

1. 研究論文

スギ高齢人工林を対象とした樹高と樹冠情報を用いた 直径成長の解析：三重大学附属平倉演習林の事例

加藤 亜里紗・唐澤 丈・吉井 達樹・沼本 晋也・松村 直人

三重大学生物資源学部・緑環境計画学研究室

Analysis of diameter growth using height and crown information in
old growth Sugi plantation forest :
Case study in Hirakura Experimental Forest, Mie University

KATO Arisa, KARASAWA Jou, YOSHII Tatsuki, NUMAMOTO Shinya
MATSUMURA Naoto*

Fac. of Bioresources, Mie Univ.

近年、森林経営に関して管理コストを低く抑えることができ、環境保全効果が高いとされる長伐期施業の導入が進んでいる。しかし、高齢林の成長は地域によって差があり、長期間継続して測定されているデータが不足しており、その実態が明らかでない。本研究では、三重大学附属平倉演習林において長期間継続調査された毎木調査のデータを用いて、単木の直径成長の解析を行った。8林班スギ林分では32年間、7林班藤堂スギ林分では43年間の成長率を目的変数とする一般化線形モデルを作成し、説明変数として8林班スギ林分では樹冠投影面積、樹高角モデルが有効であることが確認された。一方、地形条件の説明変数は直径成長への寄与は少なかった。また、藤堂スギ林分では有意な結果が得られなかった。

キーワード：スギ人工林, UAV, 直径成長モデル, 樹冠情報, 三重県

Abstract

In recent years, long-rotation forest management practices have been implemented, which are considered to be highly effective in environmental conservation while keeping management costs low. However, the growth rate of old-growth forests varies from region to region, and the actual situation is unclear due to a lack of long-term measurement data. In this study, we analyzed the diameter growth of individual trees using data from surveys conducted continuously over a long period of time in the Hirakura Experiment Forest of Mie University, and created a generalized linear model using the growth rate over 32 years in the sugi forest of Forest Compartment 8 and 43 years in the Todo Sugi forest of Forest Compartment 7 as objective variables. In Forest Compartment 8, the projected crown area and tree height angle models were confirmed to be effective as explanatory variables. Meanwhile, the explanatory variables of topographical conditions contributed little to diameter growth. The results were not significant in the Todo Sugi forest.

Keywords : Sugi plantation forest, UAV, diameter growth model, crown information, Mie Prefecture

I はじめに

日本の森林面積の4割を占める人工林の半数が一般的な主伐期である50年生を超え、本格的な利用期を迎えている(3)。しかし、木材価格の低下、高齢化による林業の担い手不足、小規模・分散的な所有構造、森林所有者の世代交代による所有者や境界の不明瞭化、所有者の森林への関心の低下といった理由から長伐期施業への移行を考える林業事業者が増えている。長伐期施業とは従来の40~50年で皆伐し、一斉造林する短伐期施業に、二倍ほどの伐期を目標に経営・管理する方法である(4)。長伐期施業は新植と育林にかかる回数が減り、生産費が安く上がる、間伐による収入が見込める、大径材を収穫できる、環境保全機能の保全効果が高いといった優れた要素がある(4)。しかし、長伐期施業では、立木の状態が長期間にわたるため、凍裂や病虫獣害の発生するリスクが高くなるといった欠点もある。また、高齢林データはサンプル数が不足しているため、各森林計画区における信頼性の高い成長予測が難しい。

高齢林の成長特性を分析した研究として、既存の研究の多くは収穫表の作成や成長経過の分析など、林分レベルの分析にとどまっている。宮本ら(2002)は個体レベルでの分析を行い、立木間の競合関係を考慮した研究を報告している。その中で、樹木の直径サイズは地形条件に影響を受けず、個体そのものが持つ遺伝的特性や個体自身のサイズが強い影響を与えているとし、隣接木との競争関係が成長量の変化に与える効果は個体自身のサイズによる影響と比べると小さいことを報告している(5)。

一方、近年のリモートセンシング技術の発展は目覚ましく、森林計測分野への応用がなされている。従来の森林計測の手法と異なり、航空レーザやUAV(Unmanned Aerial Vehicle)などを用いて森林上空から計測したデータをも

