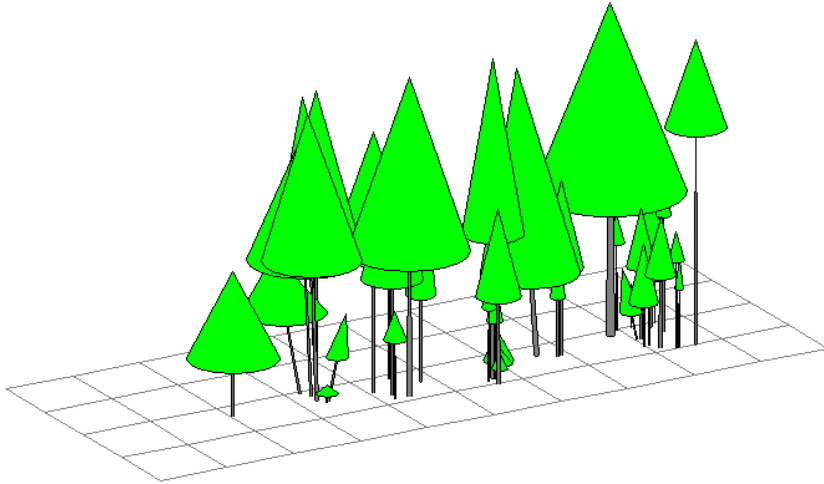
L-06



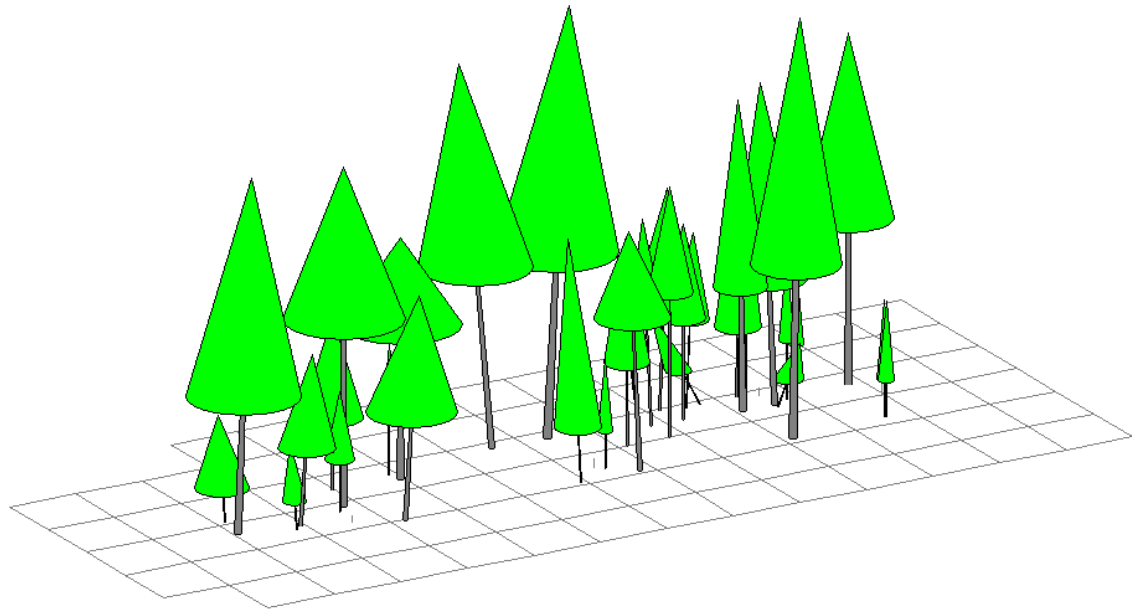
L-07



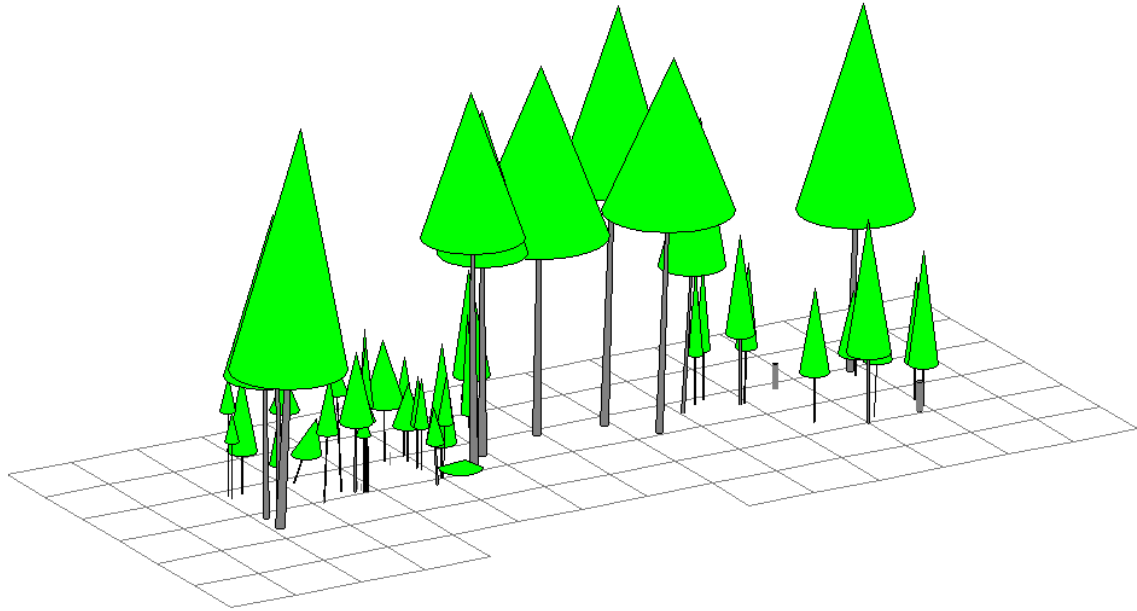
L-08



L-09

