

TLS 点群データを用いた 3D 樹木モデルの
構築と応用

Application of 3D Tree Modeling Using Point Cloud Data by
Terrestrial Laser Scanner

2020 年 3 月 20 日

熊崎 理仁

KUMAZAKI, Rihito

目次

第 1 章 序論	4
1.1 研究背景.....	4
1.2 研究目的.....	5
1.3 研究方法.....	5
1.4 TLS を利用した日本庭園における既往研究.....	6
1.4.1 TLS を利用した日本庭園での景観シミュレーション.....	6
1.4.2 TLS を利用した日本庭園の図化に向けた調査・計画.....	7
1.5 研究の特色と論文構成.....	7
第 2 章 樹木に対する 3 次元計測手法の整理	10
2.1 概説.....	10
2.2 トータルステーション (TS).....	10
2.3 写真測量.....	10
2.4 レーザ計測.....	11
2.4.1 航空レーザ測量 (ALS : Airborne Laser Scanner).....	11
2.4.2 車載写真レーザ測量 (MMS : Mobile Mapping System).....	12
2.4.3 バックパック型レーザスキャナ.....	12
2.4.4 地上型 3D レーザスキャナ (TLS).....	13
第 3 章 日本庭園を対象とした 3D 樹木モデルの構築	14
3.1 概説.....	14
3.2 日本庭園調査で使用した TLS の仕様.....	14
3.3 TLS による計測可能な樹高の検証.....	17
3.3.1 計測可能な樹高の検証結果.....	17
3.3.2 本研究で対象とする日本庭園.....	18
3.3.3 清澄庭園の概要.....	19
3.4 清澄庭園における計測.....	22
3.4.1 清澄庭園でのデータ取得.....	23
3.4.2 取得データの合成.....	25
3.5 TLS-QSM 法による 3D 樹木モデルの構築.....	26
3.5.1 TLS-QSM 法の処理条件.....	27
3.5.2 偏差 (Deviation) による分離処理.....	28

3.5.3	反射率 (Reflectance) による分離処理	31
3.5.4	セグメンテーション処理	51
3.5.5	Statistical Outlier Removal・Moving Least Square Smoothing によるノイズ処理	53
3.5.6	TreeQSM による処理および処理結果	55
3.6	小結	64

第4章 原爆被爆樹木への応用 65

4.1	概説	65
4.2	被爆樹木の計測調査で使用した TLS の仕様	65
4.3	TLS による被爆樹木計測の背景	68
4.4	TLS による被爆樹木計測の目的	69
4.4.1	計測対象とする被爆樹木の特有樹形	70
4.4.2	被爆樹木の 3D 樹木モデルの構築手法	71
4.5	3D 樹木モデルの構築	72
4.5.1	TLS による被爆樹木の計測	73
4.5.2	手動による葉点群の削除	77
4.5.3	TreeQSM による処理	78
4.5.4	根元から主幹下部の抽出とメッシュ化処理	79
4.5.5	両モデル (QSM、3D メッシュモデル) の合成と補正	80
4.5.6	3D プリンタによる出力	82
4.6	被爆樹木の傾斜算出への応用	84
4.6.1	従来の傾斜の算出方法と問題	84
4.6.2	TLS-QSM 法を用いた傾斜と傾斜方位の算出方法	86
4.6.3	算出結果	88
4.7	小結	90

第5章 樹木点群および 3D 樹木モデルの精度検証 91

5.1	概説	91
5.2	TLS にて取得される樹木点群の精度検証	92
5.2.1	精度検証の手法	92
5.2.2	精度検証の結果	94
5.2.3	精度結果の特徴と分析	95
5.3	TLS-QSM 法にて構築される 3D 樹木モデルの精度検証	97
5.3.1	精度検証の手法	98
5.3.2	樹木全体での精度検証の結果	99

5.3.3	枝部に対しての精度検証の結果.....	100
5.3.4	樹高 12-17m 地点での精度検証の結果.....	101
5.4	精度の考察.....	102
5.4.1	TLS にて取得される樹木点群の精度検証.....	102
5.4.2	TLS-QSM 法にて構築される 3D 樹木モデルの精度検証.....	102
第 6 章	終章.....	103
6.1	本研究の成果.....	103
6.1.1	日本庭園の保存と復元に向けた保存手法としての重要性.....	103
6.1.2	原爆被爆樹木の 3D 樹木モデルの意義と重要性.....	104
6.2	本研究の成果から予測される学術的発展性.....	105
6.2.1	3D 樹木モデルがもたらす造園業界への生産性の向上.....	105
6.2.2	3DCD 分野における 3D 樹木モデルがもたらす発展性.....	106
6.3	総括.....	107
	謝辞.....	108
	参考文献.....	111
	要旨.....	120
	SUMMARY.....	128

第1章 序論

1.1 研究背景

日本庭園をはじめとする造園空間には様々な空間構成要素が存在する。それらの中でも庭園樹木は環境的および景観的な側面からも必要不可欠な要素であり、多くの意匠等を有する重要な要素として扱われるが、調査研究において樹形情報の正確な記録の試みは少ない。庭園樹木は、街路樹や公園樹木などの造園空間の樹木とは異なり、観賞上の価値としての重要性があることから¹⁾²⁾³⁾、庭園樹木に対して樹形を正確に記録しておくことで、後世への継承の手段になると考えられる。しかしながら、これまで原始古代から近代に至るまでの庭園植栽について、その復元を試みた既往研究は多く存在するが、図面資料や画像資料、文献調査、絵巻による植栽描写などの考察⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾によるもので、当時の樹形を記録した資料は存在しない。このことから、過去の日本庭園の植栽による景観への復元は、正確な樹形情報がないため、他の記録等から可能な限りの復元を考察している。その事例として、阪上⁸⁾らによる名勝無鄰菴庭園の事例では、施主である山縣有朋の作庭当時の構想を読み解いた、外縁部の樹木の修復剪定による維持管理を提案することで、当時の植栽景観の復元を試みている。

日本庭園では、庭園の保存と復元を目的とした測量手段として、長らく平板測量が活用されていた。平板測量による庭園調査の歴史は古く、その発端となったのが、1919（大正 8）年に史蹟名勝天然紀念物保存法⁹⁾¹⁰⁾が施行されたことである。本法は、価値のある庭園を名勝として指定し、保存・修理するという明確な目的を法定化したものであり、庭園の調査研究は文化史研究のみならず、地割や意匠の実施調査による研究の重要性を持つようになった。これに伴い、当時東京帝国大学農科大学教授であった原熙によって、1923（大正 12）年 8 月に測量および製図がおこなわれた鹿苑寺庭園平面図を含む、およそ 60 庭園の調査がおこなわれた¹¹⁾¹²⁾。また、その後の 1934（昭和 9）年 9 月 21 日に京阪神を中心とした室戸台風による甚大な被害によって、京都の名だたる庭園の高木や建物が被害を受け、復旧を余儀なくされたことも、庭園での平板測量による測量調査が普及する契機となった¹¹⁾¹⁴⁾。さらに、1939 年（昭和 14 年）に作庭家で庭園史家の重森三玲により『日本庭園史図鑑』全 26 巻が刊行され、日本各地に所存する約 350 の庭園の実測図を掲載したことで、現在でも当時の庭園を窺い知ることのできる、貴重な資料として利用されている¹¹⁾¹³⁾。それ以降、歴史的庭園での保存・復元を目的とした記録の測量手法として、アリダードを用いた平板測量が長らく用いられることとなる。

以上の日本庭園における測量記録の歴史を踏まえても、実測による記録は日本庭園の文化的価値の重要性から、その必要性は高い。しかしながら、これまで用いられてきた平板測量の原理は、アリダードによって対象に視準を合わせ、視準線に沿った対象物との距離をプロットするものである¹⁵⁾。そのため、樹木計測で情報として記録できるのが、平面上における樹木の位置のみであり、樹木情報の記録は極めて限定的なものである。このことから、平

板測量による記録を基にした庭園植栽の復元をおこなった場合、当時の庭木の位置は特定可能であるが、樹形までは困難である。このような背景から、日本庭園の植栽の復元において詳細な樹形までを記録するための、有効な測量手法を検討する必要があると考えられる。

1.2 研究目的

本研究では、樹形に対して正確な情報を残す手段として、情報通信技術(ICT: Information and Communication Technology)¹⁶⁾の利用が有効であると考えた。特に、ICTの1つであるレーザ計測技術は、パルス発振動作(Pulsed Operation)によって出力される近赤外線レーザを、毎秒数千点 - 数十万点で対象に掃射(パルスレーザ)し、対象の表面にレーザが到達することで生じる反射波をレーザが捉えることによって、反射位置の3次元座標を連続的に得ることができる¹⁷⁾¹⁸⁾。これにより、空間を膨大な数の3次元座標の集合体(点群データ)として即時に取得することができる。このことから、庭園樹木に対しても樹形情報を非接触で効率的かつ高精度で3次元情報として取得することができるため、記録に向けた有効な手段と成り得ると考えられる。

さらに、広島市・長崎市に存在する原爆被爆樹木(以下、被爆樹木)に対しても、記録へ向けた検討が必要である。被爆樹木とは、広義には原爆にさらされたすべての樹木であり、原爆の記憶を今に伝えるものの中で「生きた」被爆遺産として、文化的価値を有する樹木としての保存への意識が高まっている。しかしながら、被爆樹木が存在する広島市には2018年8月現在、爆心地から約2km以内に161本の被爆樹木が登録されているが、うち民間の23施設・団体が守る被爆樹木58本のうちの24%(14本)に、老木化や病気による枯死の恐れが出ている¹⁹⁾。そのため、早急に現在の樹形を正確に記録する必要性が高い。

このことから、本研究では地上型3Dレーザスキャナ(Terrestrial Laser Scanner 以下、TLS)を用いた樹形情報の取得に焦点を当て、以下に示す2手法によって、TLSによる樹形情報の取得の有効性を示す。まず、1つ目の手法として、TLSにて日本庭園全体の計測を実施し、取得データの中でも樹木を構成する点群データ(以下、樹木点群)から機能的な利用と解析が可能となることから、日本庭園でのTLSを用いた計測が十分な樹形情報を取得できる手法であることを示す。2つ目の手法として、文化的価値を有する樹木として被爆樹木を対象の事例とし、TLSによる樹形情報の取得によって、保全へ向けた重要な記録として残していく手段となることを示す。

1.3 研究方法

既往研究にて、樹木に対してレーザ計測技術を用いた解析事例は少なく、その中でも、単木の樹形を詳細に把握する手段を考察した研究事例はさらに少ない。その理由の一つとして、土木分野での都市空間での計測による既往研究では、樹木点群が取得データの中でも不要なものとして扱われていることが多かったため²⁰⁾樹木点群に対しての解析は不十分となっていた。すなわち、土木分野での樹木点群への解析事例としては、効率的な削除をおこな

うための研究に焦点が当てられることが多い。また近年、森林に対してのレーザ計測技術の導入は進んでいるが、これらの事例の多くは、航空レーザ計測による広範囲にわたる森林資源情報や森林構造の把握であり²¹⁾²²⁾²³⁾、単木単位の樹形を詳細に記録し解析する手段としては利用されていない。

樹木点群を用いた樹形解析が行われてこなかった最大の理由として、樹木は幾何学的形状が複雑であるため、処理をおこなう上で障害が大きかったことが挙げられる²⁴⁾²⁵⁾²⁶⁾。このことから、樹木点群から、幹・枝などの特定部位の抽出による樹形を把握するための処理および可視化など、必要とされる樹木情報の取得が困難となっていた。一方で、土木分野でのレーザ計測器機を用いて行われる舗装点検や橋梁点検では、取得データによる解析対象の形状が平面である。そのため、幾何学的に単純であるため、3Dモデル化による処理と解析に対して障害が少ないことから、実用的な処理の検討が数多く存在する²⁷⁾²⁸⁾。

以上のことから、本研究では樹木点群の解析手法を検討する中でも、樹木点群から高い樹形再現性を持つ3D樹木モデルを構築する手法を提案する。さらに、3D樹木モデルの構築については、日本庭園などの多数の樹木を用いる場では樹種の特徴と自然な多様性を兼ね備えた樹形の生成が必要とされている²⁹⁾。このことから、樹木が持つ固有の樹形までを復元することに焦点を当て、日本庭園における庭園樹木および被爆樹木の3D樹木モデルの重要性を考察することとした。

1.4 TLS を利用した日本庭園における既往研究

TLSを用いた日本庭園での計測事例の多くは、景観シミュレーションや現況平面図作成への支援にTLSを用いたものである。このような事例が多い理由として、日本庭園が持つ文化的側面からなる空間的特質が関わっている。特に日本庭園の形式の中でも、回遊式庭園は、その園内に存在する視点場や、回遊性により移り変わる障り木の演出によって多様な景観（シークエンス景観）が楽しめるように作庭されている³⁰⁾³¹⁾³²⁾。また日本庭園の景観は、作庭者により意図的かつ操作的に作られたものであり³³⁾³⁴⁾、伝統的技法における庭園構成要素の配置が景観に大きな影響を与えている³⁵⁾。これらの背景から、日本庭園の景観はヒューマン・スケールやシークエンス、実測調査による庭園構造の把握など、多様な視点からの研究が行われており、TLSにて取得されたデータの利用に関しても、新たな日本庭園の景観解析による手段として有用な側面があると考えられる³⁶⁾。

以下に、TLSによる日本庭園の景観シミュレーションに関する研究事例(1.2.1)と日本庭園の保存に向けた調査・計画(1.2.2)への利用について述べることとする。

1.4.1 TLS を利用した日本庭園での景観シミュレーション

日本庭園でのTLSの利用は、取得される正確な3次元データに基づいた庭園空間の客観的な景観検討手段として用いられている。國井ら³⁷⁾による検討では旧齋藤家別邸（新潟市）敷地内にて、園内に存在する来訪者が足を止めやすい視点場から、視対象への景観把握の応

用をおこない、景観に配慮した庭園管理への検討をおこなった。また、早瀬ら³⁸⁾による研究では、清風荘庭園（京都市）にて、本来、植治による庭園の特徴である京都東山の借景が、樹木の生長によって視認することが不可能になっていることに着目し、借景復元を目的とした植栽管理における景観シミュレーションを、TLS による計測データよりおこなった。さらに、守村ら³⁹⁾による研究では、公園・庭園での樹木が持つ景観要素の重要性に着目し、TLS によって取得された 3 次元データを利用し、タブレット端末を用いた景観シミュレーションのシステムを開発することで、樹木の成長時や伐採、切り下げ時の景観シミュレーションを現場で行い、樹木管理に役立てる検討を行っている。

以上のことから、TLS の利用による景観シミュレーション手法は、特に樹木の景観特性の解析に焦点を当てたものが多く、庭園景観の維持管理に対しての有効性が示されている。

1.4.2 TLS を利用した日本庭園の図化に向けた調査・計画

TLS を使用した庭園の価値の立証や保存整備のための庭園調査に関して、栗野ら¹⁵⁾⁴⁰⁾、國井ら⁴¹⁾による研究によってその有効性の立証と手法が確立されている。TLS を利用した計測は、地物を効率的に計測でき調査を比較的短時間で完了できる。そのため、現地における地物観察と銅製巻尺による位置と形状の特定をする直接計測を組み合わせることで、従来、庭園計測で広く用いられていた平板測量と比較し、詳細で早急な現況平面図の作成が可能である。さらに、TLS にて取得される 3 次元データには高さ情報が含まれているため、等高線描画のための水準測量を簡略することができ、任意のピッチによる等高線の描画も可能であることから地形情報を詳細に盛り込んだ平面図の作成が可能である⁴²⁾⁴³⁾。

以上のことから、TLS を用いた現況平面図の作成は、庭園の本質的価値の評価と庭園の保存管理・整備の計画に関する技術としての重要性が高いといえる。

1.5 研究の特色と論文構成

本論文は、第 1 章から第 6 章までの章立てで構成されており、各章の位置づけと研究の流れを図 1 に示す。2 章以降の詳しい概要に関しては、以下に各章ごとに述べる。

第 1 章では、日本庭園に存在する庭園樹木に樹形までを詳細に記録した既往研究が少ないことを背景に、庭園樹木の保存に向けた TLS による計測調査の有効性の検証が求められることを述べた。さらに、「生きた」被爆遺産としての文化的価値を持つ被爆樹木の現況から、早急に TLS による 3 次元情報として記録する重要性があることを述べた。

以上のことから、TLS を用いた樹形情報の調査研究を進めることは、日本庭園の樹木によって現出される景観の保存と、損失の危険性が高く生態学的にも重要な被爆樹木の保存に向けた有効的な研究となると予測される。

第 2 章 樹木に対する 3 次元計測手法の整理

数ある 3 次元計測技術の中でも、本研究で用いる TLS での計測が、樹木の 3 次元情報を

得る最も適した手段であることを考察する。そのために、樹木に対する 3 次元情報を取得することが可能な計測方法を整理することで、これらの手法を用いた樹木計測から見えてくる欠点を把握し、TLS の樹木計測の適正を明らかにする。

第 3 章 日本庭園を対象とした 3D 樹木モデルの構築

本論文の研究内容と考察内容の中心的な位置づけの章であり、清澄庭園（東京都江東区）を対象とした TLS での取得データを用い、庭園樹木の詳細な 3D 樹木モデルの構築を試みる。特に、本研究では計測から得られる樹木点群の反射率(Reflectance)および偏差(Deviation)の情報を利用することで、TLS-QSM 法を主軸とした 3D モデリングを実施する。さらに、日本庭園の多様な樹種が配植された空間においても、樹種を限定することなく本手法を適用させることを目指す。