とに高精度な森林情報が取得されている(4)。計測手法が森林上空からの計測手法に転換していくに従って、得られる基本的な情報が正確な樹高値と立木位置になる。しかし、既存研究の多くは胸高直径をベースに成長理論が構築されているため、正確な樹高情報を基に成長予測を行うモデル作成はまだ多くの議論が残されている。

三重大学附属平倉演習林で継続的に森林資源調査が行われている。8林班スギ林分は林齢100年を超える高齢な林分であるが、直径成長は依然として継続している。高齢林では、個体サイズのばらつきが多く、成長の個体差が大きくなるため、適切な管理を行うためには個体レベルでの成長特性と要因への理解が必要である。しかし、高齢林の直径成長率を林分レベルでなく、単木レベルで検証した事例は少ない。

本研究では林齢105年を迎えた三重大学附属平倉演習林の継続調査林分である7林班ろ小班スギ林分の2020年、2009年、1999年、1989年、1977年の毎木調査のデータと8林班ろ小班スギ林分の2020年、2017年、2012年、2002年、1993年、1988年の毎木調査のデータを用いて直径成長の解析を行う。また、今後応用が進んでいく航空レーザとUAVによる計測手法をベースに解析を行う。

II 対象地概要・手法

1. 演習林の概要

三重大学附属平倉演習林は津市美杉町川上に位置する。標高440~1,200m、年平均気温約12.8℃、年平均降水量約2,815mmである。全域を通じて地勢は急峻で傾斜40度以上のところも少なくない。土壌は褐色森林土で、その大部分がB_D型土壌、すなわち適潤性褐色森林土かつ葡行土的性質を帯びている(1)。

2. 調査対象地の概要

調査対象地である7林班ろ小班に属する藤堂スギ林分は1810年（文化7年）植栽で、2021年現在211年生である（図1）。標高は444～504mに位置し、傾斜角は5.5～49.6度と平坦地から急傾斜地までの変化が大きい。調査対象地0.37haにおいて過去5回毎木調査が行われ、調査年は1977年（林齢168年）、1989年（同180年）、1999年（同190年）、2009年（同200年）、2020年（同210年）である。最終調査時の総本数は92本（うち2本はヒノキ）であった。台風被害による風倒・伐倒により、立木本数は年々減少している。また、もう一つの調査対象地である8林班ろ小班のスギ林分は1916年（大正5年）植栽で、2021年現在106年生である（図2）。標高は457～677m。傾斜は32.3～44.5度である。調査対象地0.15haにおいて過去9回毎木調査が行われ、調査年は1963年（林齢47年）、1968年（同52年）、1975年（同59年）、1988年（同72年）、1993年（同77年）、2002年（同86年）、2007年（同91年）、2012年（同96年）、2017年（同101年）、2020（同104年）である。最終調査時の総本数は39本であった。

表1は対象地である7林班ろ小班藤堂スギ林分と8林班スギ林分の概況である。

3. 毎木調査の測定方法

胸高直径測定について、7林班ろ小班藤堂スギ林分では、林齢168年に2cm括約の巻尺が、それ以降については直径巻尺が使用されている。樹高測定については、林齢168年に1m括約のワイゼ測高器（株式会社マイゾックス、日本）を、180年および190年にはブルーメライス測高器（Carl Leiss社、ドイツ）を、200、210年にはVertexⅢ（Haglof社、スウェーデン）が使用されている。40年にわたる継続調査のため、調査年によって測定者・測定器具が異なり、測定精度にも差があると考えられる。

また、8林班ろ小班スギ林分についても、胸高直径測定については直径巻尺が使用されている。樹高測定については、林齢72年、77年、86年にはブルーメライス測高器（Carl Leiss社、ドイツ）を、林齢91、96、101、104年にはVertexⅢ（Haglof社、スウェーデン）が使用されている。同林分についても32年にわたる継続調査のため、