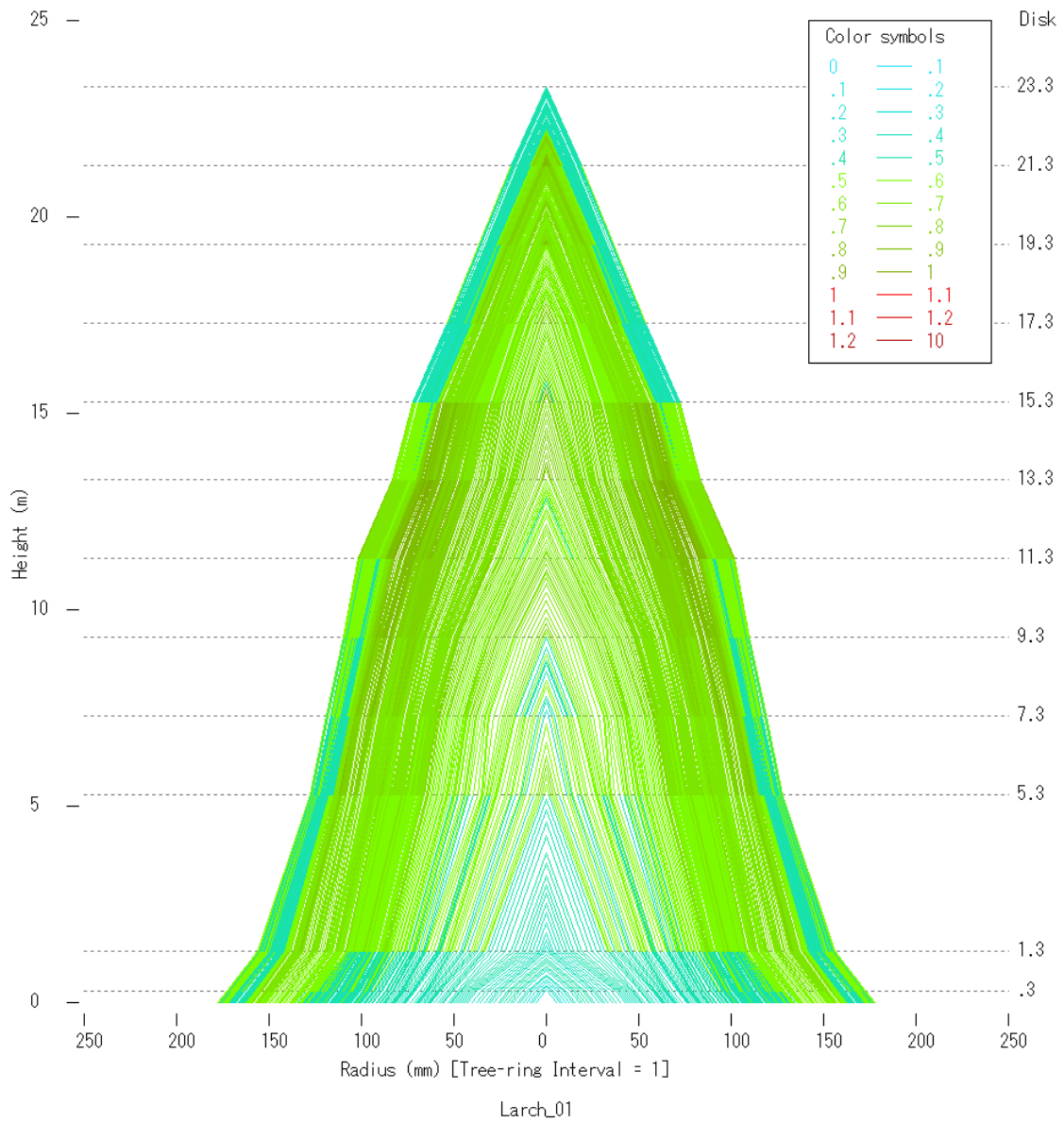


L-10

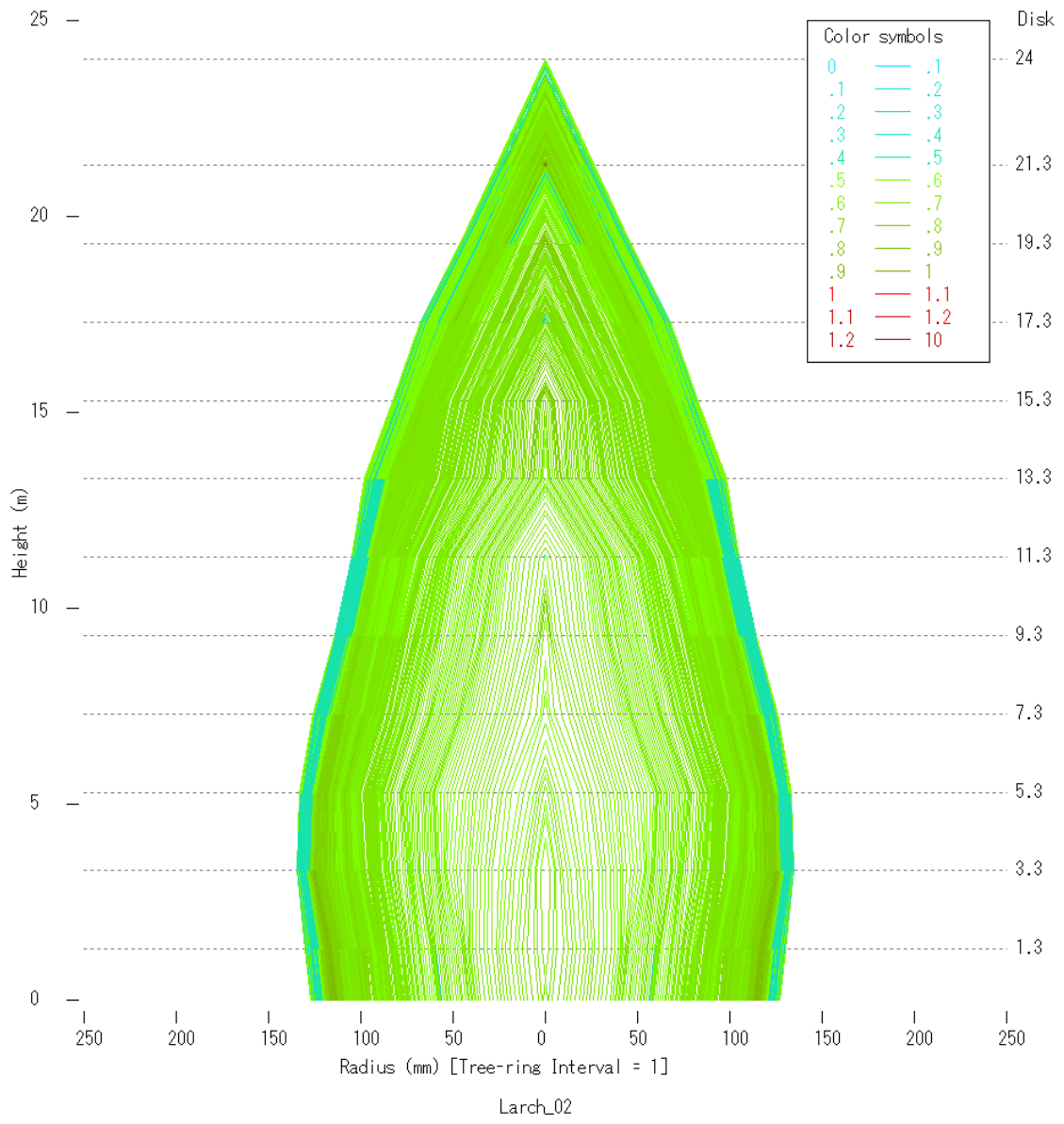


樹幹解析による SDA 画像

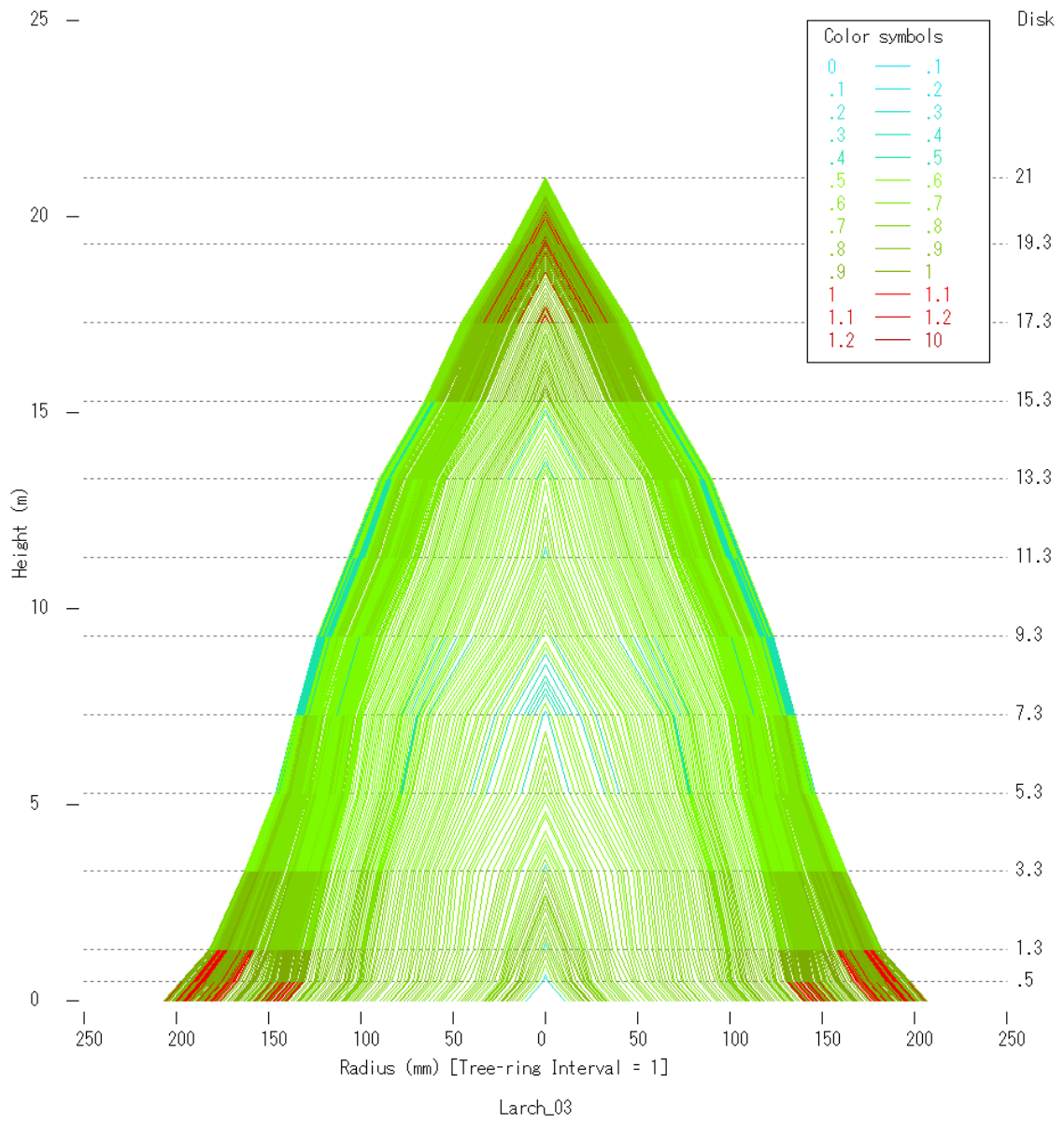
Larch_01



Larch_02