第 4 章 原爆被爆樹木の 3D 樹木モデルの構築への応用

第 3 章で示した TLS-QSM 法を主軸とした 3D 樹木モデルの構築手法を、被爆樹木に対して応用する。特に、被爆樹木にみられる特有の特有樹形の再現のために、第 3 章とは異なる 3D 樹木モデルの構築手法を提案し、さらに、3D 樹木モデルより被爆樹木の爆心地への傾斜角度、傾斜方位を効率的に算出するための応用をおこなう。

第 5 章 樹木点群および 3D 樹木モデルの精度検証

TLS を用いた樹木計測にて、対象樹木と取得される樹木点群の樹形の精度検証をおこなう。また、TLS による樹木計測にて取得された樹木点群を、TLS-QSM 法へ適用する場合に、処理が可能な樹高の限界を検証する。さらに、TLS-QSM 法にて構築した 3D 樹木モデルに対しても、構築の基となった樹木点群との精度検証をおこなうことで、精度面においても 3D 樹木モデルの樹形の再現性が保証されていることを明らかにする。

第 6 章 終章

清澄庭園を例とした日本庭園での TLS を用いた樹木点群の利用にて、本研究で用いた手法に対する独創性ならびに有効性について考察する。さらに、本手法を「生きた被爆遺産」として価値のある被爆樹木に対して応用したことについて、主に保存に関わる着眼点から有効性について考察する。最後に、本研究の成果の学術的発展性について、詳細な 3D 樹木モデルは、多様な分野において重要な研究材料であることに着目し考察をおこなう。

研究の流れ

第1章 序論 TLS を利用した庭園樹木の記録の必要性和有効性を検証する研究

日本庭園の庭園樹木は**観賞上の価値**を有し、**樹形情報**の正確な記録が求められる。しかし、これまでの庭園植栽の記録には樹木の正確な樹形までを記録した資料はなく、**地上型 3D レーザスキャナ (TLS)** を用いた庭園樹木の記録の有効性を検証する

第2章 樹木に対する 3次元計測手法の整理

樹形情報を得るための**適した ICT とは？**

数ある 3次元計測技術 (ICT) の中でも、**地上型 3D レーザスキャナ (TLS)** による樹木計測が樹形情報を得るための**最も適した手段**であることを明らかにする

研究の主体

※ 本研究で考察する中心的内容

※ 第3章 日本庭園を対象とした 3D 樹木モデルの構築

清澄庭園にて TLS を使用した樹形情報の取得および解析をおこなう
TLS-QSM 法および、**偏差 (Deviation)** **反射率 (Reflectance)** の付属情報によって**樹種を限定しない、早急かつ効率的な 3D 樹木モデルの構築**をおこなう

第4章 原爆被爆樹木への応用

文化的価値を有する**原爆被爆樹木**に本手法を適用させる
第3章と同じく、TLS-QSM 法を主軸とした 3D 樹木モデルの構築をおこなうが、特に原爆被爆樹木に多く見られる**特有の異常を忠実に再現**するための手法を提案する

第5章 樹木点群および 3D 樹木モデルの精度検証

精度面においても 3D 樹木モデルの樹形の**再現性が保証**されていることを明らかにする
そこで、以下の 2 点の精度検証をおこなう

- ・ TLS にて取得される樹形情報の精度検証
- ・ TLS-QSM 法にて構築される 3D 樹木モデルの精度検証

終章 本研究の成果 樹木形状の正確な記録が日本庭園そのものの保存へと繋がる

庭園樹木は日本庭園の**構造的かつ文化的特質**に大きく影響しており、TLS を使用した正確な樹形情報を保全していくことが、**その時代の樹木によって現出される庭園の姿形と日本庭園そのものの姿形**を保存していくことへと繋がっていくと考えられる

図 1 研究の流れ

第2章 樹木に対する3次元計測手法の整理

2.1 概説

対象を3次元情報として取得するための手段として様々な測量技術が存在するが、計測対象が樹木である場合、樹形情報を取得する上で適した測量技術を検討する必要がある。樹木は構造上、樹冠の内部にあたる幹および枝と樹冠の外部を覆う形で存在する葉の両構造を持っており、計測では樹冠の外部構造の取得だけでなく、幹・枝の形状情報も合わせて取得する必要がある。

本研究では、樹木点群から3D樹木モデルの作成をおこなう上で、幹・枝の樹形情報が最も重要であり、葉などの情報は不要なものとして扱う。そこで、樹冠の内部にあたる幹および枝を取得するための最も適した3次元計測手法の検討をおこなった。

2.2 トータルステーション (TS)

トータルステーション (TS) は、搭載されているセオドライト (角度測量器) と光波測距儀による斜距離の測定によって、測距と測角を同時におこなうことができることから、水平距離や3次元座標を算出することができる⁴⁴⁾⁴⁵⁾。このことから、奈良国立文化財研究所では、庭園に局地座標系を与えることで、景石や樹木等の測点を方眼紙にプロットする手法を用いた事例が存在する⁴⁶⁾。しかしながら、TSは1度の視準にて1点のみの計測となるため、樹木形状を3次元情報として詳細に取得しようとした場合、膨大な測点を必要とし、長時間の測量を必要とする。さらに、樹木が繁茂している状態では、樹木内部の幹・枝を計測することは困難であり、機能面と効率面から樹形の3次元情報の取得手段として適切ではない。

2.3 写真測量

写真測量とは最低2ヶ所以上から対象物を撮影 (ステレオペア画像) (図2) して、対象物の3次元形状を計測する技術である⁴⁷⁾。その発展形ともいえる、多数のステレオペア画像からより詳細な対象物の3次元形状データを得ることができる SfM 多視点ステレオ写真測量 (SfM-MVS : Structure-from-Motion Multi-View Stereo Photogrammetry) (図3) を、近年、フリーソフトウェアまたは商用ソフトウェアで簡単に利用できるようになった⁴⁸⁾。そこで、SfM-MVS ソフトウェアの1つである Agisoft 社の Metashape (旧 PhotoScan)⁴⁹⁾ を使用した地上写真測量を樹木に対しておこない、取得される形状情報を考察した。結果、図4が示すように、樹木の復元が可能なのは樹木の表面的形状であり、幹・枝などの樹冠内部の形状は葉によって計測データが取得されない部分 (オクルージョン) となるため、復元することが不可能であった。このことから、葉で覆われた単木に対しての詳細な樹形情報を得るには、写真測量は適切でない。

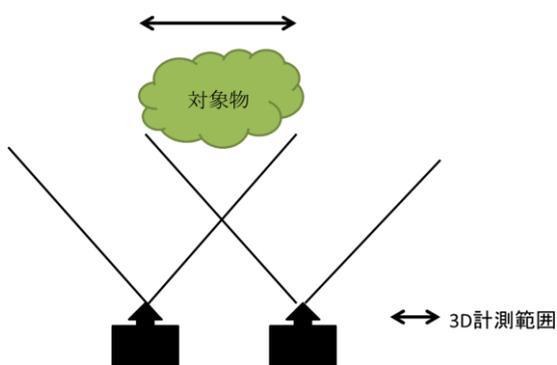


図2 ステレオペア

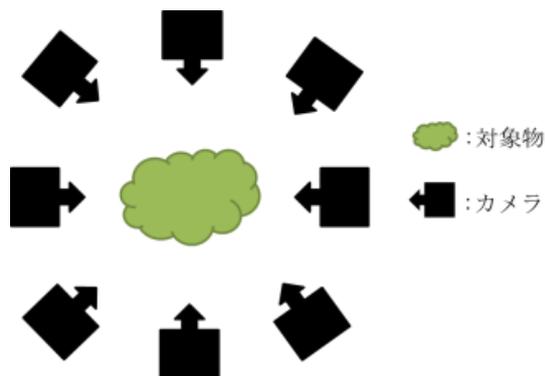


図3 多視点ステレオ

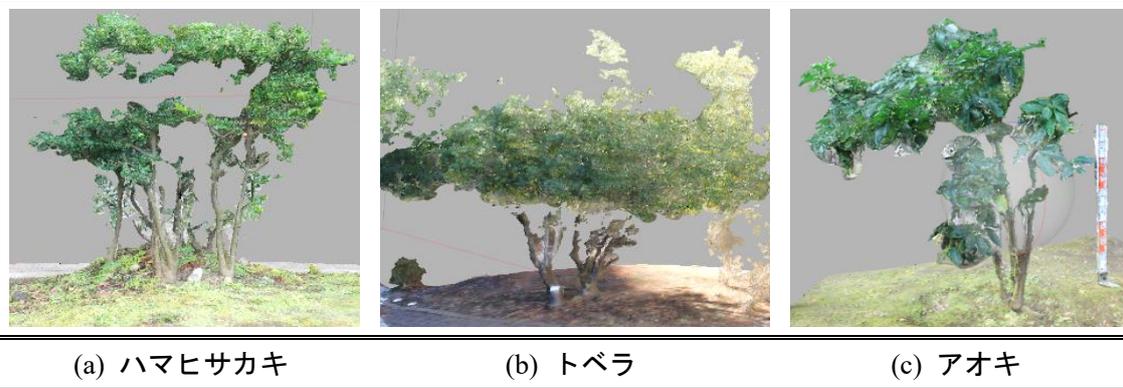


図4 Metashapeによって構築された3D樹木モデル

2.4 レーザ計測

レーザ計測機器には多様な機種が存在しており、本研究で使用した地上型3Dレーザスキャナ(TLS)の他に、車両に搭載する機種や航空機に搭載する機種なども存在する。そこで、以下に機種ごとの取得データの特徴を述べた上、本研究における樹木計測への適用性を整理する。

2.4.1 航空レーザ測量 (ALS : Airborne Laser Scanner)

航空レーザ測量(以下、ALS)による樹木計測の事例として挙げられるのが、主に森林などの広域緑地を対象とした資源把握の例である。その例として挙げられるのが、樹幹面積の把握、樹木の立木本数の把握、人工林を対象とした樹種判別、森林バイオマス量の算出など多岐にわたる⁵⁰⁾⁵¹⁾。また、近年の航空機に搭載されるレーザスキャナの掃射密度の向上や、航空機より低空で森林計測が可能なUAV搭載型レーザスキャナの出現により、より高密度な森林樹木の取得データを取得することが可能となった。しかしながら、TLSと比較すると、ALSのみの計測で取得できる単木樹形の情報は少なく、特に樹木下部の情報の取得

がより困難である。このことから、ALS は単木の形状データの詳細な把握に適さない。しかしながら、TLS では取得が困難な樹木上部の情報を取得することが ALS では可能であるため、両機器による取得データを組み合わせることで詳細な樹木の構造情報を取得することの有効性が示されている⁵²⁾⁵³⁾⁵⁴⁾⁵⁵⁾。

2.4.2 車載写真レーザ測量 (MMS : Mobile Mapping System)

車載写真レーザ測量 (以下、MMS) は車両にレーザスキャナを搭載することによって、道路規制をすることなく通常の走行速度で効率的にデータを取得することが可能である⁵⁶⁾。道路走行によるデータ取得を目的としているため、街路樹を対象とした計測の実施がされており、MMS によって樹木の幹周、位置、樹高、面積、樹種を取得データから算出することで、街路樹台帳の作成を可能としている⁵⁷⁾。また、動体計測による取得データの効率性から、森林内での早急な樹木計測の有効性を検証した事例が存在するが、TLS と比較し、林道と樹木の距離によるレーザの掃射角度の影響や車両による搬入の利便性の低さから、樹木全体の点群データを満足に取得することができない問題が指摘されている⁵⁸⁾。そのため、樹木データの取得において MMS を利用した場合、胸高直径 (DBH : Diameter at Breast Height) や樹冠面積 (CPA : Crown Projection Area) などの局所的な部位に焦点を絞った場合のみ、高精度に樹木データの取得および解析することが可能であると考えられる。また、車両搬入を考慮に入れた場合、MMS による計測調査は日本庭園では計測対象地が限られ、適切でないと考えられる。

2.4.3 バックパック型レーザスキャナ

バックパック型レーザスキャナは、レーザスキャナと全体地図と自己位置推定を同時に行う SLAM の技術によって、装置を背負う形で移動計測をおこなう機器である (図 5)⁵⁹⁾。バックパック型レーザスキャナは、ALS とは異なり森林内部からより詳細な情報を得るための手段として、ベンチャー企業などが先駆的に取り入れている⁶⁰⁾。取得される樹木情報を考察すると、平地林での移動計測によるデータ取得から胸高直径と立木位置を正確に推定する手段としては確立されているが⁶¹⁾⁶²⁾⁶³⁾、樹形情報を単木ごとに詳細に取得する手段としては明らかにされていない。また、計測したデータ結合 (キャリブレーション) の精度として、室内計測においてはその有効性が示されているが⁶⁴⁾、日本庭園などの自然空間での計測を考えた場合、キャリブレーションの精度に不安が残る。そのため、バックパック型レーザスキャナによる移動計測は、広大な範囲の森林構造を詳細かつ早急に計測することの有効性が示されているが、単木樹形の把握としては適切と言えない。



出典：<https://www.flickr.com/photos/hidakuma/albums/72157688124521586>

2017年9月4日に、日本大学・日本工業大学との合同調査で、岐阜県飛騨市の雑木林調査を実施した。写真は日本工業大学の計測によるもの。

図5 バックパック型レーザスキャナの計測の様子

2.4.4 地上型 3D レーザスキャナ (TLS)

近年、TLS は小型化と性能の向上が進んだことにより、森林などの自然空間においても、内部までの搬入が容易となったことで広く用いられるようになった。また、計測範囲は縮小されるが、ALS よりも形状情報が詳細で高密度な樹木点群が取得することができることから、より詳細な森林構造および地上バイオマス量 (AGB) の推定が可能である⁵⁴⁾⁶⁵⁾。また、TLS を使用した単木の計測においても、樹冠の内部にあたる幹および枝や樹冠構造(Canopy Structure)、葉面積指数(Leaf Area Index)、細部の枝構造までを把握可能な高密度の樹木点群が取得できることが明らかになっている⁵⁸⁾⁶⁶⁾。このことから、樹木の詳細な形状情報を得るための手段として、TLS を用いた計測は最も適切であると考えられる。

第3章 日本庭園を対象とした3D樹木モデルの構築

3.1 概説

日本庭園を対象とした3D樹木モデルの効率的な構築手法の提案をするためには、構築工程を自動化する必要がある。既往研究では、TLSにて取得される樹木点群から、詳細な3D樹木モデルの構築に有効であることが示されているが⁶⁷⁾⁶⁸⁾、各工程において手動による処理が存在しており、樹木1本当たりの構築に多くの時間と労力を必要としていた。そこで、これらの問題を解決する手段として、本研究ではTLS-QSM法を主軸とした3D樹木モデルの構築を試みた。しかしながら、TLS-QSM法を日本庭園にて取得される樹木点群に適用させるためには、幾つかの課題が存在する。

まず1つ目に、TLSを使用した樹木計測において、樹形情報が取得可能な樹高の限界を明らかにする必要がある。そこで、東京農業大学世田谷キャンパス内にて、TLSを用いた計測をおこない、樹高に焦点を絞った樹形情報の取得の有効範囲を検証する(3.3)。

2つ目に、TLS-QSM法は樹木点群の葉を構成する点群(以下、葉点群)が完全に取り除かれた状態を想定した処理である。そのため、幹・枝を構成する点群(以下、幹・枝点群)と葉点群の分離をおこなうための有効な手法について述べる(3.5)。

3.2 日本庭園調査で使用したTLSの仕様

本研究にて、日本庭園調査で使用したTLSはRIEGL社製のVZ-400i(図6)である。表1に、その仕様を記す。



図6 RIEGL VZ-400i

表 1 VZ-400i の仕様

距離測定器性能	
アイセーフティ IEC60825-1:2007	クラス 1 (スキャニング中のビーム)
パルス繰り返しレート(PRR) ※選択可 100kHz 有効測定レート (測定/秒) 42,000 測定最短距離 1.5m	測定距離範囲 反射率 \geq 90%の自然物ターゲット 800m 反射率 \geq 20%の自然物ターゲット 400m
パルス繰り返しレート(PRR) 300kHz 有効測定レート (測定/秒) 125,000 測定最短距離 1.2m	測定距離範囲 反射率 \geq 90%の自然物ターゲット 480m 反射率 \geq 20%の自然物ターゲット 230m
パルス繰り返しレート(PRR) 600kHz 有効測定レート (測定/秒) 250,000 測定最短距離 0.5m	測定距離範囲 反射率 \geq 90%の自然物ターゲット 350m 反射率 \geq 20%の自然物ターゲット 160m
パルス繰り返しレート(PRR) 1.2MHz 有効測定レート (測定/秒) 500,000 測定最短距離 0.5m	測定距離範囲 反射率 \geq 90%の自然物ターゲット 250m 反射率 \geq 20%の自然物ターゲット 120m
測定精度	\pm 5mm
レーザ波長	1550nm(近赤外線)
ビーム広角	0.35mrad