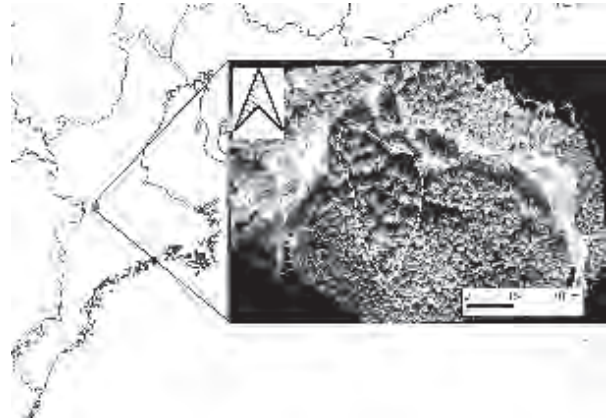


図1. 7林班ろ小班藤堂スギ林分のオルソ写真
（白線ポリゴンが解析対象とした林分）

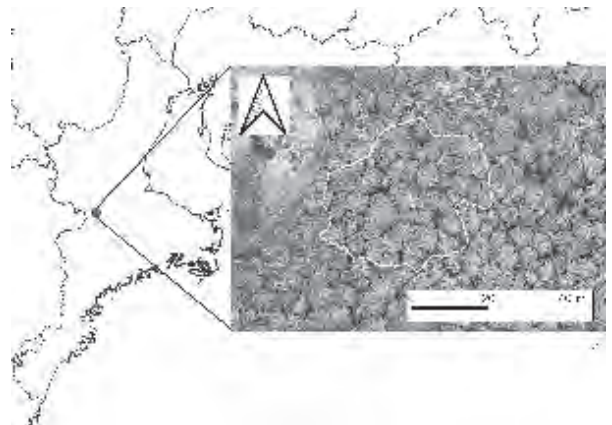


図2. 8林班スギ林分のオルソ写真
（白線ポリゴンが解析対象とした林分）

表1. 7林班ろ小班藤堂スギ林分と8林班ろ小班スギ林分の概況

	7林班	8林班
林齢	211年	106年
立木本数	90本(243本/ha)	39本(260本/ha)
平均直径	67.3cm	38.8cm
胸高断面積合計	85.3m ³ /ha	30.7m ³ /ha
平均樹高	30.2m	29.1m
林分材積	2609.2m ³ /ha	894.1m ³ /ha
傾斜	5.5°～49.6°	32.3°～44.5°
標準地面積	0.36ha	0.15ha

調査年によって測定者・測定器具が異なり、測定精度にも差があると考えられる。したがって、本研究では、成長量を算出する目的変数として、過去の計測値がより正確であると考えられる胸高直径を元に成長量を算出し解析を行った。また、自己回帰性を排除できるため、本研究では成長量ではなく、成長率を解析対象とする。

4. 解析方法

図3に解析のフローチャートを示す。胸高直径成長について、7林班ろ小班藤堂スギ林分では1977年の毎木調査の結果から最終測定時の2020年の毎木調査の結果を用いる。8林班ろ小班スギ林分では1988年の毎木調査の結果から最終測定時の2020年の毎木調査の結果を用いる。毎木調査の結果を線形回帰し、その傾きをそれぞれ43年間、32年間の成長率とする。

リモートセンシングデータから算出された説明変数を用いて、成長率を目的変数とする一般化線形モデル (GLM) を作成する。(式1)

表2. データの詳細

	7林班	8林班
航空レーザー	2013年9月に取得 (中日本航空4点/m ²)	2013年9月に取得 (中日本航空4点/m ²)
UAV	2020年3月に撮影 (Phantom4 Pro)	2021年1月に撮影 (Phantom4 Pro)

表3. 使用した説明変数のリスト

	7林班
個体サイズ	<ul style="list-style-type: none"> 樹高 樹冠投影面積
地形条件	<ul style="list-style-type: none"> 傾斜 TPI：凹凸度
競争指数	<ul style="list-style-type: none"> 樹冠幅比：樹冠幅最小/最大 樹冠歪み度：樹頂点と樹冠の重心の距離 平均距離：対象木から競争木までの平均距離 距離平方距離：対象木から競争木までの平均距離平方 相対幹距 樹高角モデル

$$Y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_p X_p + E \quad (1)$$

(Y:目的変数, β :回帰係数, X:線形予測子, E:切片)

7林班ろ小班藤堂スギ林分では、2013年9月に中日本航空によって取得された航空レーザーのデータから得られる数値標高モデル (DEM) と2020年3月にPhantom4 Proによって空撮されたドローンのデータから得られる数値表層モデル (DSM) を用いて樹冠高モデルを (CHM) 作成する。