Larch_03



直径階別本数分布

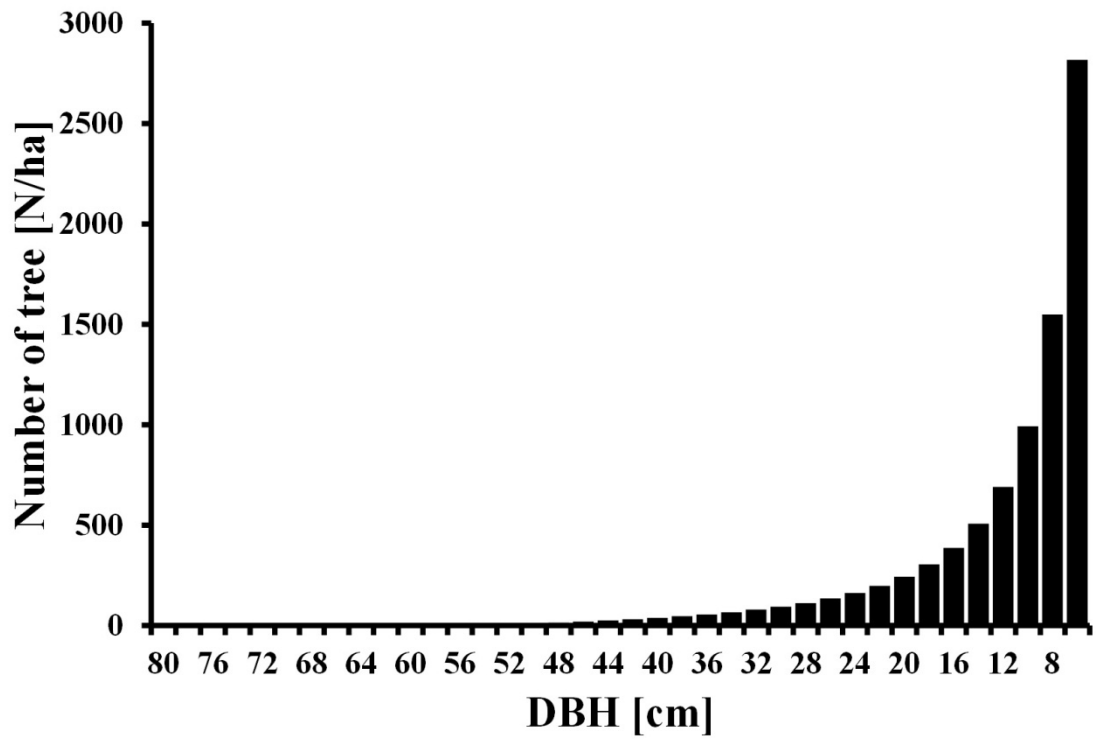
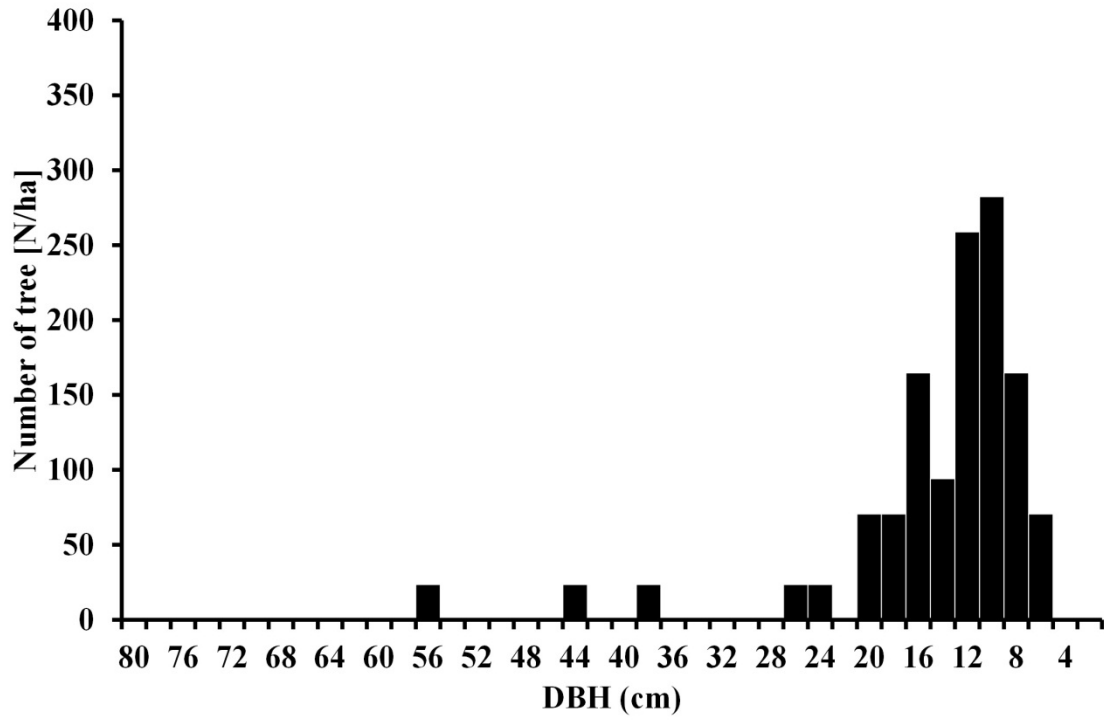
上段 : 毎木調査データに基づく直径階別本数分布 (実測値)

下段 : Y-N 曲線に基づく直径階別本数分布 (理論値)