(表 1 VZ-400i の仕様) の続き

スキャナの性能	
ラインスキャン	
スキャニング範囲	トータル 100°(+60°/-40°)
スキャニング機構	回転多面鏡 (ポリゴンミラー)
スキャニングレート	3 ラインズ/秒～240 ラインズ/秒まで選択可能
角度ステップ幅 $\Delta\theta$	$0.0007^\circ \leq \Delta\theta \leq 0.6^\circ$
レーザーショット間	
角度読み取り分解能	0.0007°(2.5 秒角)
フレームスキャン	
スキャニング範囲	0～360°
スキャニング機構	回転式光学ヘッド
スキャニングレート	0°/秒～150°/秒
角度ステップ幅 $\Delta\phi$	$0.0015^\circ \leq \Delta\phi \leq 0.62^\circ$
レーザーショット間	
角度読み取り分解能	0.0005°(2.5 秒角)
GNSS 受信機	L1 (1575.42MHz) 受信機内蔵, GPS, GLONASS, Beidou を同時受信可能
レーザー光鉛直器	内臓
内部同期タイマー	内臓
クラウドストレージ	Amazon S3, FTP-Server, Microsoft Azure
一般技術データ	
主要寸法 (長さ×直径)	206mm×308mm
重量	約 9.7kg
供給電源	11～34V DC
外部電源	RIEGL add-on NiMH バッテリー 最大 2 つの独立した外部電源を接続して、機器の電源を落とさず動作可能。
消費電力	標準 58W 最大 80W
保護クラス	IP64 防塵・防滴構造
温度範囲	
作動温度	0°C～+40°C
保管温度	-10°C～+50°C

3.3 TLSによる計測可能な樹高の検証

TLSを利用した樹木計測は、樹形情報の取得の観点からその有効性を第2章で示したが、本研究で利用したTLS（VZ-400i）が可能とする樹高計測を検証する必要があった。TLSを使用した樹木計測による樹形情報の取得と樹高推定への利用の有効性は既往研究にて示されているが⁶⁹⁾⁷⁰⁾、本研究で重要となるのは樹冠の内部にあたる幹および枝の樹形情報であり、これらの情報を十分に取得できる樹高を明らかにする必要があった。

そこで、東京農業大学世田谷キャンパス内の正門前広場にて計測を行い、樹高の有効範囲の検証をおこなった。正門前広場には、低木から樹高が30m程度のメタセコイヤまで、様々な樹木が存在しており、検証をおこなう場所として適切である。

3.3.1 計測可能な樹高の検証結果

計測は2019年5月8日に実施した。なお、検証ではTLSの姿勢をほぼ水平とした状態で測量をおこなった。計測調査で設置したTLSの配置場所を図7に示し、取得された計測データを図8に示す。TLS-QSM法で重要となる樹木の幹・枝の形状情報を取得することが可能な樹高は、図8から約17mまでは十分であることが判断できる。なお、取得した樹高17m付近の樹形情報の詳細な状況確認は、第6章の精度検証にて詳しく述べることとする。

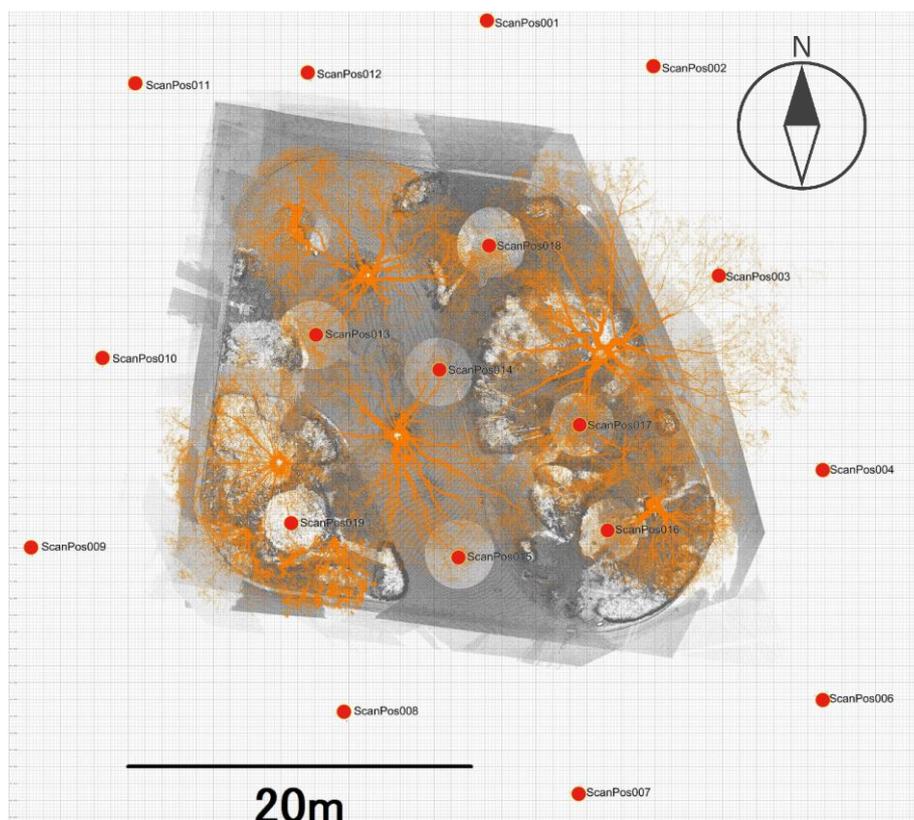


図7 正門前広場のVZ-400iの設置地点

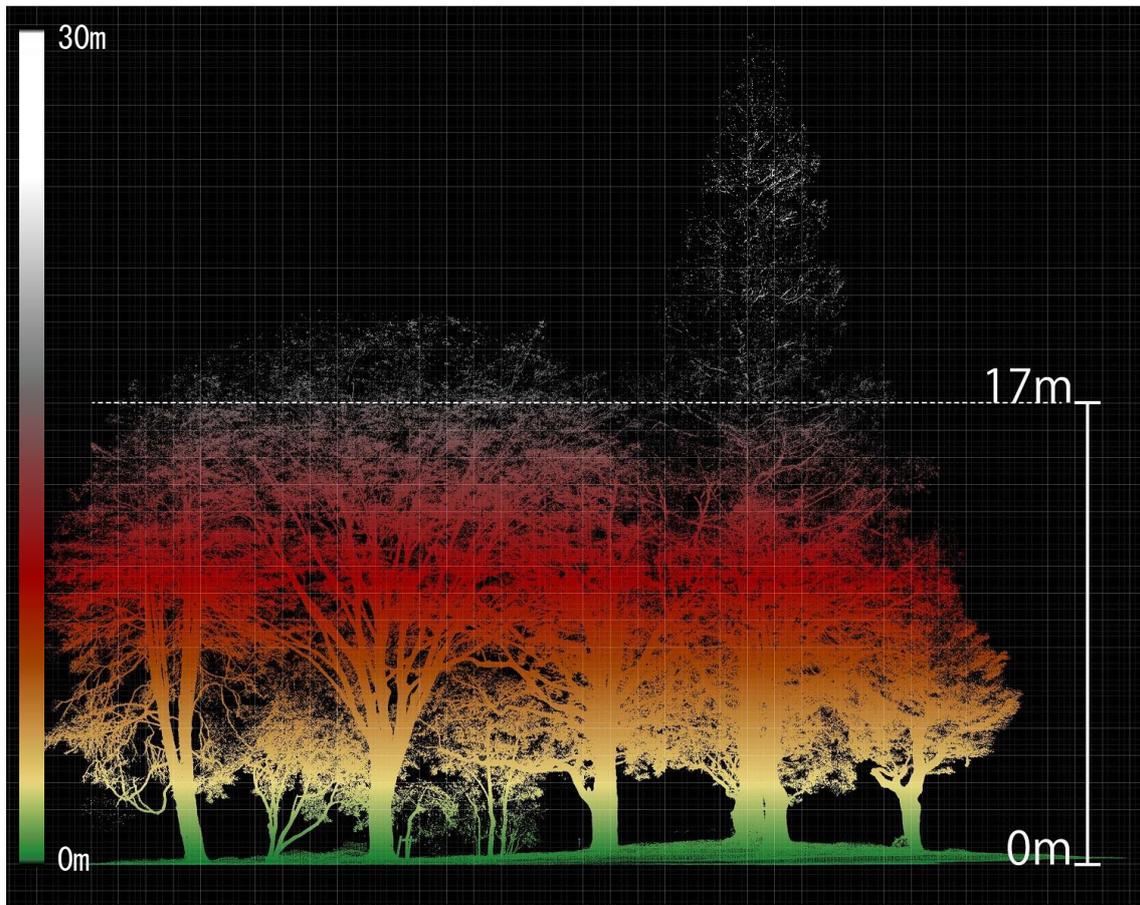


図 8 樹木内部の形状情報（幹・枝）の取得可能な範囲

3.3.2 本研究で対象とする日本庭園

本研究では、清澄庭園（東京都江東区）を対象とした計測調査を実施した。また、その中でも 3D 樹木モデルの構築をおこなう対象エリアを図 9 に示す。なお清澄庭園を対象とした理由として、VZ-400i を用いた計測をおこなう以前に、2016 年 4 月 20 日-4 月 27 日、および同年 2016 年 9 月 19 日-9 月 21 日の 2 回に分けた計測に、旧式の TLS である RIEGL 社製 LMS-Z390i（詳しい仕様は第 4 章の 4.2 にて記述）を用いて、清澄庭園にて計測をおこなった。2016 年の調査では、後処理にて取得された樹木点群を単木ごとに抽出をおこない、2018 年 6 月 22 日、27 日、8 月 1 日に実施した清澄庭園の樹木調査で得られた樹種情報と照合させることで、樹木リストの作成をおこなった（図 10）。なお、作成した樹木リストの対象範囲は、庭園の主要な建造物である大正記念館周りである。その理由として、図 9 の 2016 年に実施した計測調査の TLS の配置状況から分かるように、樹木が存在する場所に対して多方向からの計測が可能であるからである。そのため、対象エリアでは樹木全体を捉えた詳細な樹形情報を取得できる。以上のことから、本研究の 3D 樹木モデル構築においても、作成した樹木リストと同じ対象範囲で検証をおこなうことが適切であると考えた。

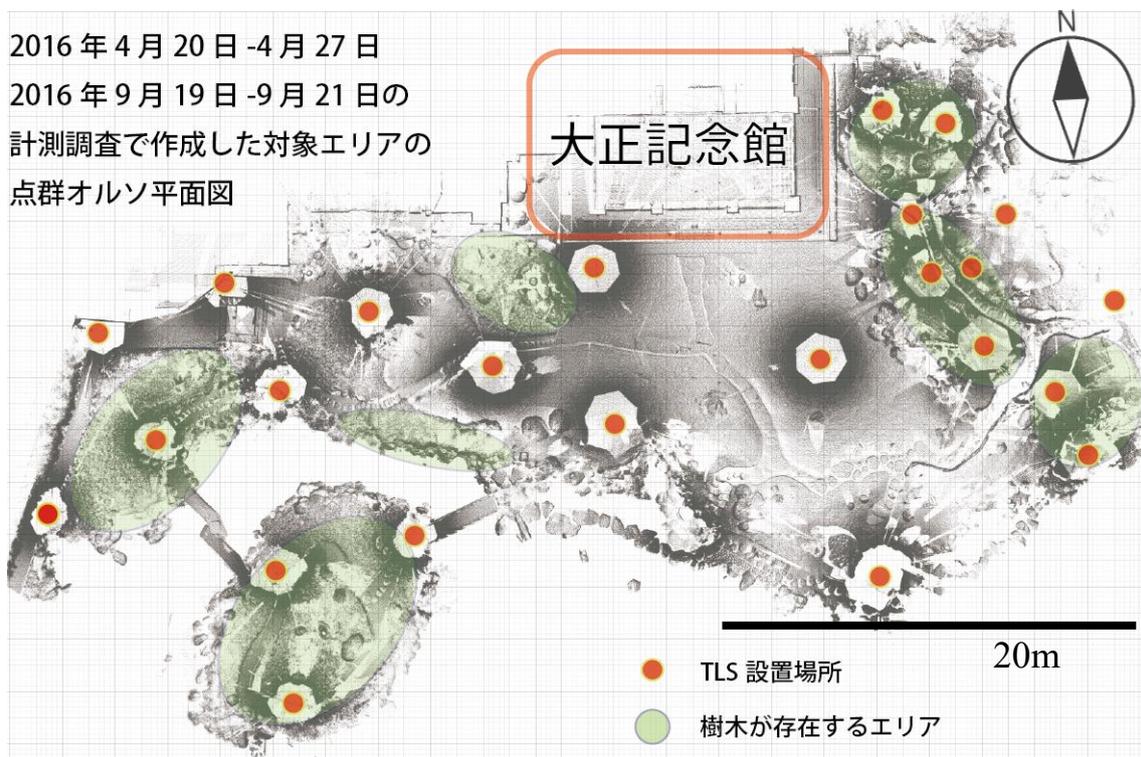
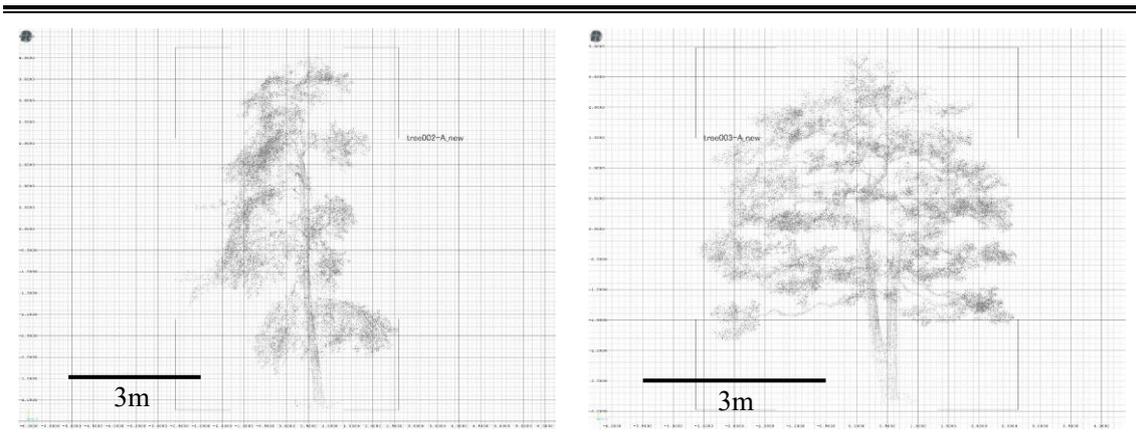


図9 本研究で3D樹木モデル構築する対象エリア

3.3.3 清澄庭園の概要

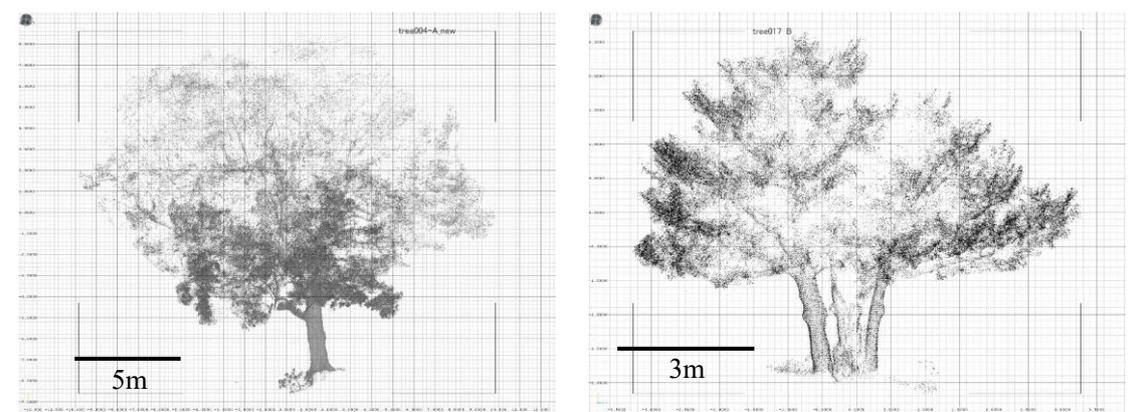
本研究で計測対象とした清澄庭園は、東京都江東区に存在する回遊式林泉庭園である。清澄庭園は、岩崎弥太郎が1878（明治11）年、深川清住町、伊勢崎町一帯の土地約3万坪を買い取り造設され、三菱財閥社員の慰安や貴賓を目的として、清澄園または深川親睦園として岩崎家三代によって完成された。その後、1924（大正13）年の関東大震災に壊滅的な被害を受けるが、避難所としての機能が認知されたことが契機となり、1924年には、被害の少なかった庭園の東半分が、岩崎家から東京都（当時、東京市）へ寄付され、1932（昭和7）年に清澄庭園として開園した。さらにその後、太平洋戦争末期である1945（昭和20）年2月から3月にかけての空襲によって再び被害を受けるが、1953（昭和28）年に大正記念館が再建されたことで、庭園として復旧がなされ現在に至る⁷¹⁾。

清澄庭園を代表するものとして、「名石の庭園」と呼ばれるように⁷²⁾庭園の各所に全国から取り寄せた名石が多種多様に配置がされていることである。また、庭園のいたる場所から望むことのできる「富士山」と呼ばれる築山は、清澄庭園の特徴的な縮景となっている。