8林班ろ小班スギ林分でも同様に、2013年9月に中日本航空によって取得された航空レーザーのデータから得られる数値標高モデル (DEM) と2021年1月にPhantom4 Proによって空撮されたドローンのデータから得られる数値表層モデル (DSM) を用いて樹冠高モデルを (CHM) 作成する。

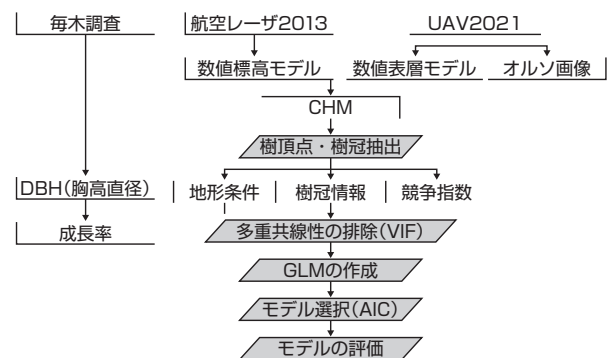


図3. 解析のフローチャート

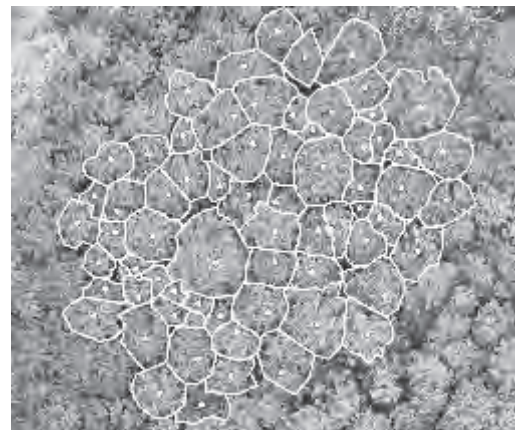


図4. 樹頂点や樹冠のポリゴン
(白色ポイントが樹頂点、白線が樹冠)

また、ドローンによる空撮画像からSfM (Structure from Motion) によってオルソ写真を作成する。樹頂点と樹冠のポリゴンはCHM・オルソ写真から目視判読によって作成する。説明変数には、地形条件のパラメータとして、傾斜、TPI (凹凸度)、個体サイズのパラメータとして、樹高、樹冠投影面積を用いる。競争指数のパラメータとして樹頂点とポリゴンの各頂点の長さの最大と最小の比である樹冠幅比、樹頂点と重心の距離である樹冠歪み度、対象木から競争木までの平均距離、対象木から競争木までの平均距離平方である距離平方距離、相対幹距比、樹高角モデルを用いる。樹高角モデルは対象木の梢端の水平面から競争木の梢端を見上げた時にできる角度の合計値とした(6)。

表2は使用したりモートセンシングデータの詳細である。

GLM解析に際して、対象とする10個の説明変数についてVIF (分散拡大要因) による多重

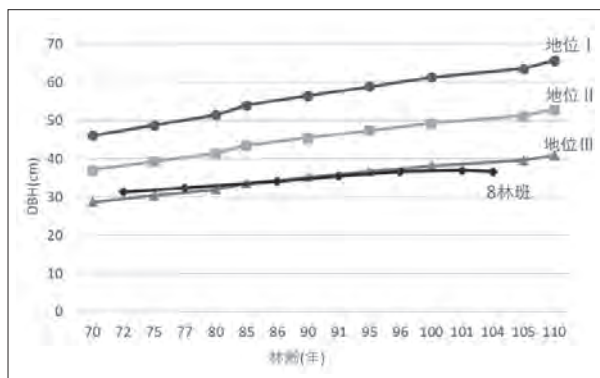


図5. 胸高直径推移 (島田2010により作成)

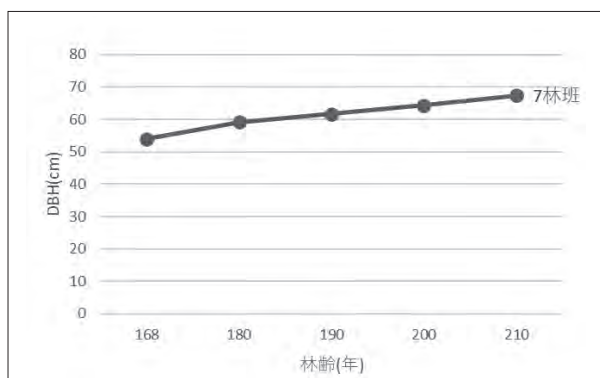


図6. 7林班藤堂スギ林分胸高直径推移

共線性の排除を行う。ここでは、VIFが10以上になるものを排除し、排除されなかった説明変数を使用する。成長率を目的変数とした一般化線形モデルのリンク関数は対数関数、成長率は一般的に負の値を取らないことを考慮し、ガンマ分布を用いる。