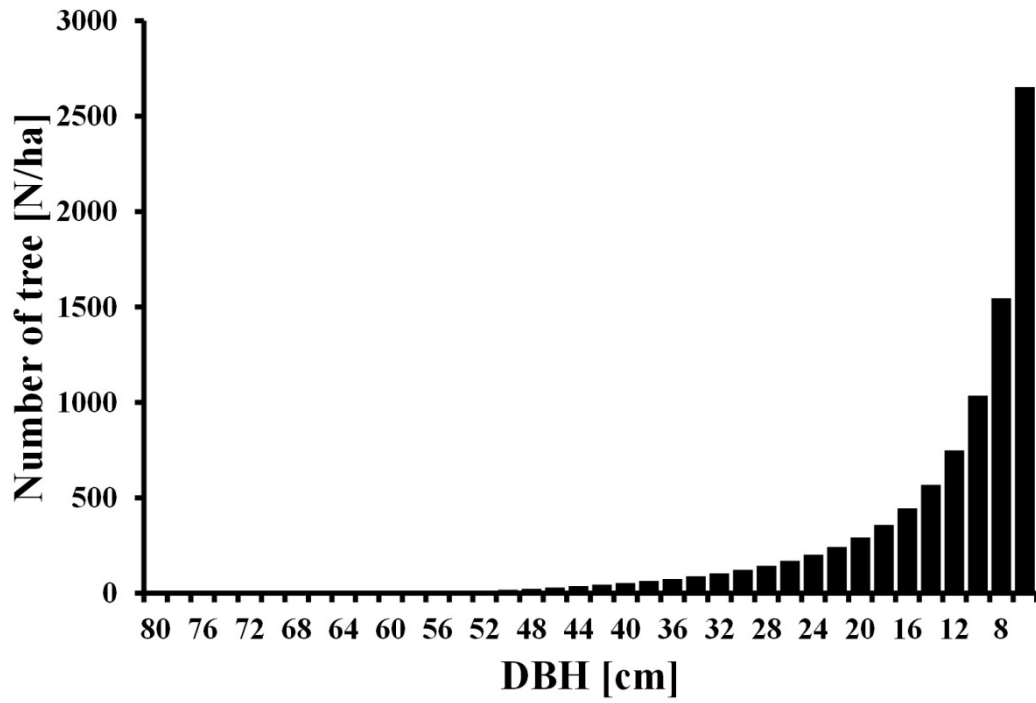
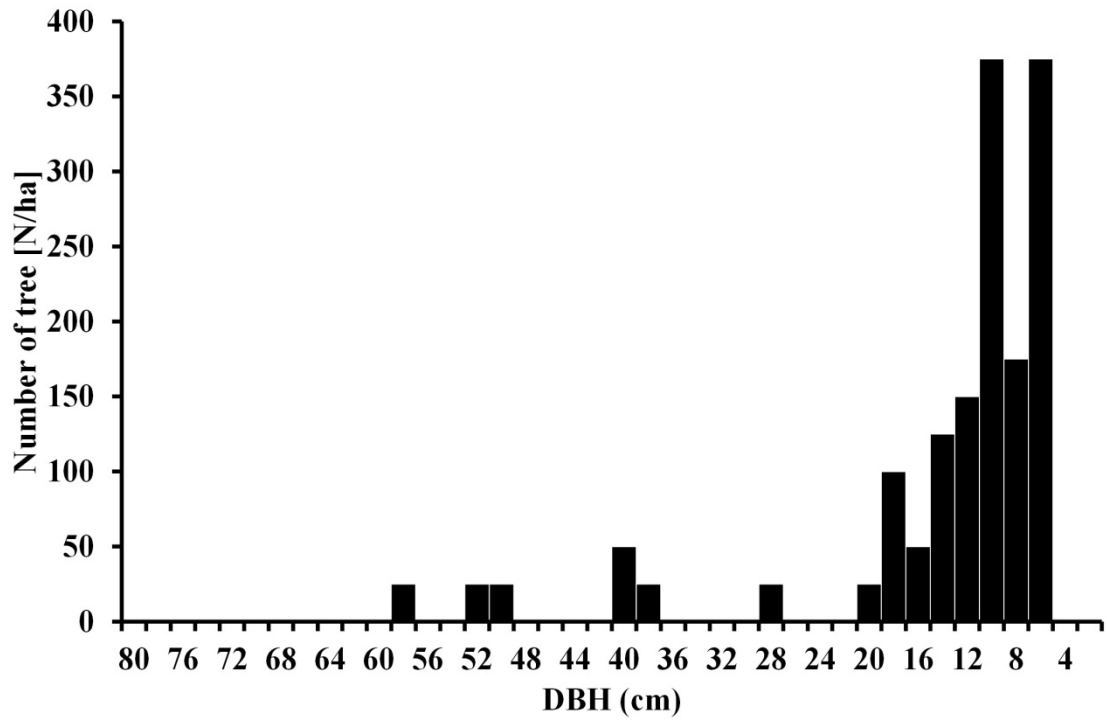
注) 収量-密度図上の Y-N 曲線にあわせて横軸 (DBH) は左右反転してある。

縦軸 (本数密度) の上限値 : 実測値は 400 理論値は 3000

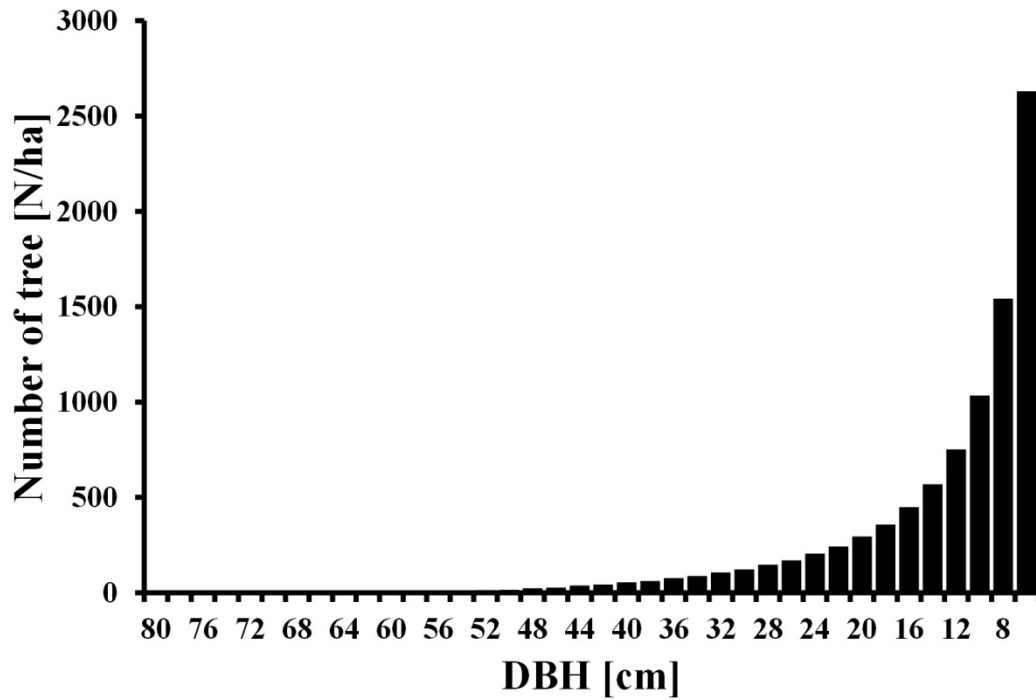
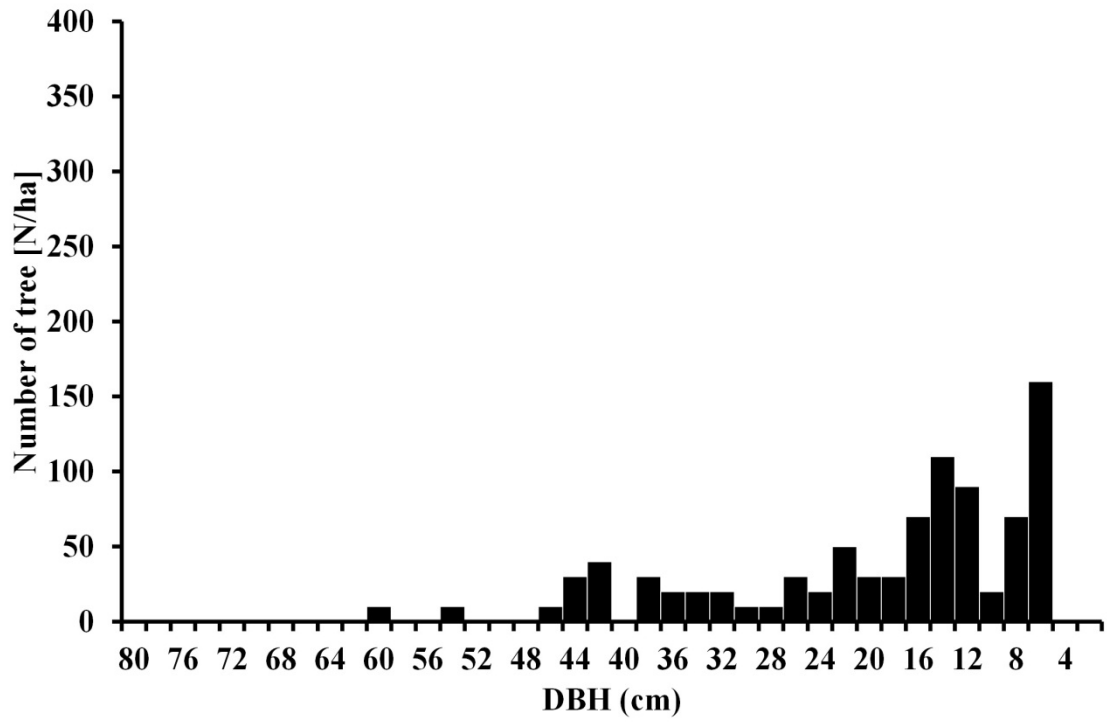
L-01