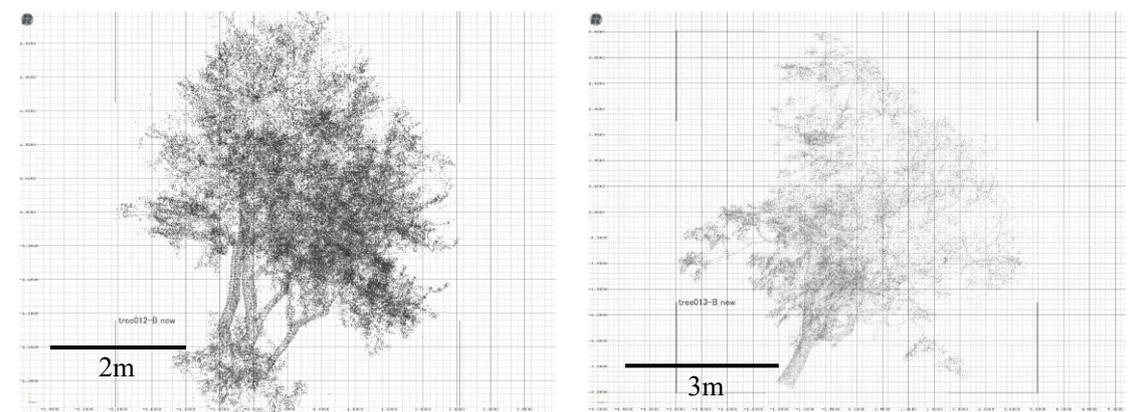
(a) クロガネモチ

(b) モッコク



(c) クスノキ

(d) スダジイ



(e) ザクロ

(f) ハゼノキ

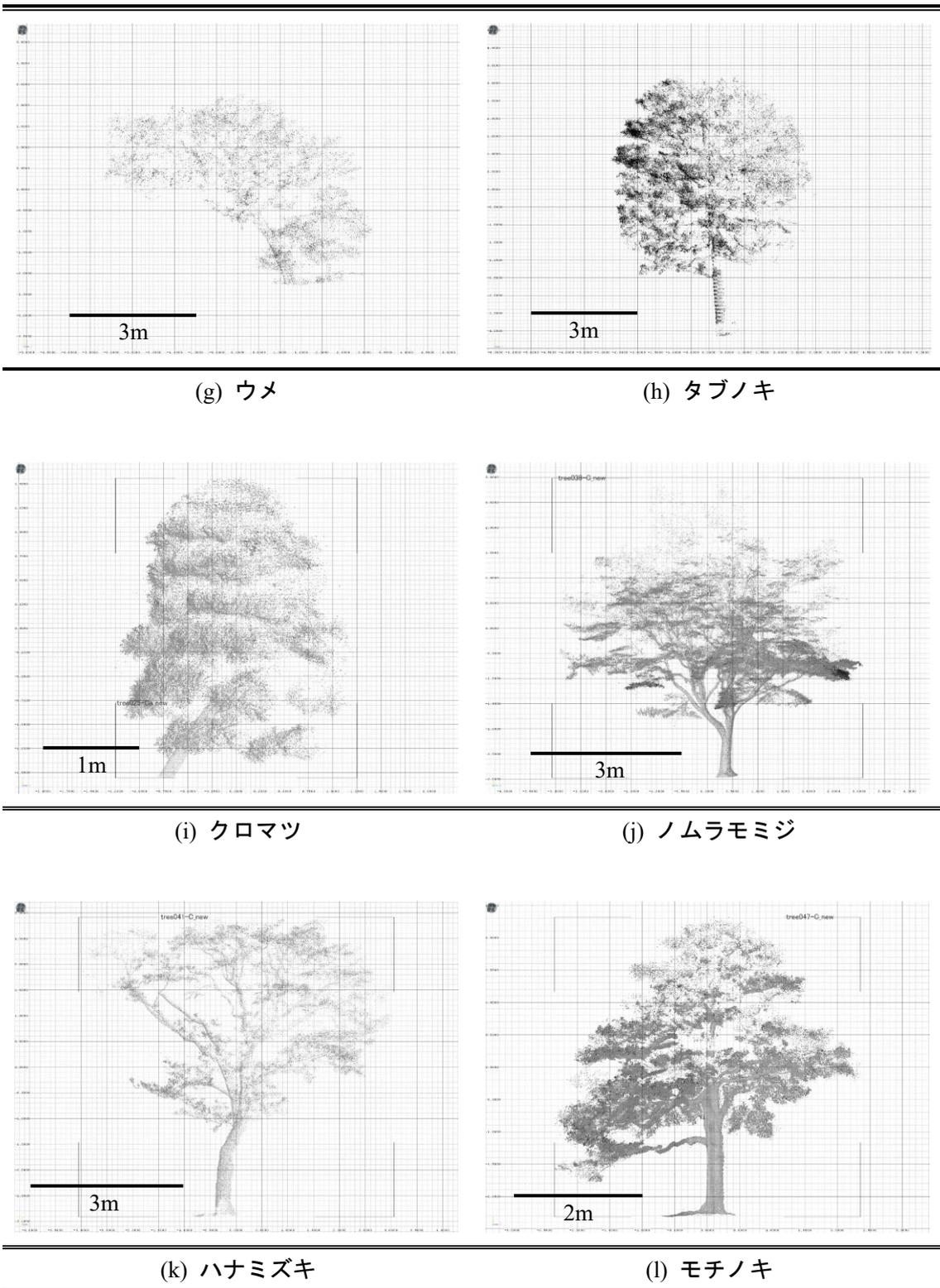


図 10 LMS-Z390i を用いた計測調査および樹木調査で作成した樹木リスト

3.4 清澄庭園における計測

清澄庭園での計測から 3D 樹木モデルの構築までの工程と所要時間を図 11 に示す。

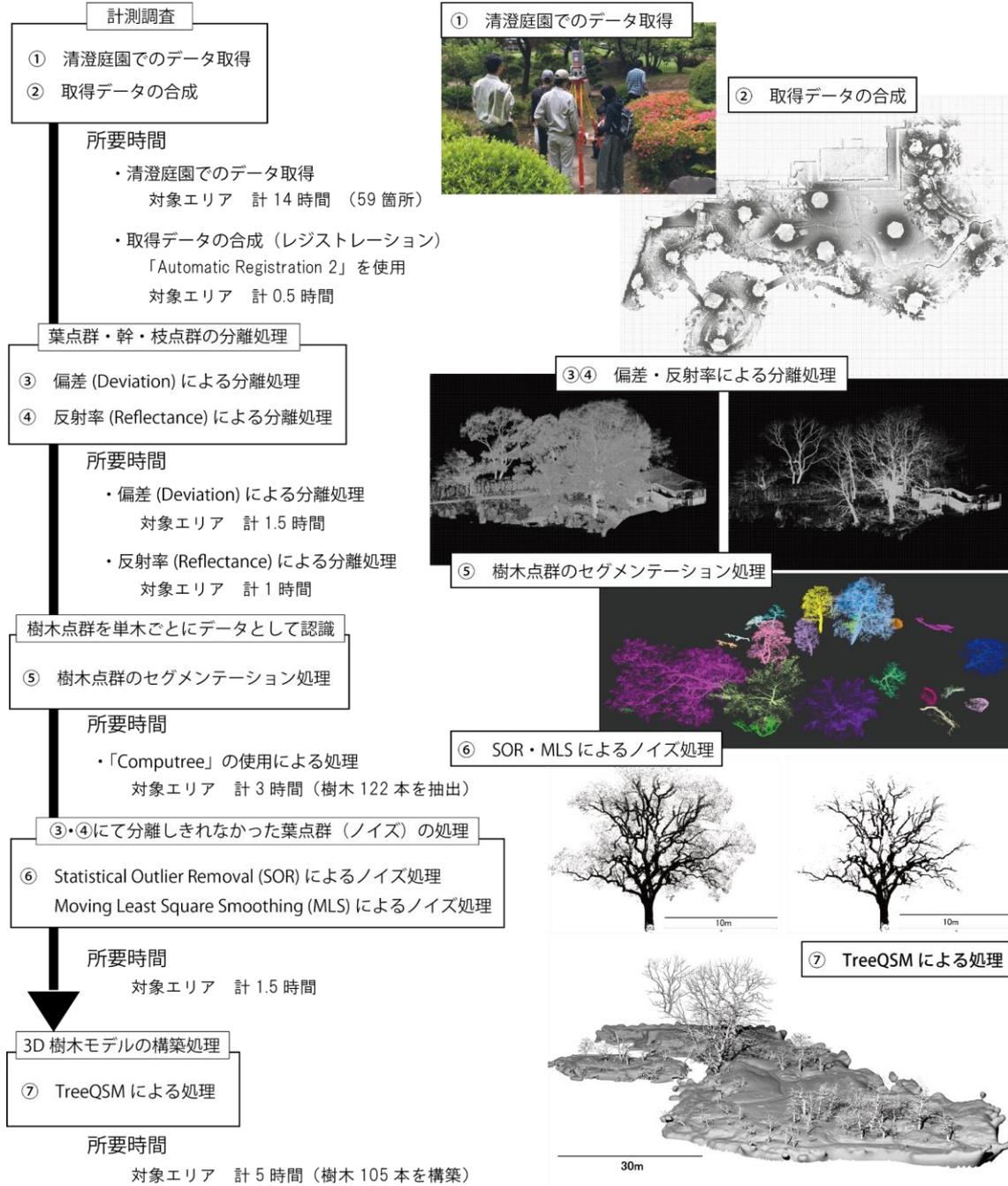


図 11 3D 樹木モデルの構築までの工程と所要時間

3.4.1 清澄庭園でのデータ取得

VZ-400i を使用した計測調査を 2019 年 5 月 29 日-31 日、6 月 1 日、2 日、4 日の計 6 日にかけて実施した。TLS による計測では、機器から確認できない構造部の裏側や、レーザの測定距離の有効範囲以外はデータを取得することが不可能である。そのため、オクルージョンを補っていくため、TLS の設置場所（スキャンポジション）を変えながら計測をおこなっていく¹⁸⁾。清澄庭園での計測調査（図 12）で配置した TLS の場所を図 13、計測記録を表 2 にそれぞれ示す。計測で利用した VZ-400i の設定として、パルス繰り返しレート (PRR) 1.2MHz、有効測定レート 500,000（測定/秒）とし、縦横共に 0.04°毎にレーザ掃射されるようにした。



計測調査は 2019 年 5 月 29～30 日、6 月 1 日、2 日、4 日に実施

図 12 清澄庭園での計測調査の様子

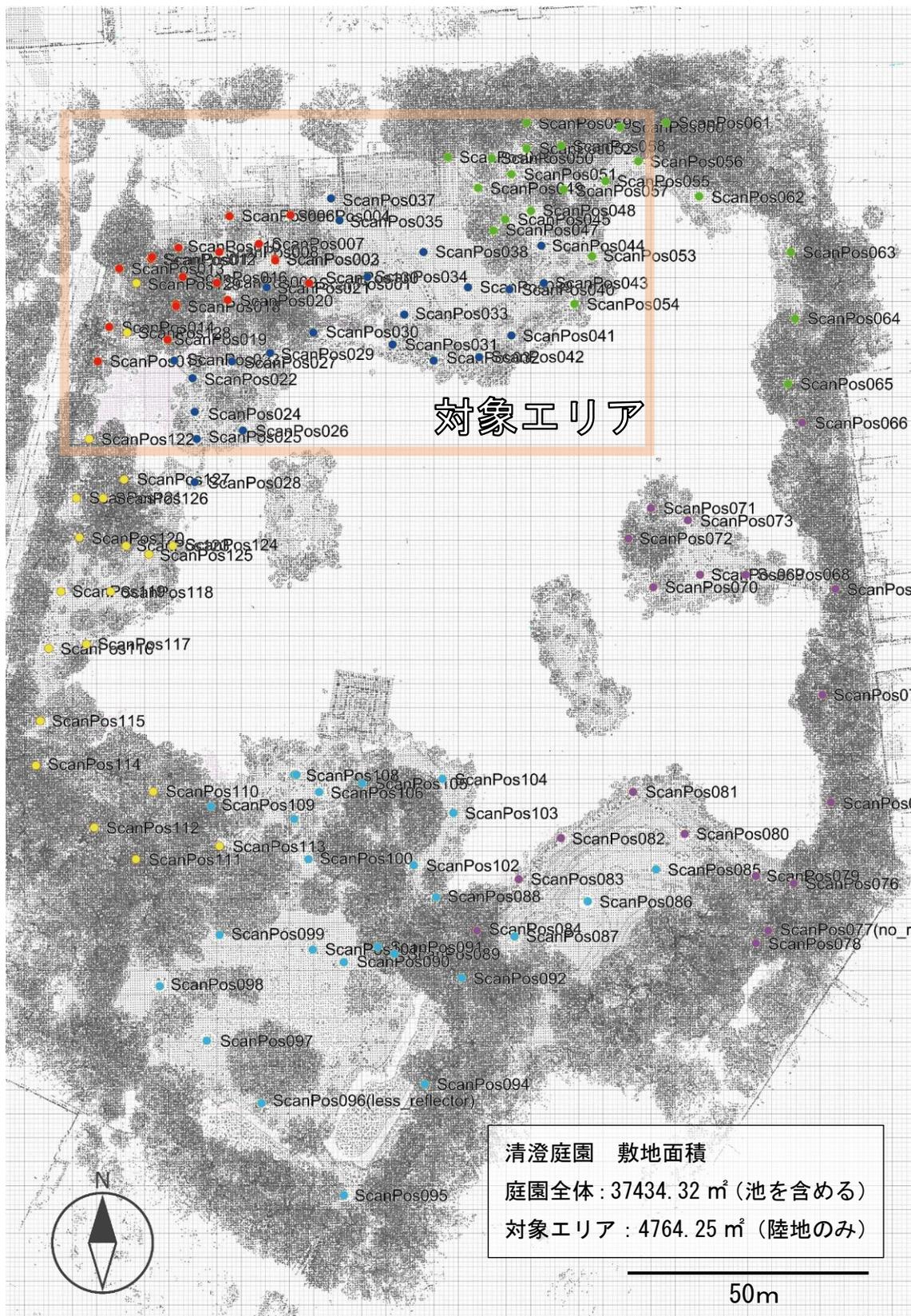


図 13 清澄庭園での計測調査の TLS の配置図

表 2 清澄庭園での計測記録

日時	※ 計測時間	測点数	凡例
2019年5月29日	a.m 10:00 – p.m 16:00	20箇所	● 赤
2019年5月30日	a.m 10:00 – p.m 16:00	23箇所	● 青
2019年5月31日	a.m 10:00 – p.m 14:00	21箇所	● 緑
2019年6月01日	p.m 13:00 – p.m 16:00	18箇所	● 紫
2019年6月02日	a.m 10:00 – p.m 16:00	25箇所	● 水色
2019年6月04日	a.m 10:00 – p.m 14:00	19箇所	● 黄
庭園全体	※ 計 29 時間	計 126 箇所	
対象エリア	※ 計 14 時間	計 59 箇所	□ 部分

※ 計測時間の合計には、休憩およびリフレクタの配置作業を含む

3.4.2 取得データの合成

TLS によって得られた点群データは、TLS の設置位置を原点とする相対的な座標（ローカル座標）であるため、清澄庭園全体の復元データを得るためには、TLS が設置された各場所得られた点群データ同士を合成（レジストレーション）する。本研究では RIEGL 社製の点群編集ソフトウェアである「RiSCAN PRO(version 2.7.1)」⁷³⁾に搭載されている「Automatic Registration 2」を使用した。

Automatic Registration 2 はリフレクタ配置によるタイポイントに依存することなく、自動的にレジストレーションを可能にする処理である。その方法として、計測地点の点群データからボクセルデータと面パッチデータを作成し、前のスキャンポジションのボクセルモデルと面パッチモデルと共通点を組み合わせる。さらに、その際に TLS によって受信した GNSS と TLS に内蔵されている IMU（Inertial Measurement Unit：慣性計測装置）の情報もレジストレーションに加味される。そのため、処理後の結合データが Y 軸に沿って正確に真北を向くようにレジストレーションされる利点もある。

3.5 TLS-QSM 法による 3D 樹木モデルの構築

樹木点群から 3D 樹木モデルの自動構築に関する既往研究は多く存在するが、その中で大きな課題として挙げられているのが、第 1 章の研究方法でも述べたように、樹木の幾何学的形状の複雑さの問題である。特に、これまでの 3D 樹木モデルの構築手法として大きな問題となっていた点が、メッシュ化処理にて構築されない主幹より小さい枝部分を目視による作業にて補正を加えていた点である⁶⁷⁾⁶⁸⁾。それによって、多くの時間と労力が必要となっていた背景があり、本研究ではこれらの問題に対処する手法として TLS-QSM 法を用いた。TLS-QSM 法は TLS によって取得された樹木点群から、Quantitative Structural Model (QSM) を構築することで、計測された樹木の体積、森林バイオマス量を推定する有効な手法として確立されている⁷⁴⁾⁷⁵⁾。QSM の構成の基本となる原理が、樹木点群の根元から小枝の細部までの各プロットに生成される円筒状モデル(Cylindrical Tree Models)である。この原理は樹木点群を各セグメントに分割し、各セグメントの半径および方向を局所的に近似していくことで連続したシリンダによって再構築するものである (図 14)。

TLS-QSM 法のツールとして用いるのが、Tampere University of Technology が公開しているオープンソース TreeQSM⁷⁶⁾⁷⁷⁾である。TreeQSM を用いた理由としては以下の 3 点が挙げられる。

- ① 樹木の体積などの定量算出のほかに、樹木構造を精密に推定するための有効なツールであることが実証されている⁷⁸⁾⁷⁹⁾。
- ② 樹木点群が欠損した部分を正確に推定し、再構築をおこなうことができる⁷⁹⁾。
- ③ 構築処理の大半が自動化されており、単一樹木の構築処理を数分で完了できる⁷⁹⁾⁸⁰⁾。