モデル選択はステップワイズ法により、AIC (赤池情報量基準) を用いて行い、AICが最小のものをベストモデルとして選択し、評価を行う。

III 結果と考察

1. 胸高直径成長率の特性

三重県のスギ人工林の地位別胸高直径の推移と7林班ろ小班藤堂スギ林分、8林班ろ小班スギ林分の胸高直径成長を図5に示した。7林班ろ小班藤堂スギ林分の直径成長も同様に図6に示した。

7林班ろ小班藤堂スギ林分の成長率の平均値は0.28cm/年であった。最小値は0.011cm/年、最大値は0.67cm/年であった。また、8林班ろ小班スギ林分の成長率の平均値は0.27cm/年であった。最小値は0.032cm/年、最大値は0.76cm/年であった。三重県の長伐期林の成長率は地位Iでは0.50cm/年、地位IIでは0.40cm/年、地位IIIでは0.31cm/年であった。

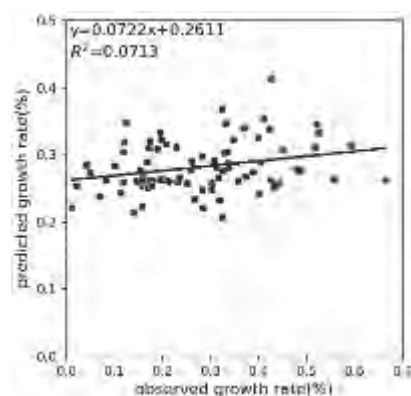


図7. 7林班ろ小班藤堂スギ林分での予測値と実測値の散布図

2. ベストモデルの精度評価

7林班ろ小班藤堂スギ林分ではAICが最小となるベストモデルとして

$$\begin{aligned} \log(G) = & 0.1309Distortion \\ & - 0.1541TPI \\ & - 1.3895 \end{aligned}$$

(G：成長率, Distortion:樹冠歪み度, TPI：凹凸度) が選択された。

図7は実測値とベストモデルの式から得られた散布図である。調整済み決定係数は0.071であった。

7林班ろ小班藤堂スギ林分から得られたベストモデルは決定係数が非常に低く、有効な結果が得られなかった。

8林班ろ小班スギ林分ではAICが最小となるベストモデルとして

$$\begin{aligned} \log(G) = & 0.0318CA - 0.0050H_ang \\ & - 1.7267 \end{aligned}$$

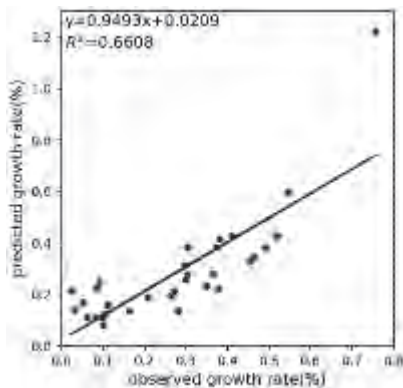


図8. 8林班ろ小班での予測値と実測値の散布図

(G：成長率, CA：樹冠投影面積, H_ang：樹高角モデル) が選択された。

図8は実測値とベストモデルの式から得られた散布図である。調整済み決定係数は0.66であった。

ベストモデルに選択された説明変数は樹冠投影面積と樹高角モデルであった。樹冠サイズの説明変数である樹冠投影面積の係数は正の数である。このことから、高齢林においても水平方向の樹冠の成長が可能であれば、胸高直径の成長に寄与し続けることが明らかとなった。競争指数である樹高角モデルは対象木が周りの競争木からどれだけ被圧されているかを示す説明変数である。この説明変数は値が大きいほど、周りの競争木からより強く被圧されている。