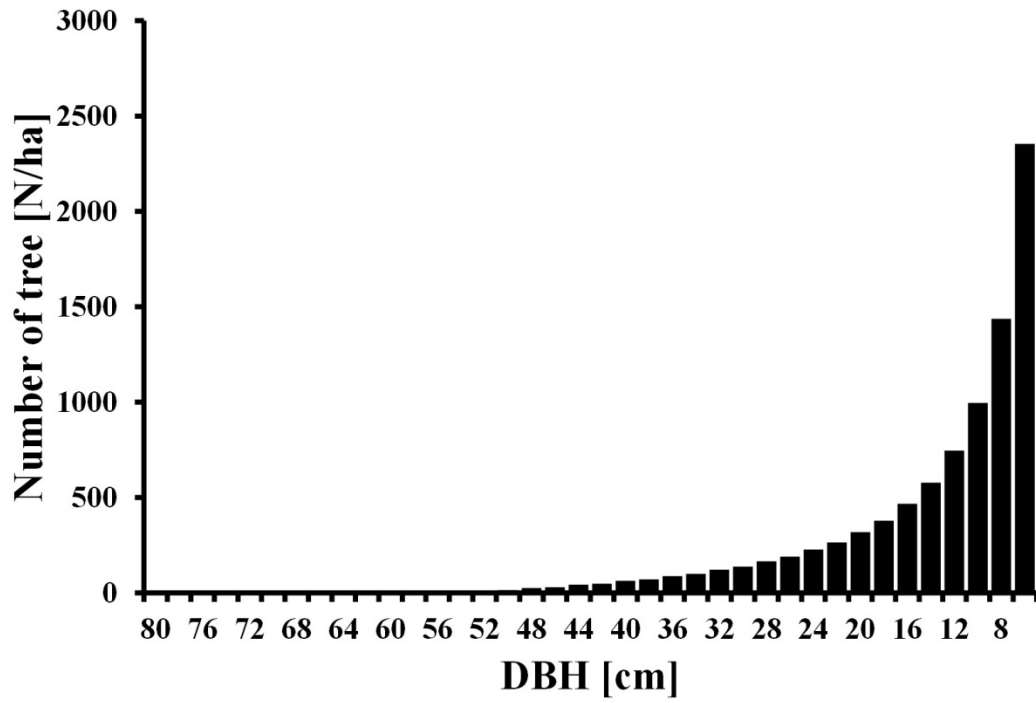
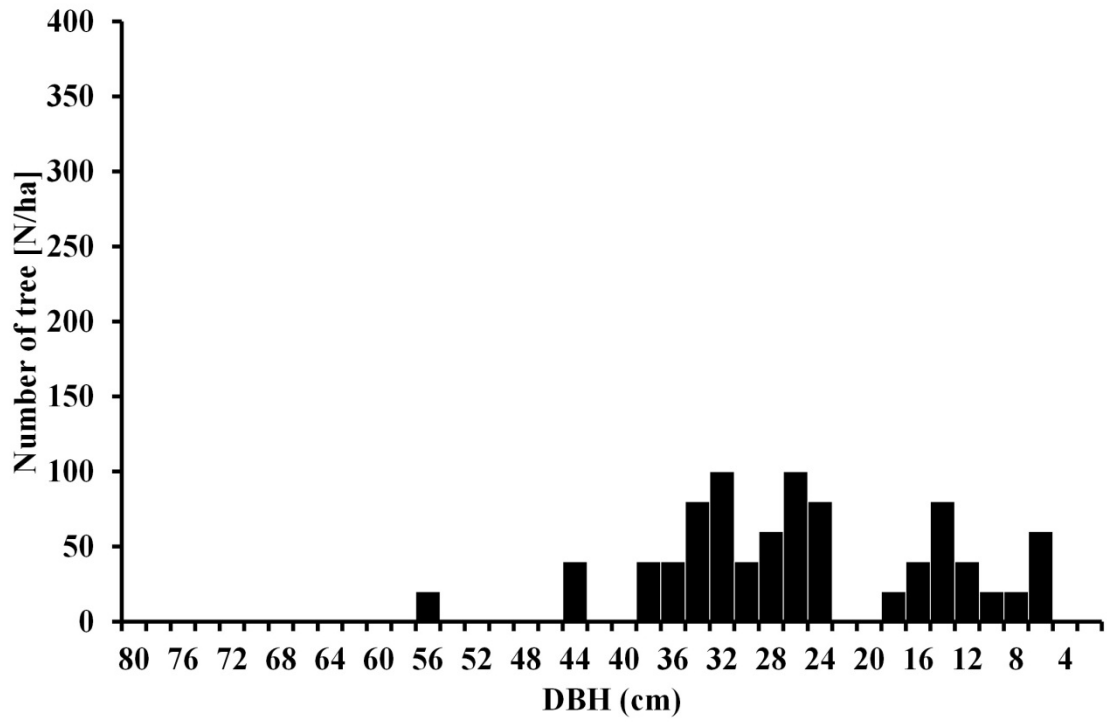
L-02