このことから、詳細な 3D 樹木モデルの構築手法として TreeQSM を使用することは、樹形の再現性において有効であると考えられる。

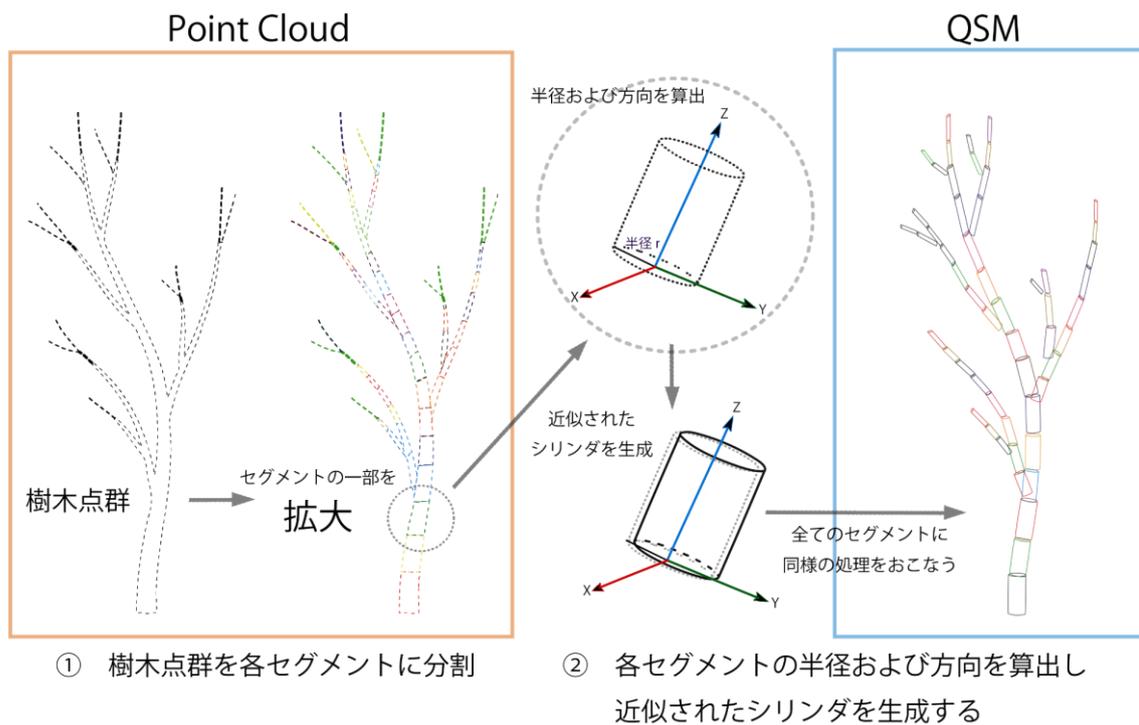


図 14 QSM 構築図

3.5.1 TLS-QSM 法の処理条件

TreeQSM による処理では、単木に対して全方位から十分に覆われるように計測される必要があり、3 箇所以上からのスキャンを推奨している⁷⁷⁾。そのため、(3.3.2)で述べたように、樹木に対して多方面から計測が可能なエリアの取得データを本研究で使用した。

さらに、TreeQSM は樹木点群の構成が幹・枝点群であることを想定した処理のため、葉点群が樹木点群から取り除かれている必要がある⁷⁷⁾。そのため、TreeQSM での処理を想定した樹木計測では、樹木の葉が落葉した状況での計測 (Leaf-off Scans)を推奨している。

しかしながら、落葉性のある樹木 (主に、落葉広葉樹) のみを対象とした場合、樹種がごく一部に限定されるため、多様な樹種が存在する日本庭園において TreeQSM による処理を実行するには適切な処理とはいえない。実際に、清澄庭園は東京農業大学地域環境科学部造園科学科 造園植物・樹芸研究室によって、過去に樹木調査が行われており、合計 40 科目 88 種類の樹木が存在することが確認されている。また、筆者らがおこなった樹木リスト作成の際に対象としたエリアでは、樹高が約 3m 以上の樹木を対象としたが、合計 9 科目 13 種類の樹木が存在していた。

以上のことから、TreeQSM による処理を日本庭園に適用させるには、葉点群と枝・幹点群を分離する方法を検討し、樹種を限ることなく処理を適用させる必要がある。

3.5.2 偏差 (Deviation) による分離処理

TLS によって掃射されたレーザの波形は、レーザが当たる対象物によって著しく変化する。これらの波形の状態を偏差として数値化された概念が、パルス波形偏差(Pulse Shape Deviation)である⁸¹⁾。レーザの波形は、図 15 が示すように入射角が大きいほど波形の変化が大きくなる傾向があり、偏差の数値は大きくなる。パルス波形偏差は、TLS によるレーザ掃射 (スキャニング) によって生じるノイズ (ハレーション) を処理するために用いられている (図 16)。通常、計測後のノイズ処理では、偏差の閾値を 30 前後に設定することが一般的であるが、本研究では葉点群の削除のための偏差の有効的な閾値を設定することとした。

葉点群と幹・枝点群の偏差の数値には、相対的に明確な違いがあると考えられる。その理由として、樹木の幹は、葉と比較してレーザの当たる入射角が安定しており、幹・枝点群の偏差の数値は小さい傾向があると予想されるためである。一方、樹木の葉は個体毎に異なる方向を向いており、葉が密集した部分を面と見た場合に、複雑な凹凸状の表面形状と隙間を持っている。そのため、葉点群の偏差は安定した取得が難しく、偏差の数値が大きいと予想された。

葉点群と幹・枝点群の偏差の数値を把握するため、クスノキの樹木点群から手動と目視によって分離をおこなった。その後、偏差の数値の差異を確認するため、偏差の可視化をおこなった (図 17)。図 17 からわかるように、幹・枝点群は安定して偏差が小さいのに対し、葉点群は偏差が大きい傾向があるのが確認できる。さらに、詳しく偏差の数値を見るためにヒストグラム (度数分布) による処理をおこなった (図 18)。ヒストグラムの結果から、幹・枝点群は偏差が 5 以下の数値に多く分布していることが確認できた。このことから、偏差が 5 以下の点群が抽出されるように閾値を設けた。

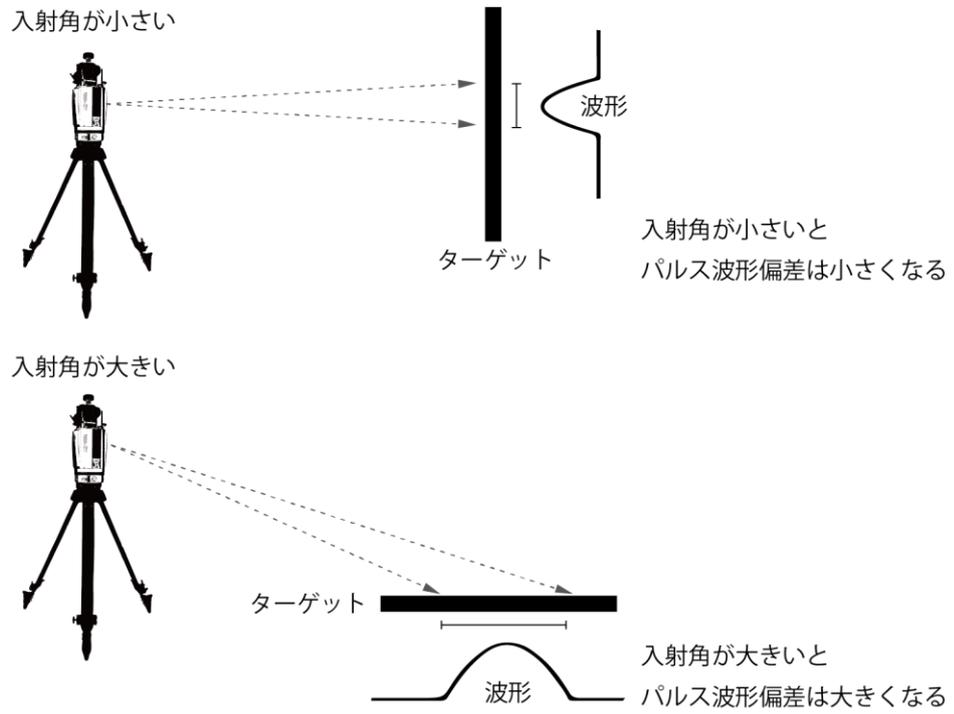


図 15 パルス波形偏差(Pulse Shape Deviation)

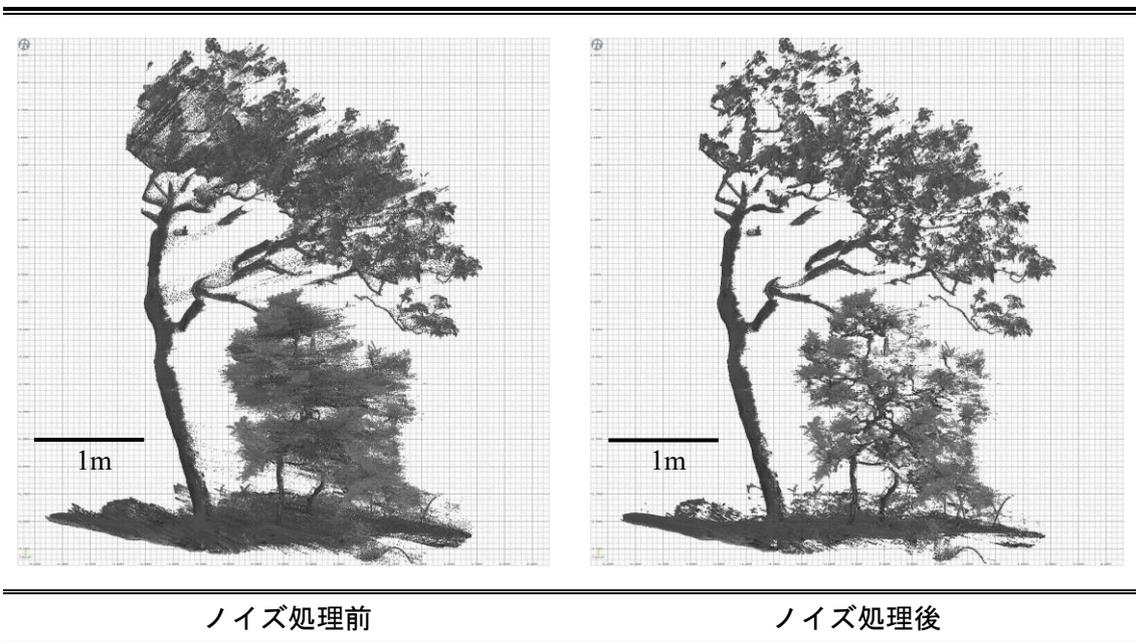


図 16 パルス波形偏差値によるノイズ処理 (偏差の設定値 30)

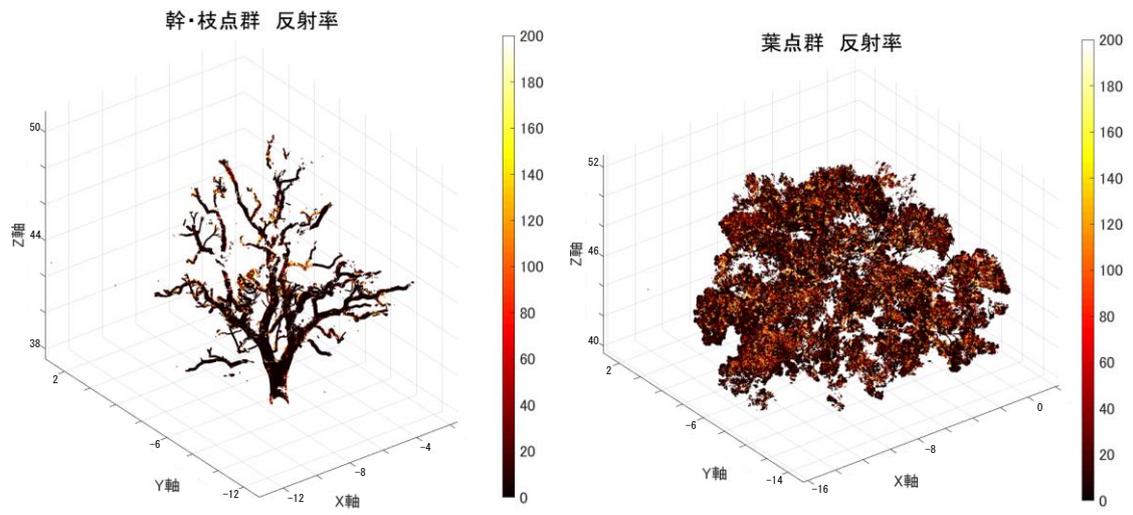
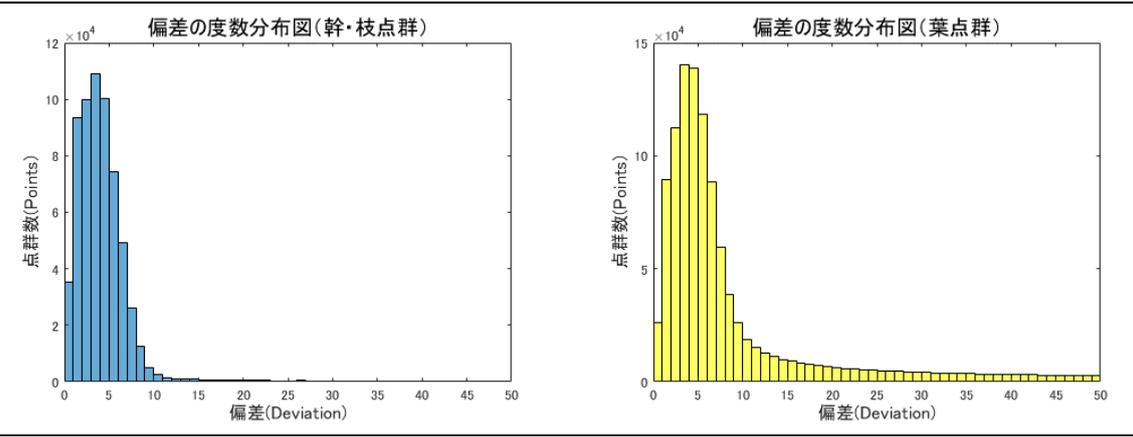


図 17 葉点群、幹・枝点群の偏差の可視化



標準偏差 17.34
 平均値 5.85

標準偏差 52.66
 平均値 30.15

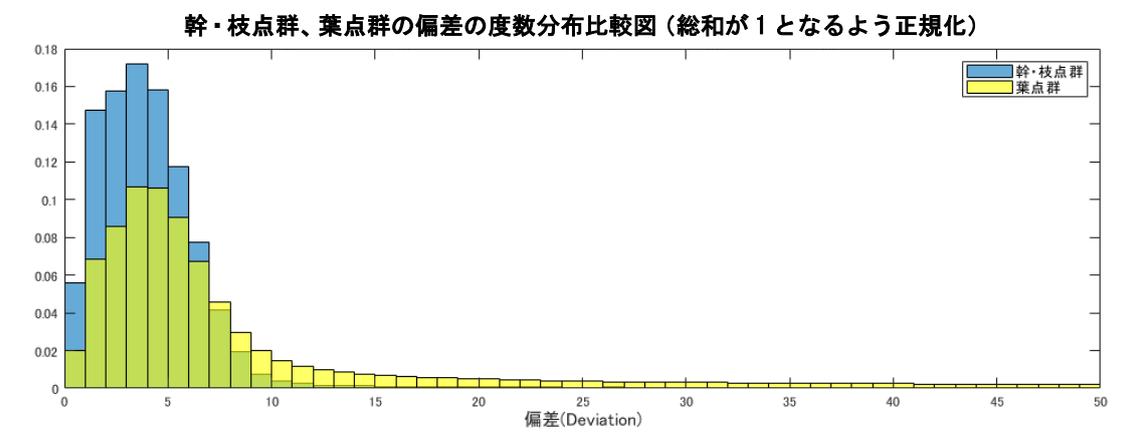


図 18 偏差のヒストグラム

3.5.3 反射率 (Reflectance) による分離処理

TLS の計測では、3次元座標情報のみを取得できるだけでなく、反射強度 (Intensity) と呼ばれる情報を取得することができる。反射強度とはレーザーパルスが対象表面で反射した際の強さを表す数値のことで¹⁷⁾、本研究で使用する TLS のレーザー波長は 1550nm であるが、この付近のレーザー波長は水に吸収されやすい特性があり、対象物によって数値が異なることが明らかとなっている⁸²⁾⁸³⁾。このことから、植生とアスファルトの反射強度の差異から植生範囲の検出をおこなうことで、自律的に刈払作業をおこなうロボットの開発や、アスファルト道路、草、家の屋根、木などの土地被覆分類において応用されている⁸⁴⁾⁸⁵⁾⁸⁶⁾。

反射強度による情報を利用した対象物の分類は、これまで多くの試みがなされてきたが、樹木の葉点群と幹・枝点群の分離にその有効性を示した事例が存在する。斎藤ら⁸⁷⁾⁸⁸⁾による研究では、マツ林での TLS による点群データの取得を行い、幹・枝と葉の反射強度には明確な差異があることに着目し、分離をおこなっている。しかしながら、斎藤らの分離手法には以下に示す問題点が存在する。

- ① 対象としている平地林がマツ林であり、極めて限定的な樹種の反射強度を用いた分離手法である。
- ② 反射強度の特性として、同対象物に対して計測距離が遠くなるにつれ、取得される数値が減少する傾向があり⁷⁸⁾、分離の精度への影響が懸念される。