係数がマイナスであったため、周りから被圧されている競争に弱い個体の胸高直径は成長しないことが明らかとなった。また、ベストモデル

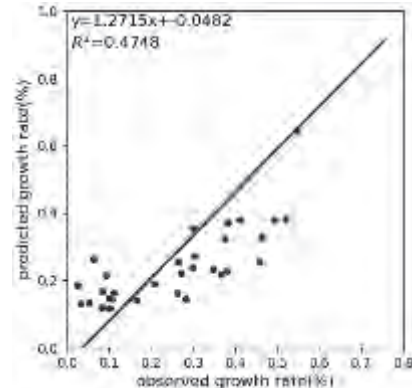


図10. 樹冠投影面積のみが選択されたモデルの予測値と実測値の散布図

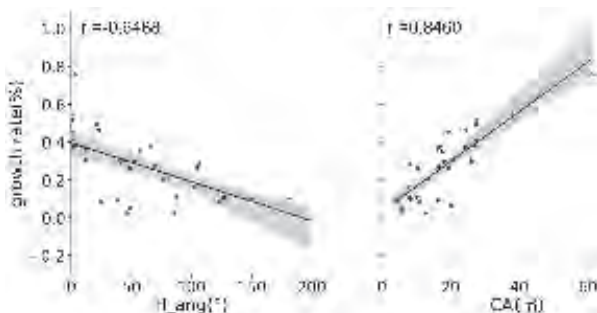


図9. 目的変数と選択された説明変数の散布図 (growth rate(%)：成長率, H_ang(°)：樹高角モデル, CA：樹冠投影面積)

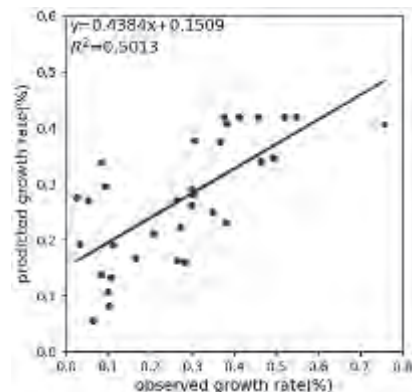


図11. 樹高角モデルのみが選択されたモデルの予測値と実測値の散布図

ルには地形条件からの説明変数が選択されておらず、本研究では同一林分内での個体レベルの微地形の影響は考慮されないことが分かった。

図9は目的変数と選択された説明変数の散布図である。成長率と樹高角モデルの相関係数は-0.6488で負の相関があること、成長率と樹冠投影面積の相関係数は0.8460で強い正の相関があることが明らかとなった。

3. 先行研究との比較

次に、有効な相関係数が得られた7林班ろ小班スギ林分での結果と先行研究との比較を行った。

宮本らは樹木の直径サイズは地形条件に影響を受けないと報告している。本研究でも、地形条件に関する説明変数である傾斜角やTPIは選択されなかった。このことから、同一林分内の個体レベルでの微地形の影響は考慮されないことが明らかとなった。

また、宮本らは個体そのものが持つ遺伝的特性や個体自身のサイズが強い影響を与えているとし、隣接木との競接木との競争関係が成長量

の変化に与える効果は個体自身のサイズによる影響と比べると小さいことを報告している。本研究では、個体サイズの説明変数である樹冠投影面積に加え、競争指数である樹高角モデルが選択されている。選択される説明変数が樹冠投影面積のみのモデル、樹高角モデルのみのモデルを作成した。図10は樹高角モデルのみが選択されたモデルの予測値と実測値の散布図である。樹高角モデルのみが選択されるモデルでは、調整済み決定係数は0.50であった。図11は樹冠投影面積のみが選択されたモデルの予測値と実測値の散布図である。樹冠投影面積のみが選択されるモデルでは、調整済み決定係数は0.47であった。表3は使用した説明変数のベストモデルへの寄与率をまとめたものである。

宮本らの研究と本研究の相違点が2つある。まず、宮本らの研究では樹木の成長量を比較しているが、成長に与える外部の環境の要因を個体レベルで考察するのであれば、成長率の方が自己回帰性を排除して考えることができるため、本研究では1988年から2020年の成長率を目的変数としている。また、宮本らは林齢14年生以上の林分を対象としているが、本研究では林齢100年を超える高齢な林分を対象としている。