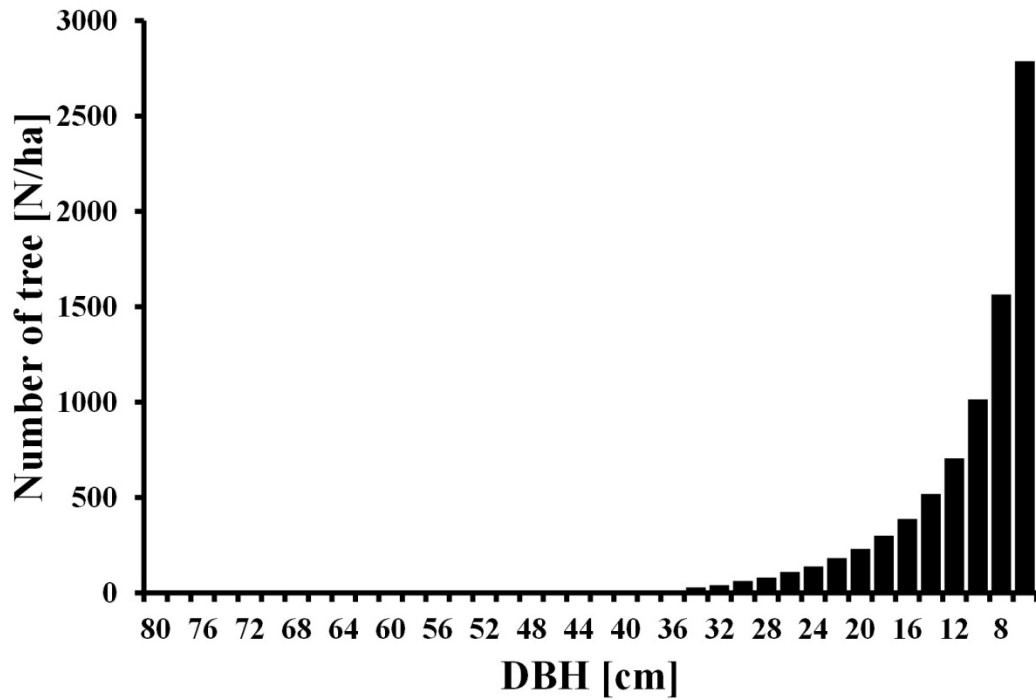
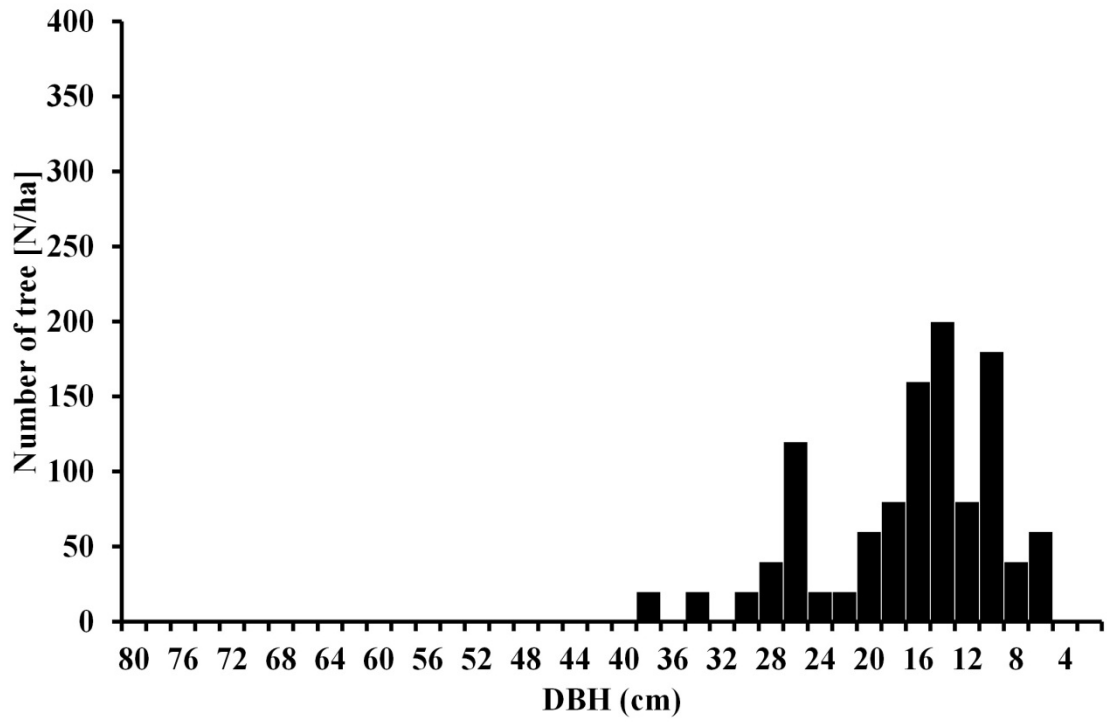
L-03



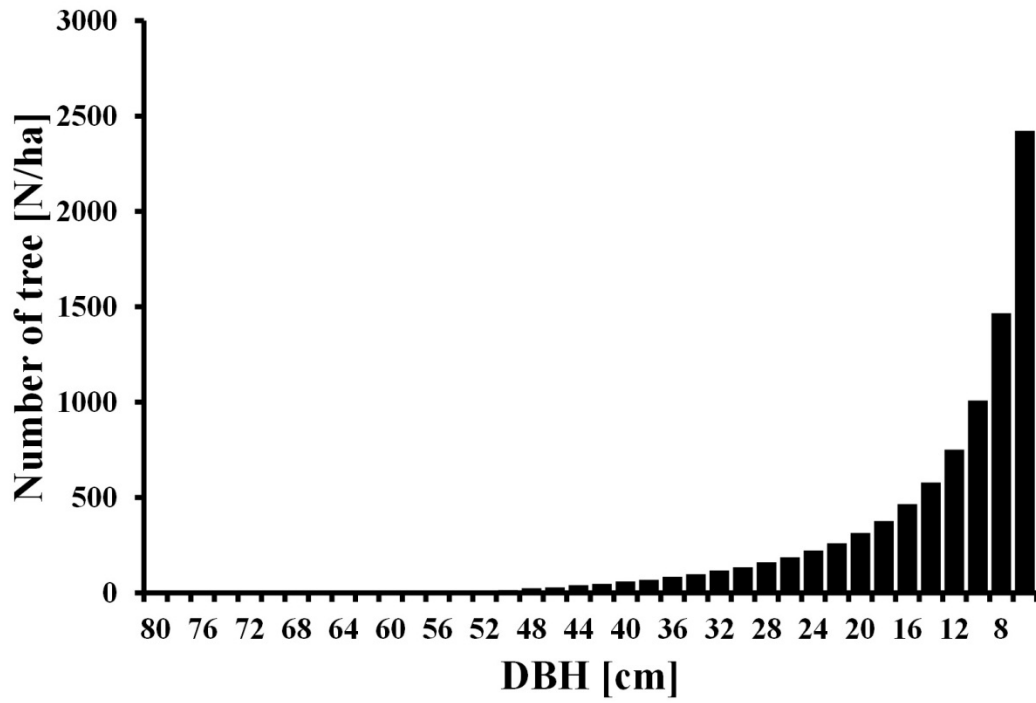
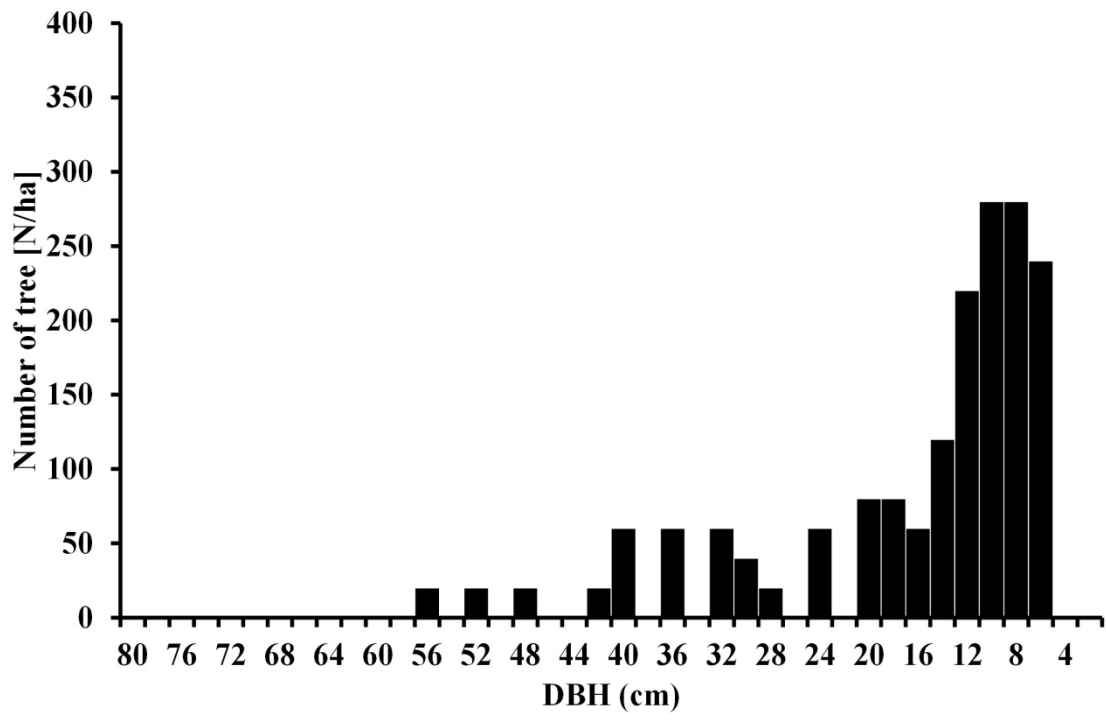
L-04