①に関しては(3.5.1)で述べたように、清澄庭園には多様な樹種が植栽されていることから、樹種を限定することなく、幅広い樹種に対して反射強度を用いた分離手法の有効性を示す必要がある。②に関しては、図 19 に示すように、同樹木に対して、TLS によるスキャンポジションの距離が遠くなるにつれ、反射強度の数値 (単位は dB : デシベル) が減少していくことが分かる。このことから、葉点群と幹・枝点群の分離処理による閾値はスキャンポジションによって変化し、キャリブレーション後に反射強度を用いた処理をおこなった場合、大きな障害となることが予想される。

以上のことから、本研究では反射率(Reflectance)の情報を用いた分離手法を提案する (単位は dB : デシベル)。反射率とは、対象物の測定された反射強度を距離によって校正を加えたものであり、これによって距離に依存しない反射強度値を取得することができる⁸⁹⁾。そのため、樹木点群の分離処理をより高精度に行うことが可能と考えた。そこで、清澄庭園の対象エリアに存在する樹木 (樹高 3m 以上) を樹種ごとに、葉点群と幹・枝点群の反射率の可視化とヒストグラムによる解析をおこなうことで、その両点群の反射率の差異を明らかにした (図 20)。

樹種に応じた反射率の解析の結果、ハナミズキとスダジイ以外の樹種には明確な差異があることが判明した。また、葉点群と幹・枝点群の度数分布による比較をおこなった結果、-7dB ~ -5dB 辺りで両点群の反射率が分岐していることが判明した。そこで、本研究

では-5.5dB以上の反射率値が抽出されるように閾値を設けた。図21に処理後の各エリアの場所の表記と、図22に対象エリアの各エリアでの偏差と反射率の閾値による抽出結果を示す。なお、図22の反射率値による処理前の図であるが、偏差による閾値(設定値5)を設けた処理後のものである。

ハナミズキとスダジイに葉点群と幹・枝点群の反射率値の差異が見られなかった理由として、主要な2点を述べる。まず1つ目に、ハナミズキの計測時、幹・枝部に苔が全体的に付着している状態であったため、得られる反射率が、葉の反射率との差異に影響を与えている可能性が考えられる。2つ目の理由として、スダジイは明確な差異が見られたクスノキやハゼノキなどの葉と比較して、硬質な葉を有しており、幹・枝部との反射率の差異に影響を与えている可能性がある。以上のことを考えると、反射率を用いた葉点群と幹・枝点群の分離は、計測時の樹木の状態や樹種などによって有効的な手法と成り得ないことが懸念されるが、反射率を用いた樹木の解析手法としての発展性に期待することができる。

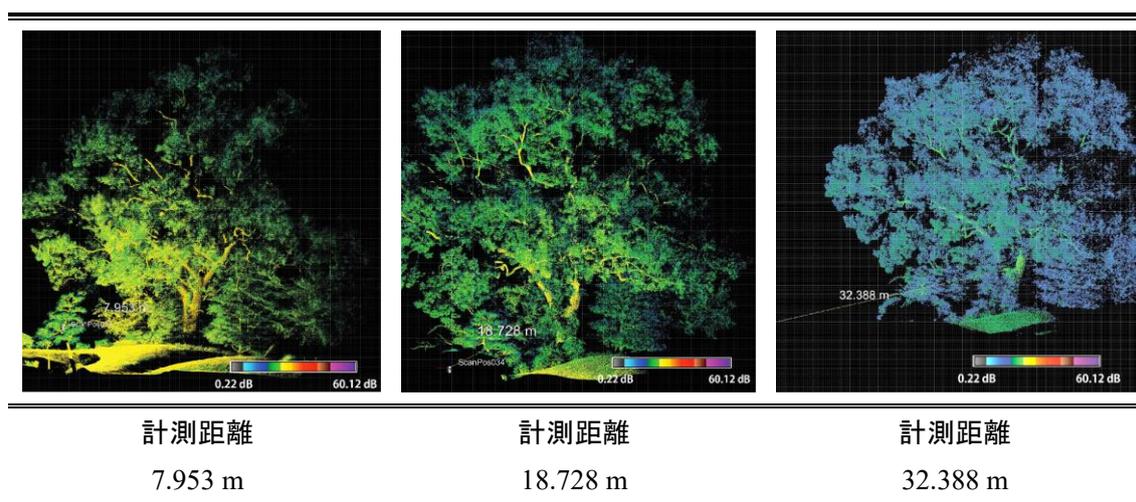


図19 同対象物への計測による反射強度の距離による影響

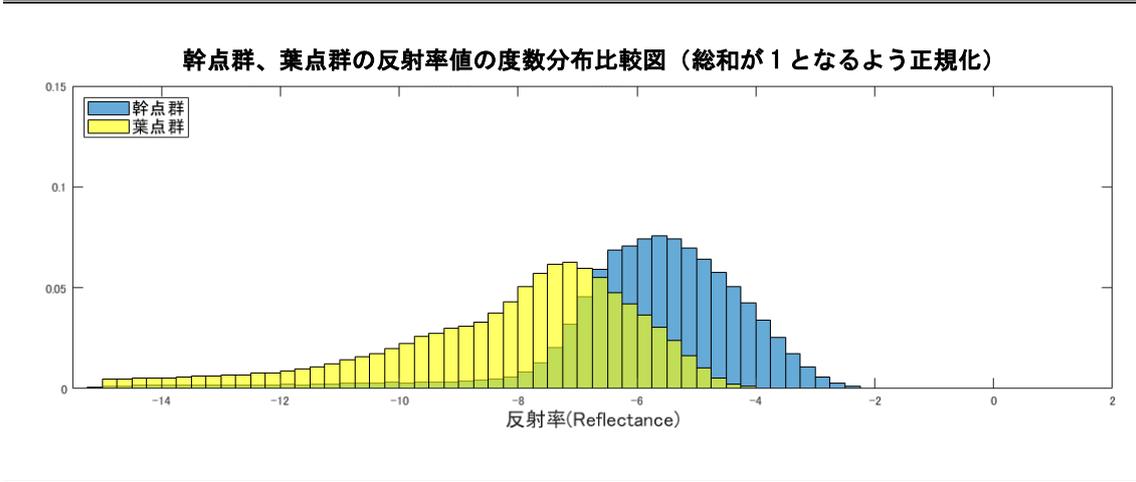
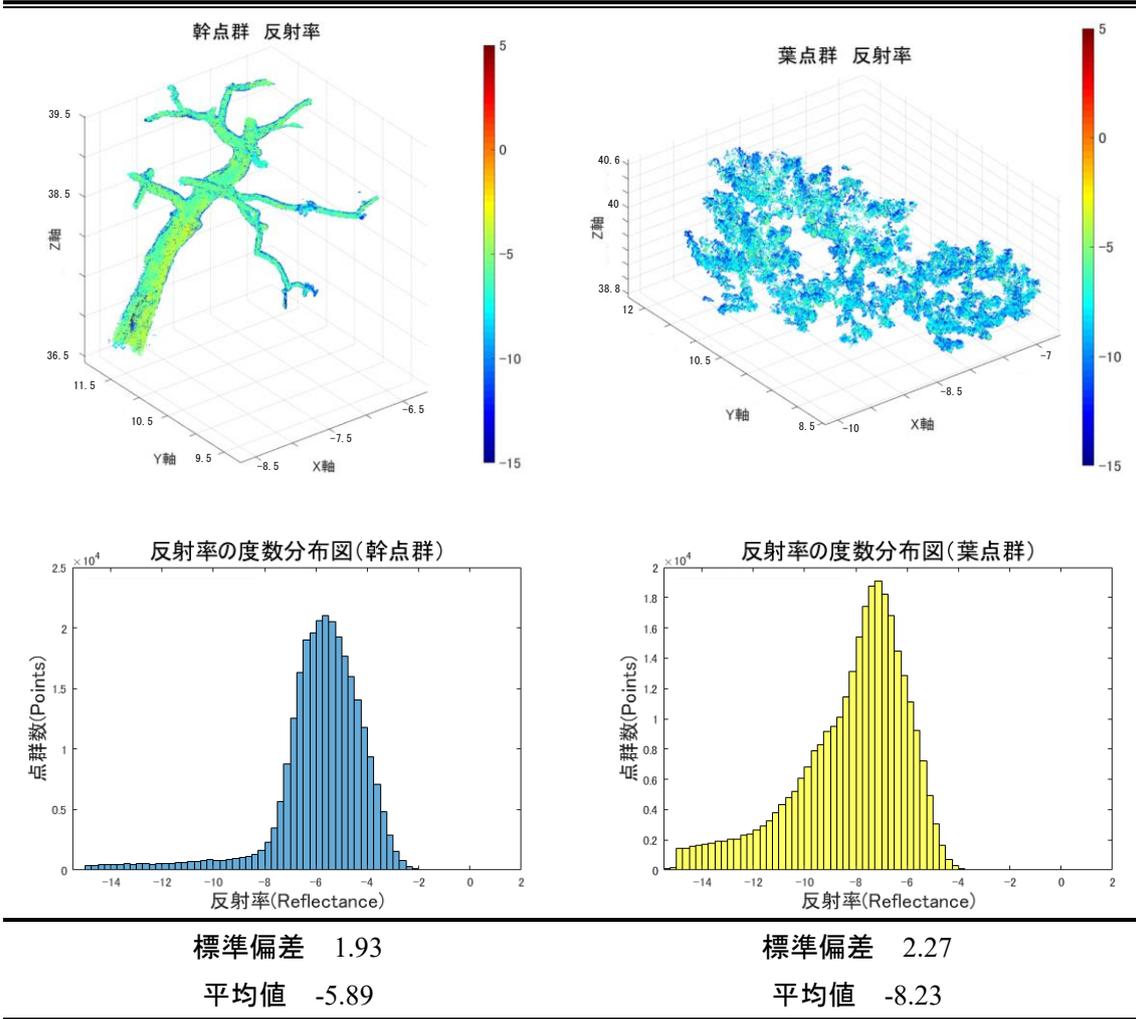


図 20 (a) ウメ

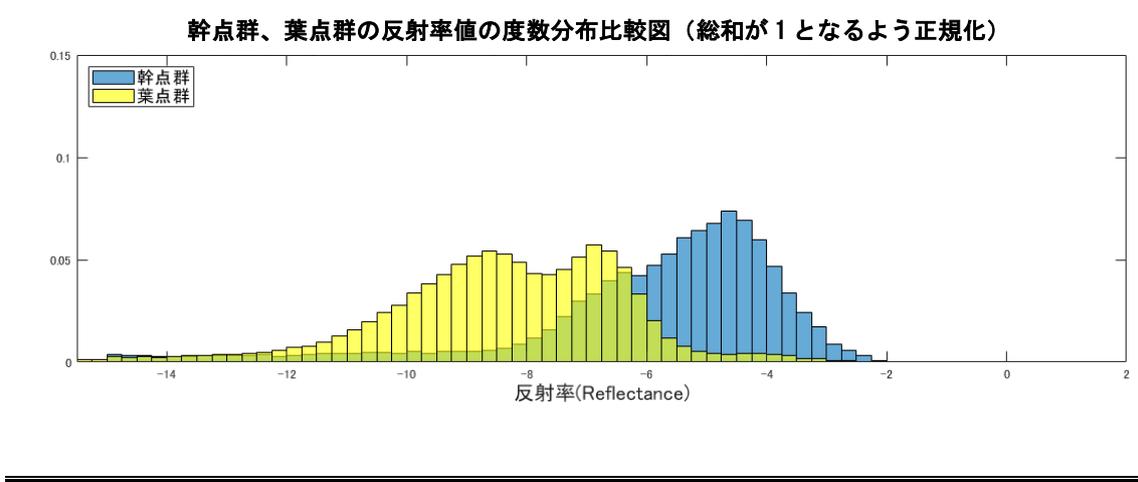
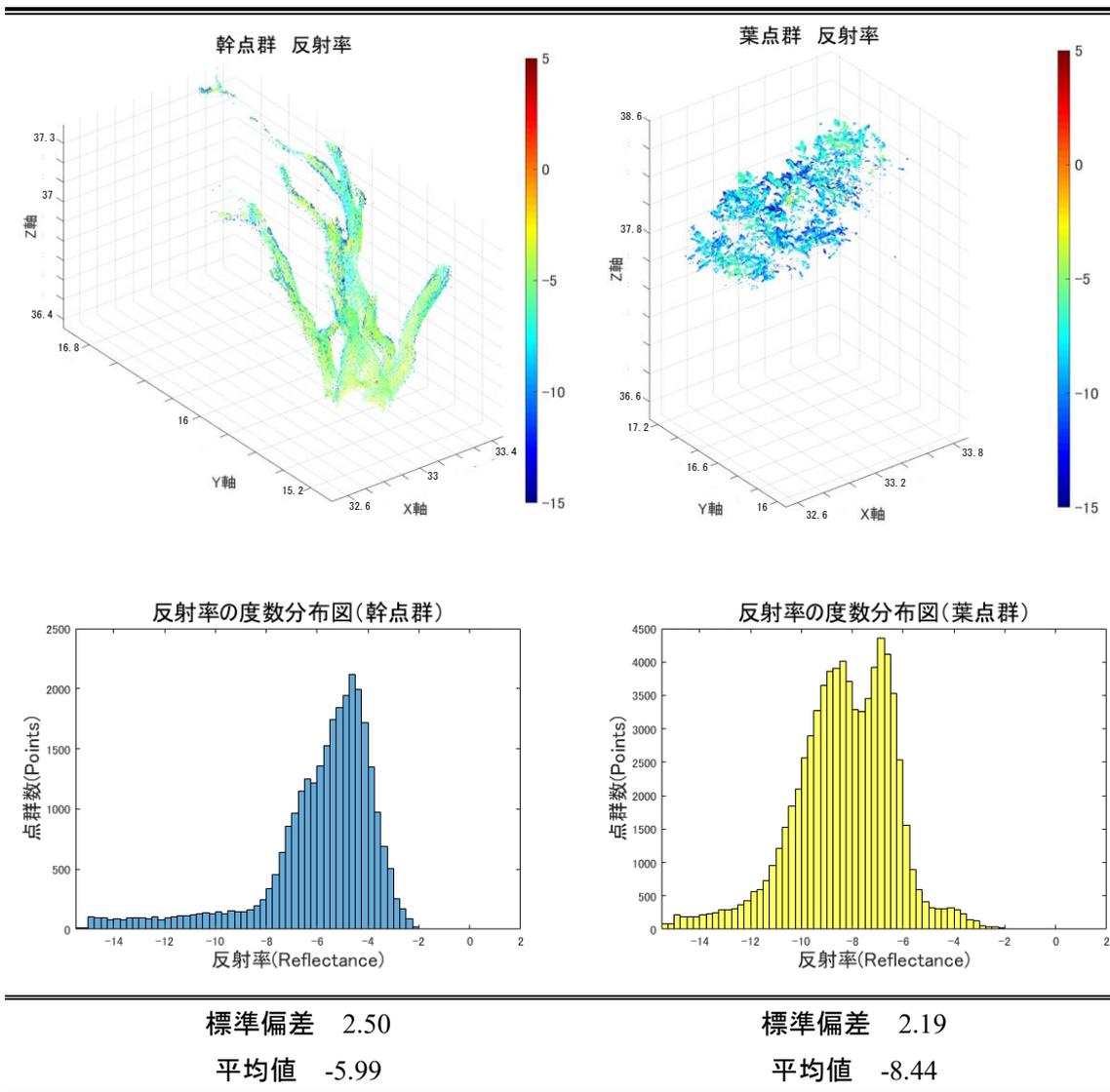
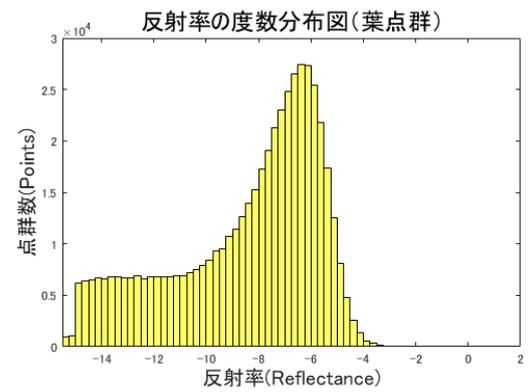
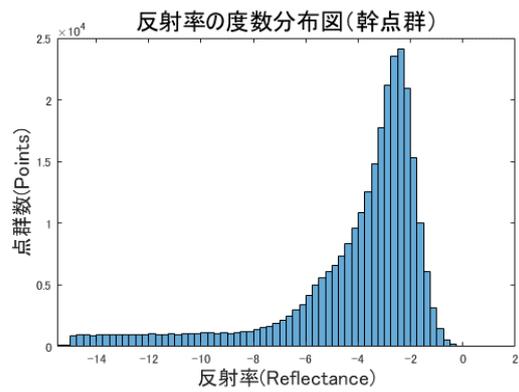
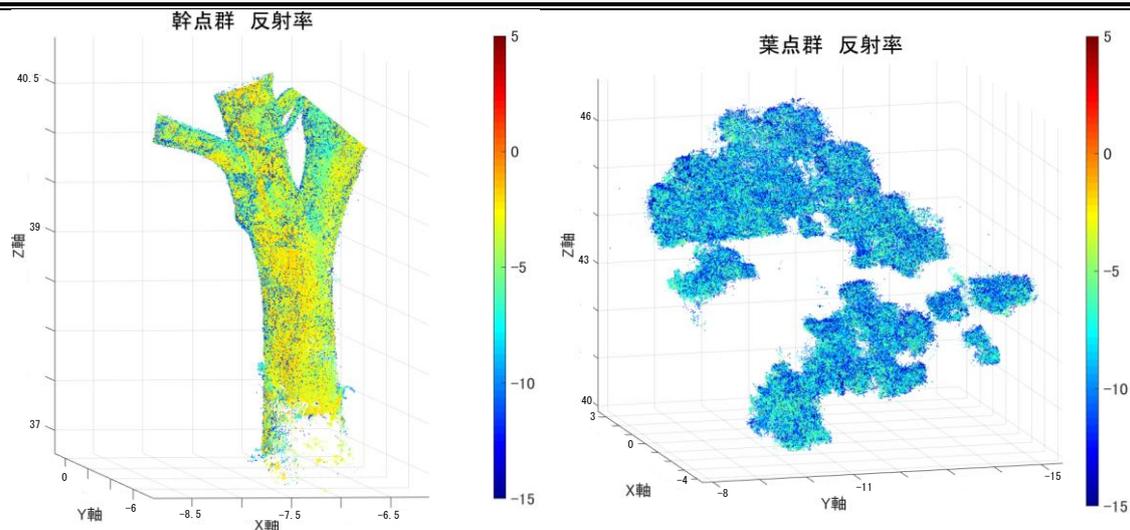