表3. 使用した説明変数のベストモデルへの寄与率

個体サイズ	◎
地形条件	×
競争指数	◎

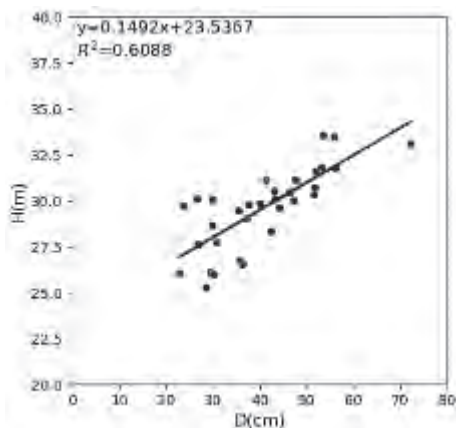


図12. 樹高と胸高直径の散布図
(2020年の毎木調査)

4. 樹高成長と胸高直径成長の関係性

一般的に樹高と胸高直径はアロメトリーな関係性が成立する。しかし、本研究では定式化可能な範囲で関係性が観察されなかったため、樹高は説明変数に選択されなかった。図12は2020年の8林班の毎木調査の結果から作成した樹高と胸高直径の散布図である

樹高はリモートセンシングから得られる普遍的な樹木のパラメータだが、高齢林の分析において、樹高の情報だけでは単木レベルの状態を把握するには不十分な可能性が高いことが明らかとなった。このことから、高齢林の胸高直径の成長には個体サイズの情報だけでなく、競争

関係の情報も必要であることが判明した。

V まとめ

航空レーザのデータやドローンの空撮画像を利用して作成した樹頂点や樹冠のポリゴンから算出された説明変数を用いて、211年生と106年生のスギ林分の胸高直径の成長率を目的変数とする一般化線形モデルを作成した。

211年生の藤堂スギ林分の結果から得られたベストモデルは決定係数が非常に低く、有効な結果が得られなかった。106年生のスギ林分でもベストモデルに選択された説明変数は樹冠投影面積と樹高角モデルであった。このことから、100年を超える高齢林の直径成長には樹冠サイズと周りの木との競争関係が影響していることが判明した。また、地形条件の説明変数は選択されなかったことから、高齢林の胸高直径の成長には同一林分内の個体レベルの微地形の影響はあまり考慮されないことが判明した。

このため、高齢林でも胸高直径の成長を促すためには、周りに空間を確保する必要がある、適度な伐採が必要であることも明らかとなった。また、長伐期施業では材価の高い大径材の生産によって収益性を上げることができ、間伐材も大径材であるため高値で取引される可能性がある。このため、長伐期施業は適切な伐採を行うことで短伐期や通常伐期の施業よりも高い収益を見込むことが期待できる。

謝 辞

7林班ろ小班藤堂スギ林分、8林班ろ小班スギ林分の継続調査については、演習林の教職員はじめ、多数の方々のご協力・ご厚意を賜っています。調査に協力していただいた演習林の技術職員の上尾智洋、山本拓史、宮崎 豊、上尾京子、新田昌臣らの各氏、緑環境計画学研究室

の学生諸氏に改めて感謝申し上げます。

引用文献

- (1) 松村直人・加藤亜里紗・唐澤丈・吉井達樹 (2022) 平倉演習林藤堂スギ林分の定期測定資料 (林齢168年～210年) 三重大学フィールド研究・技術年報19: 13-17
- (2) 唐澤丈・吉井達樹・沼本晋也・松村直人 (2020) 210年生スギ人工林の成長解析: 三重大学附属平倉演習林藤堂スギ林分の事例. 中森研9: 63-66
- (3) 林野庁 (2020) 森林・林業白書. 全国林業改良普及協会. 84
- (4) 桜井尚武 (2002) 長伐期林とは何か (桜井尚武編著 長伐期林の実際. 林業科学技術振興所). 5-10
- (5) 宮本麻子・天野正博 (2002) 立木の空間分布および生育条件が個体成長に及ぼす影響. 森林総合研究所研究報告: 第1号163-178
- (6) C. S. Lo and C. Lin (2013) Growth-competition-based stem diameter and volume modeling for tree-level forest inventory using airborne LiDAR data. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 51(4): 2216-2226. doi: 10.1109/TGRS.2012.2211023.
- (7) 島田博匡 (2010) 三重県のスギ・ヒノキ人工林における長伐期施業に対応した林分収穫表の作成. 三重県林業研究所報告: 第2号17-22