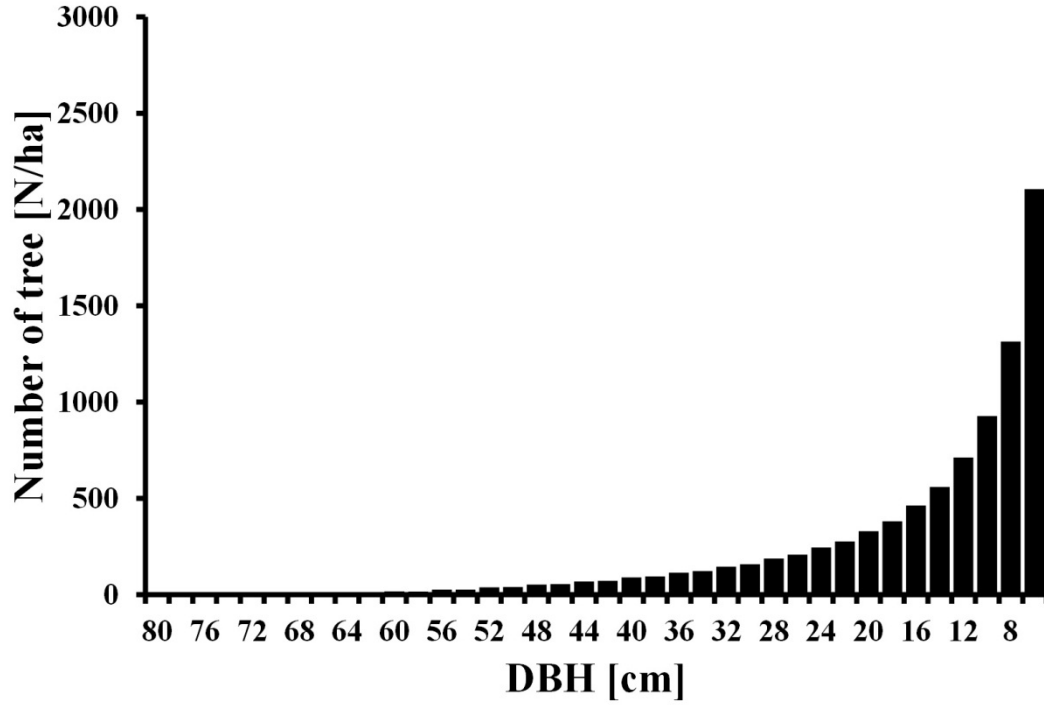
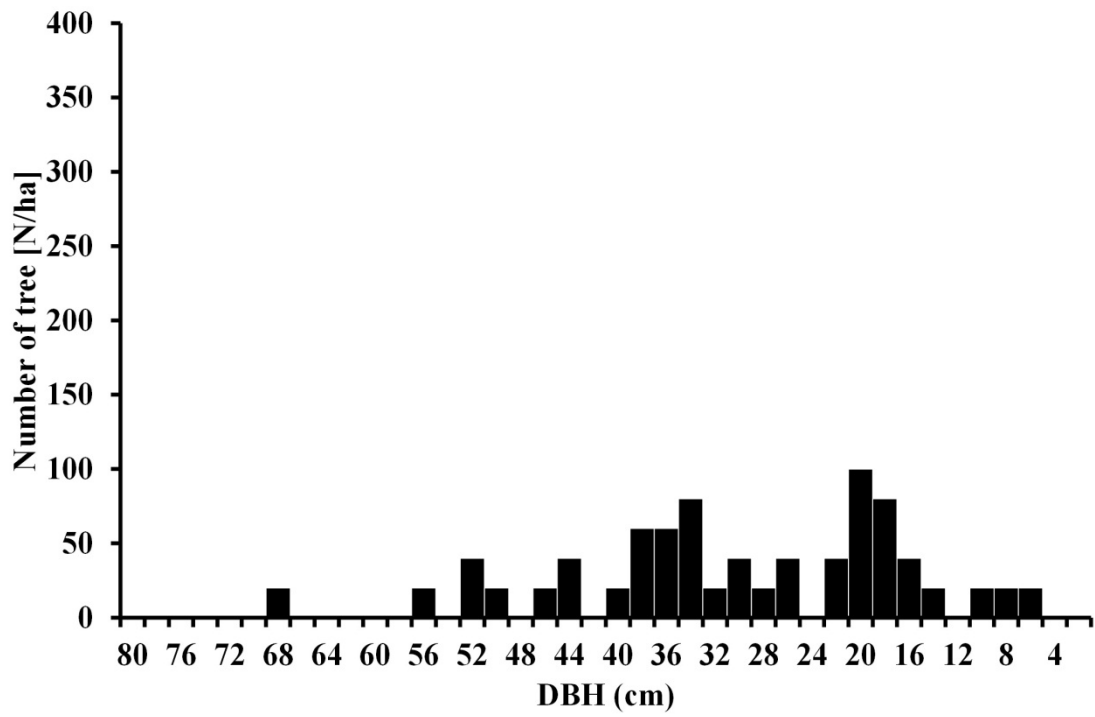
L-05