図 20 (b) キンモクセイ



標準偏差 3.10

平均値 -4.30

標準偏差 2.96

平均値 -8.61

幹点群、葉点群の反射率値の度数分布比較図 (総和が1となるよう正規化)

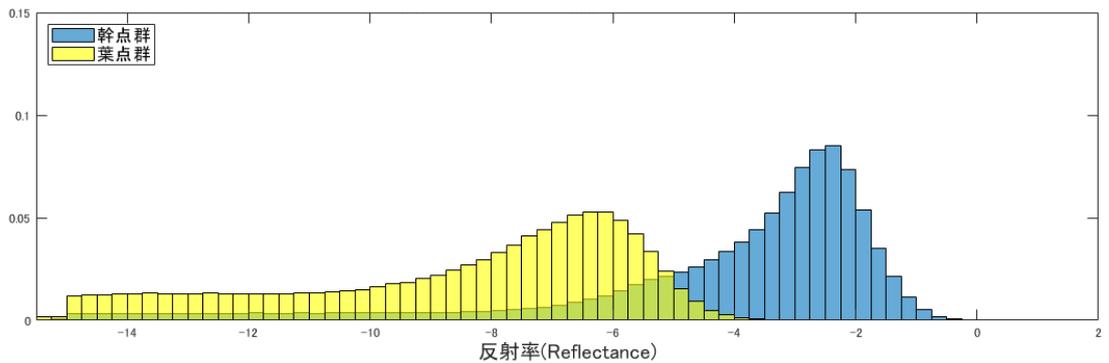


図 20 (c) クスノキ

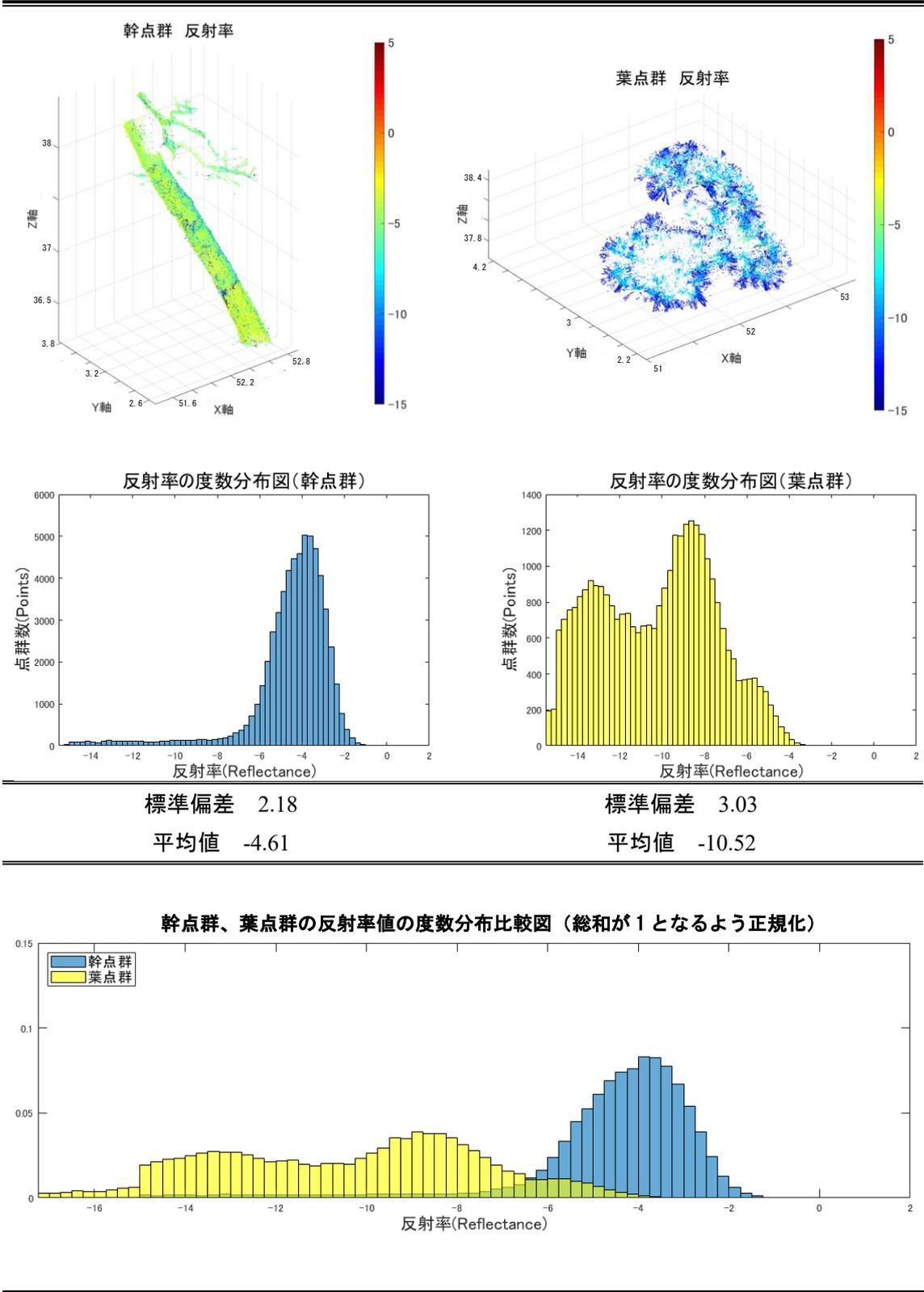
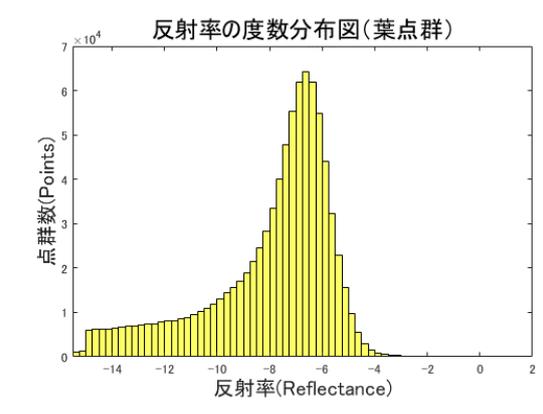
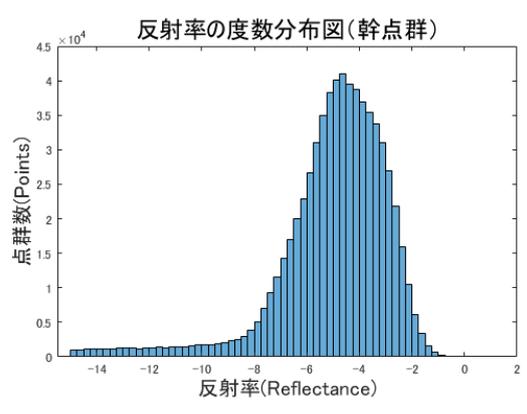
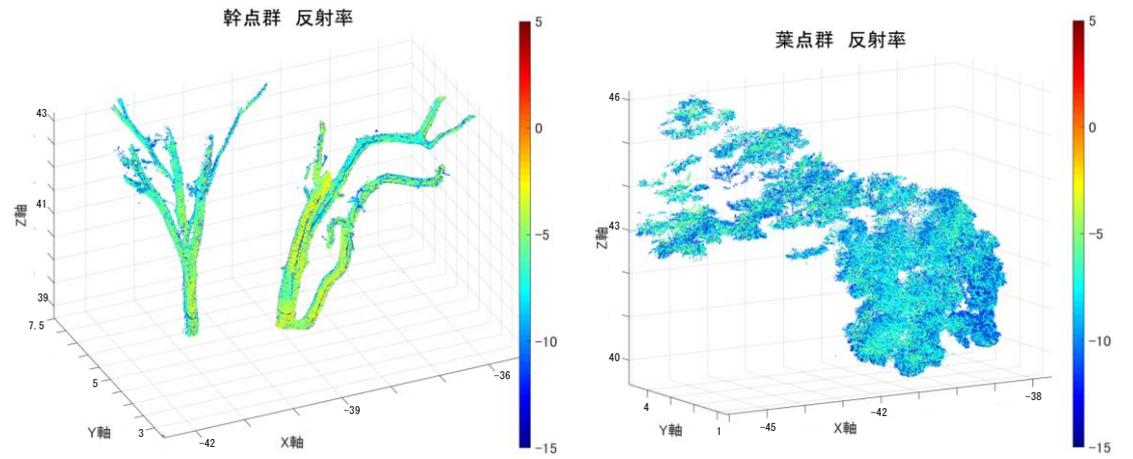


図 20 (d) クロマツ



標準偏差 2.19
 平均値 -5.03

標準偏差 2.65
 平均値 -8.15

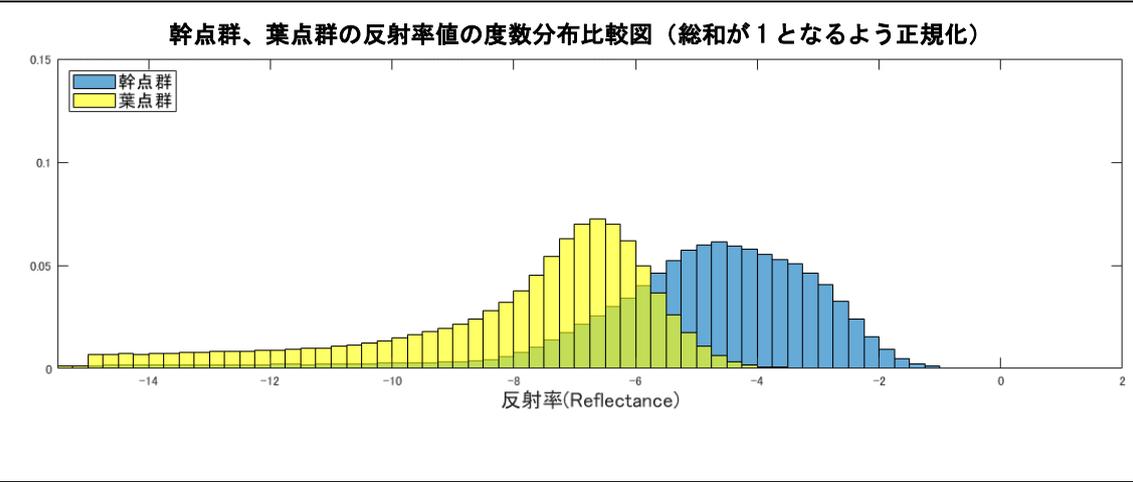
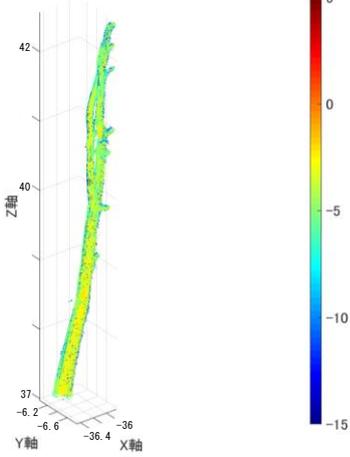
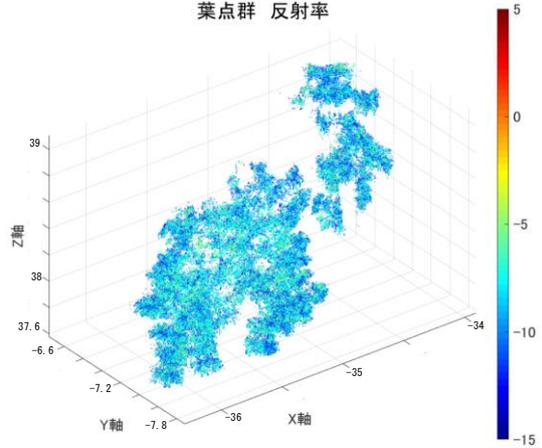


図 20 (e) ケヤキ

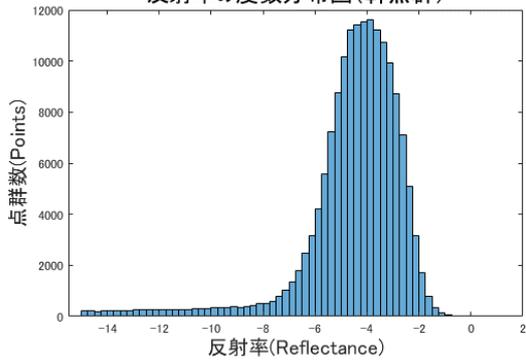
幹点群 反射率



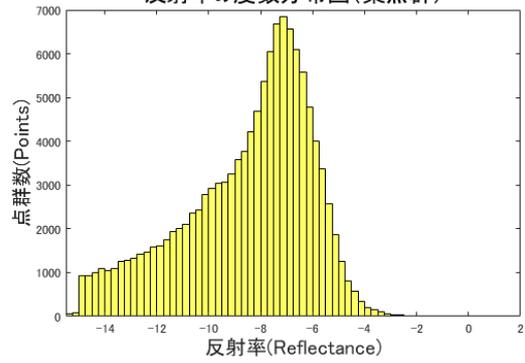
葉点群 反射率



反射率の度数分布図(幹点群)



反射率の度数分布図(葉点群)



標準偏差 2.01

平均値 -4.54

標準偏差 2.53

平均値 -8.56

幹点群、葉点群の反射率値の度数分布比較図 (総和が1となるよう正規化)