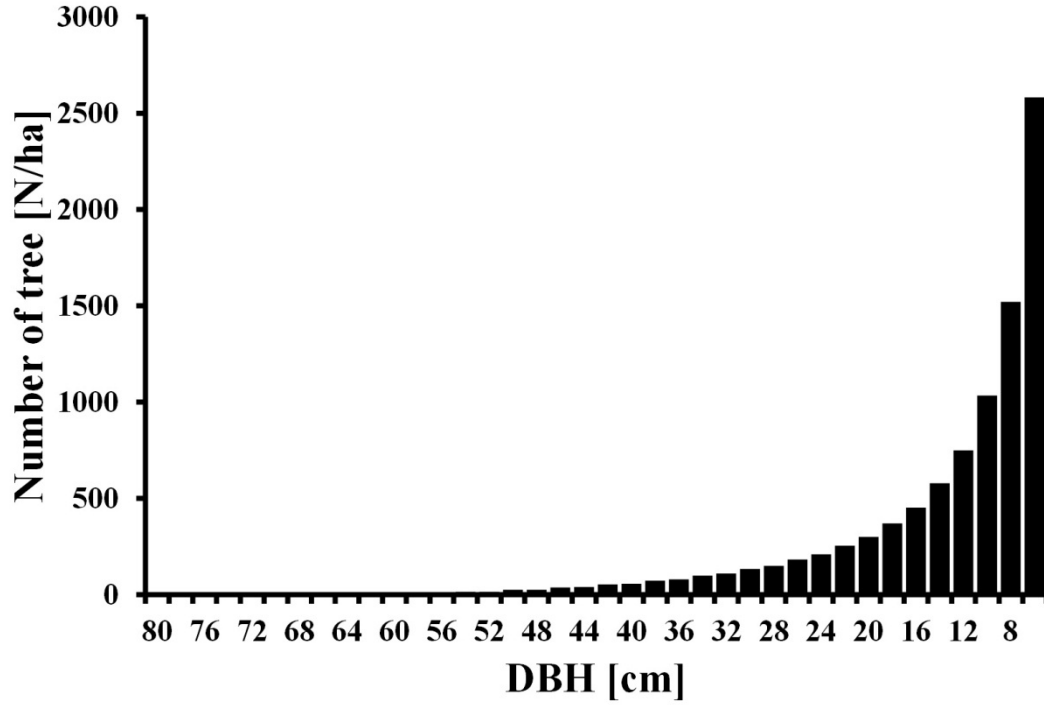
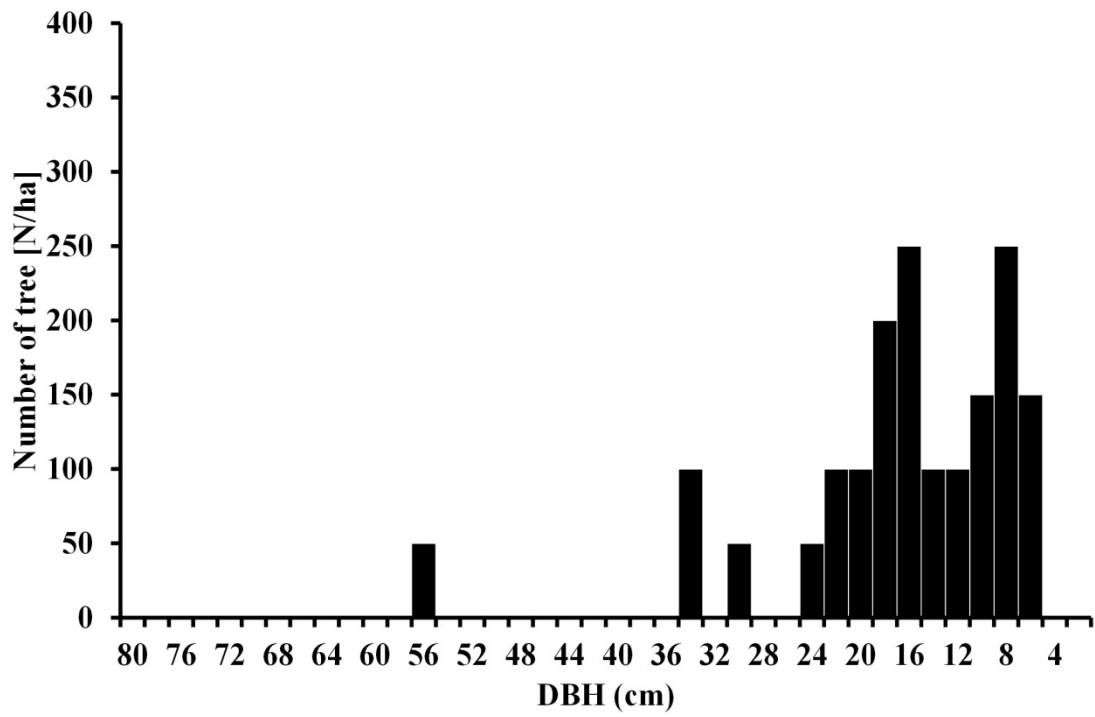
L-06



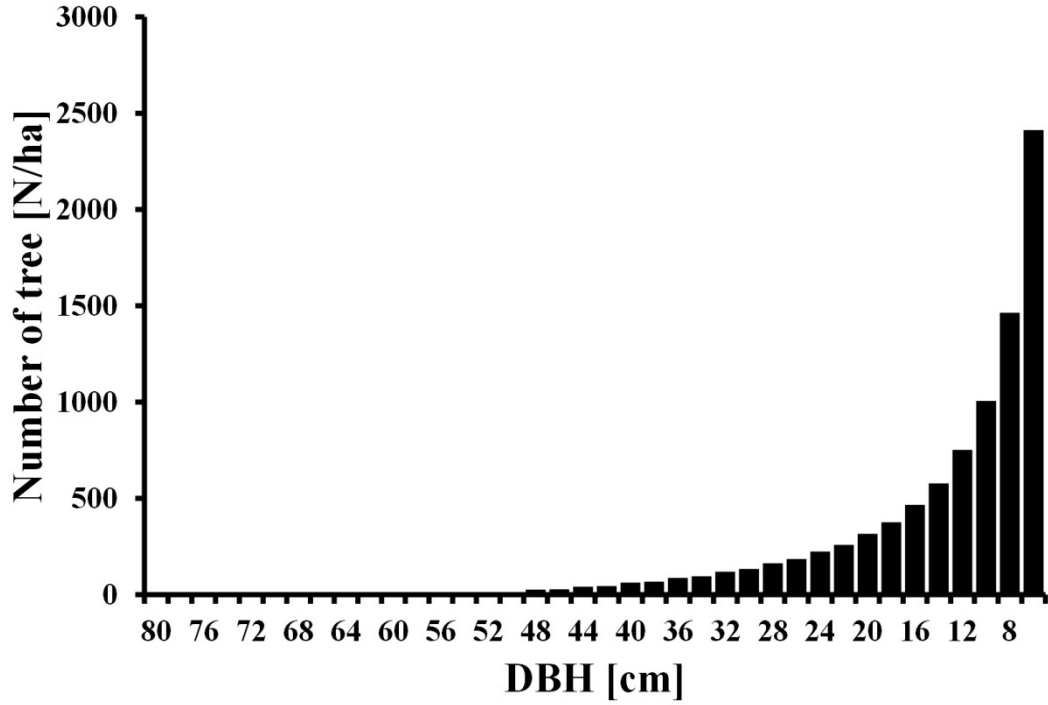
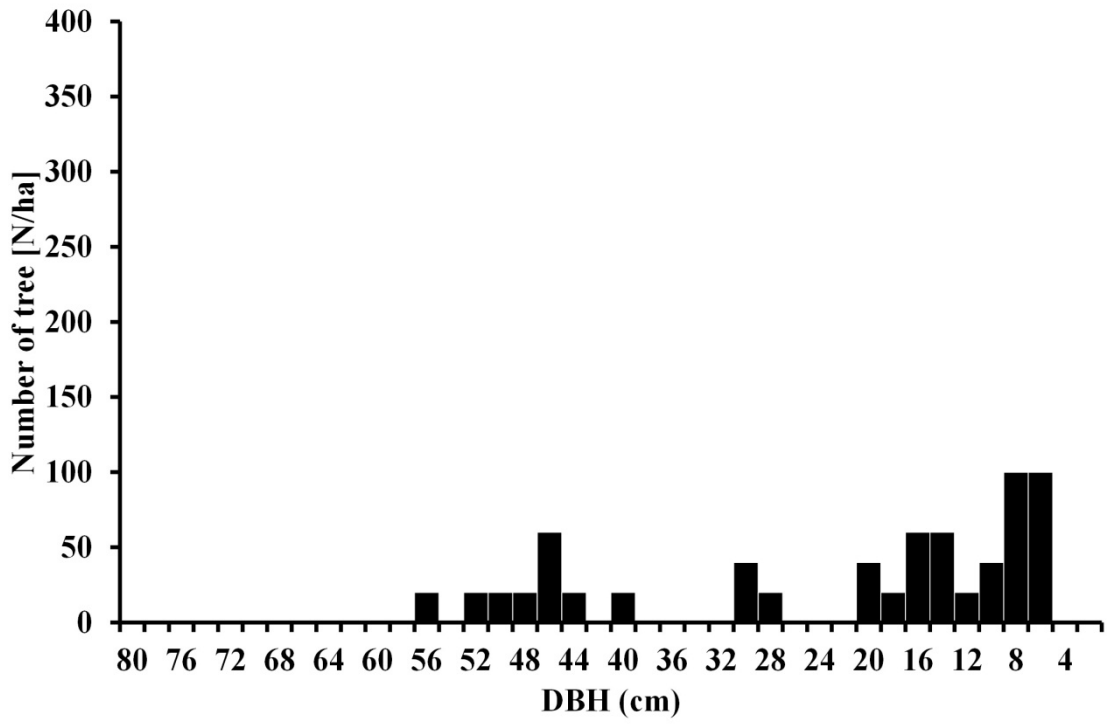
L-07



L-08



L-09



L-10