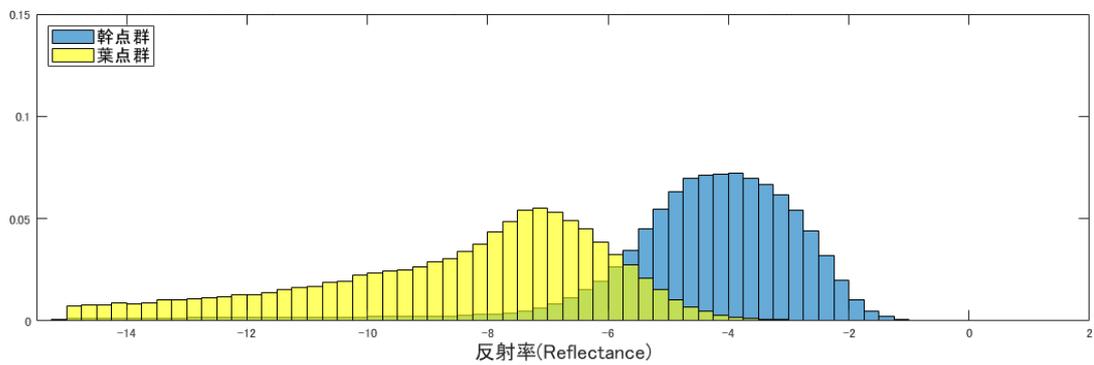


図 20 (f) クロガネモチ

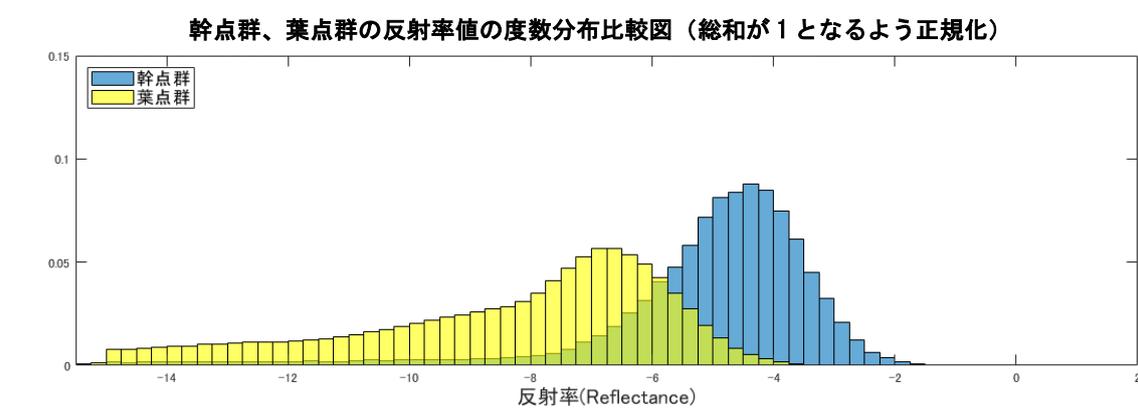
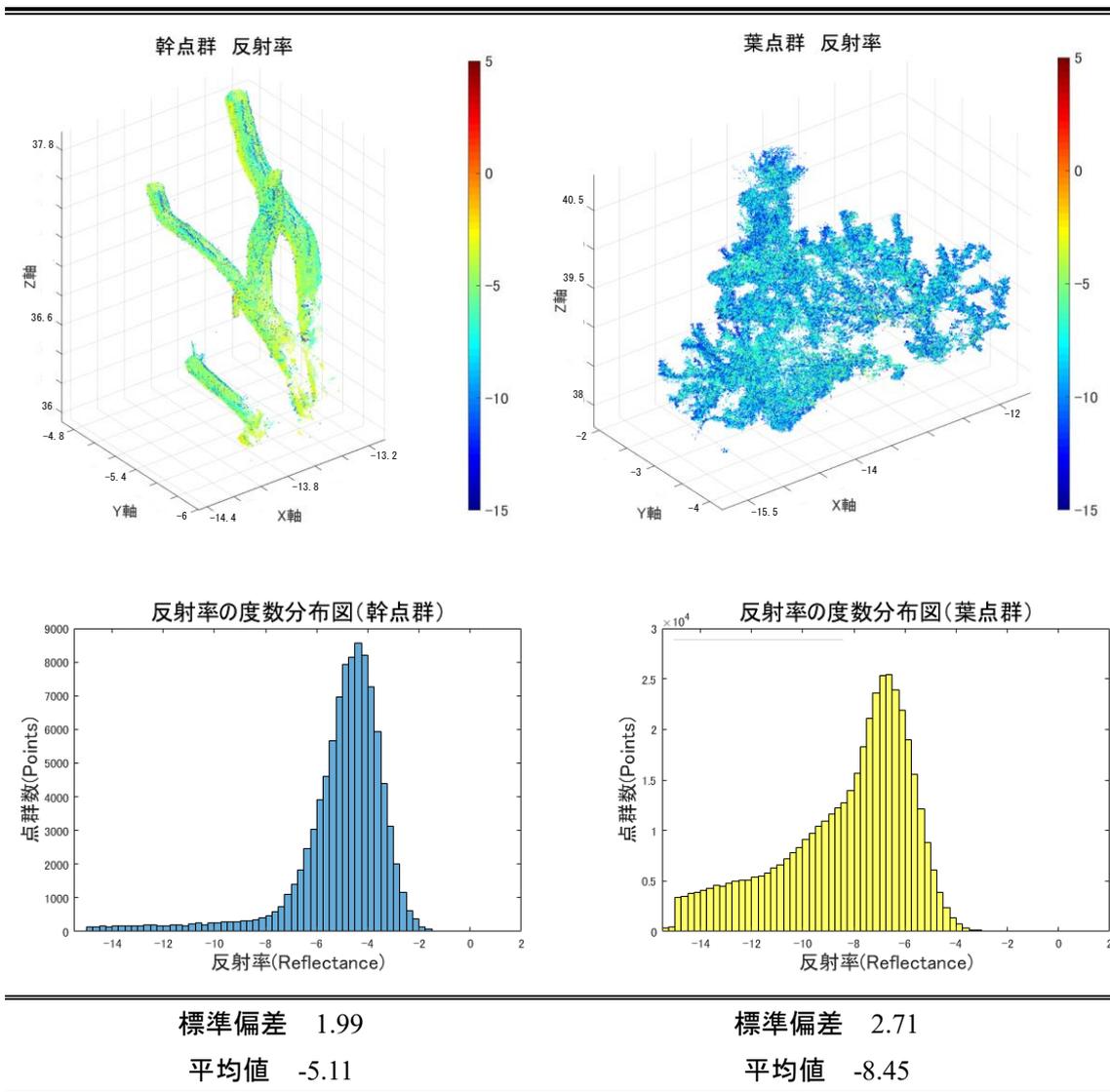
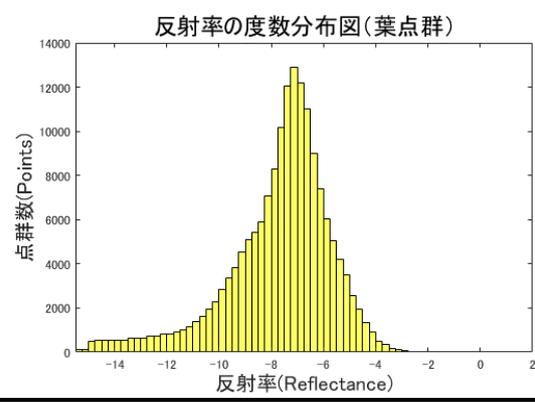
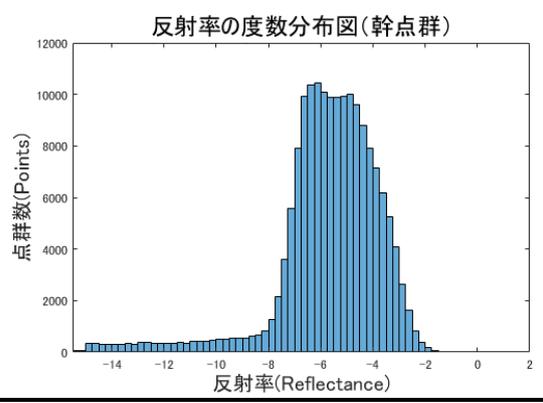
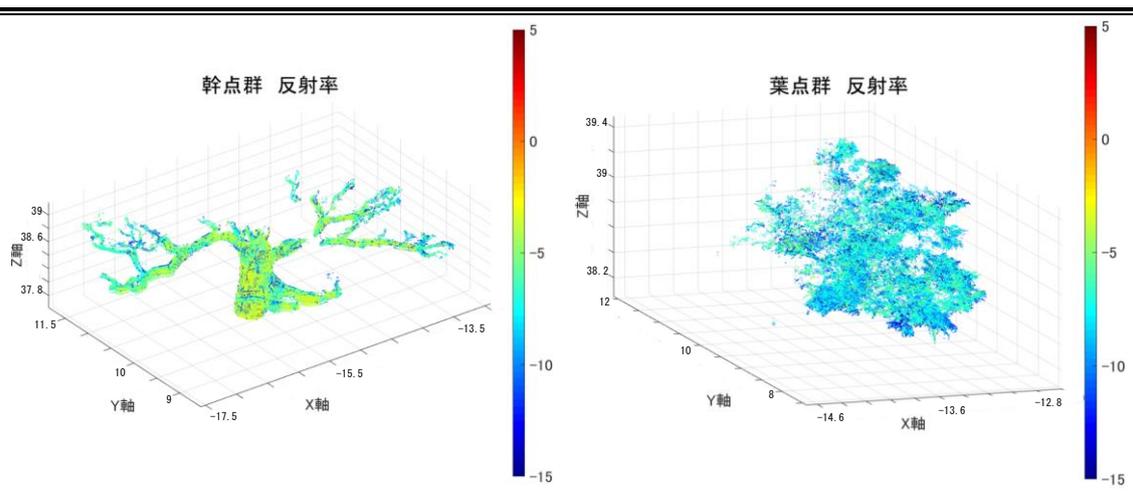


図 20 (g) ザクロ



標準偏差 2.20
 平均値 -5.76

標準偏差 2.36
 平均値 -7.86

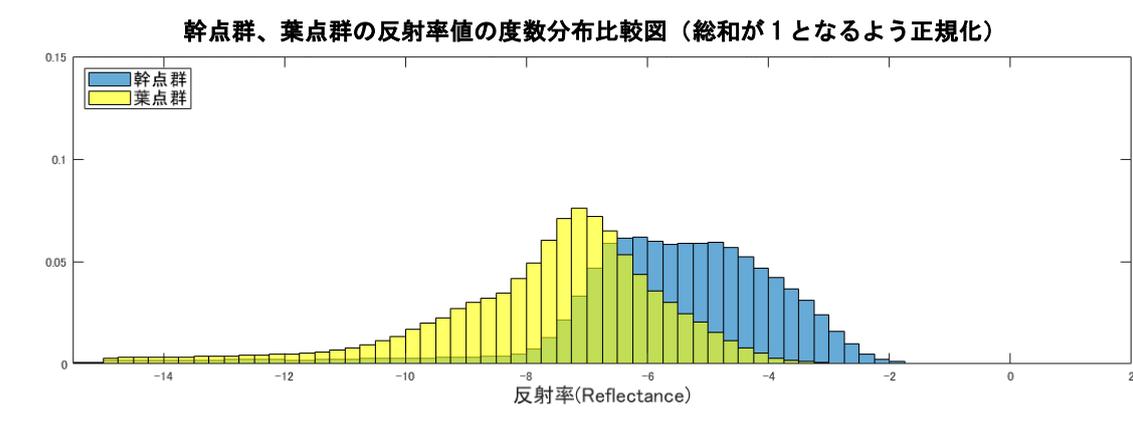


図 20 (h) スダジイ

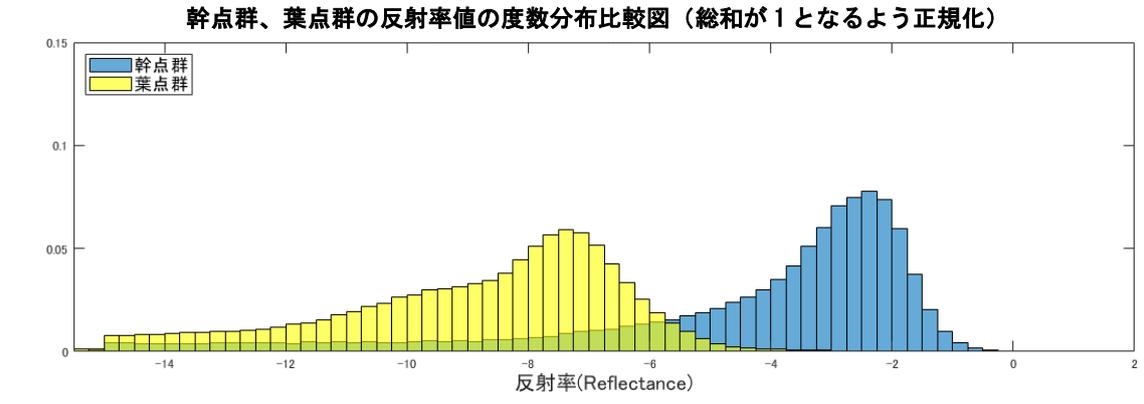
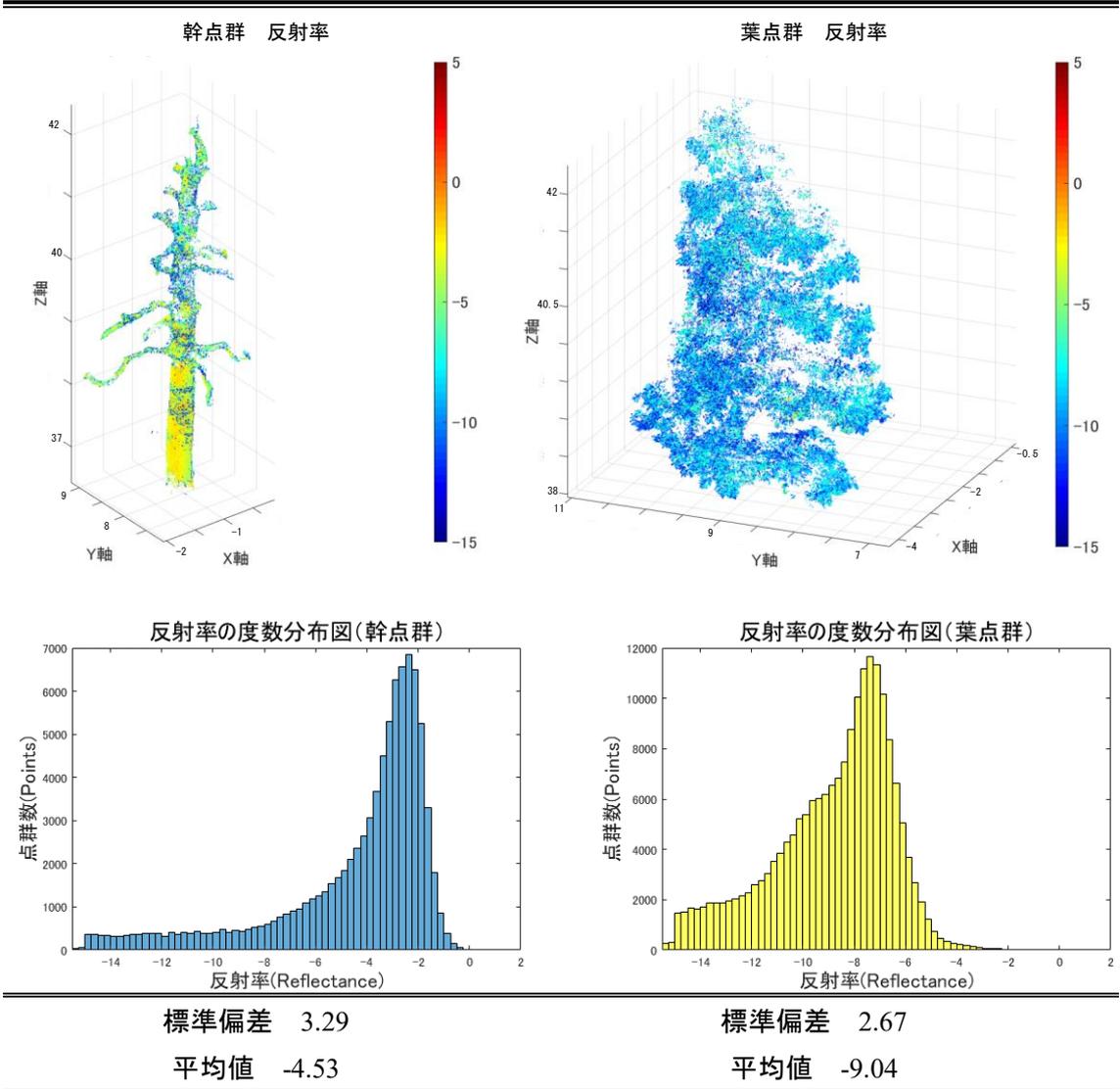
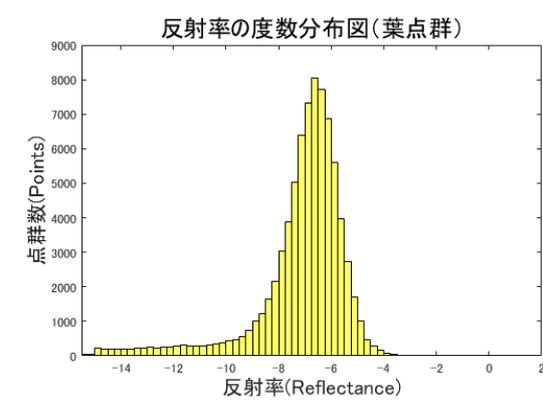
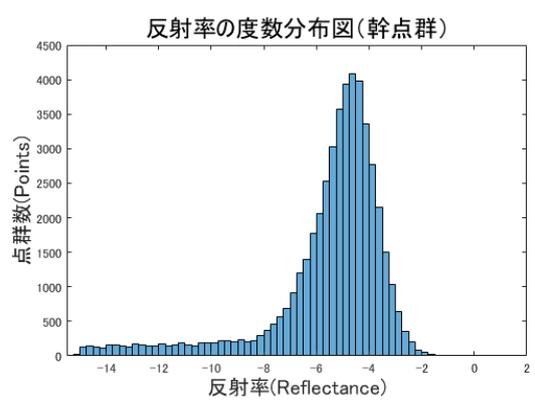
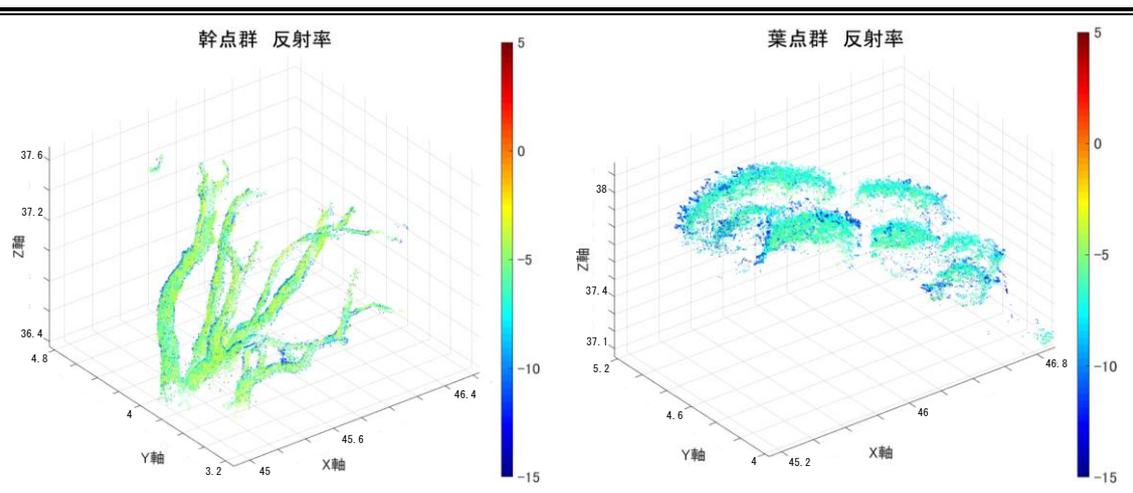


図 20 (i) タブノキ



標準偏差 2.33
 平均値 -5.58

標準偏差 1.92
 平均値 -7.20

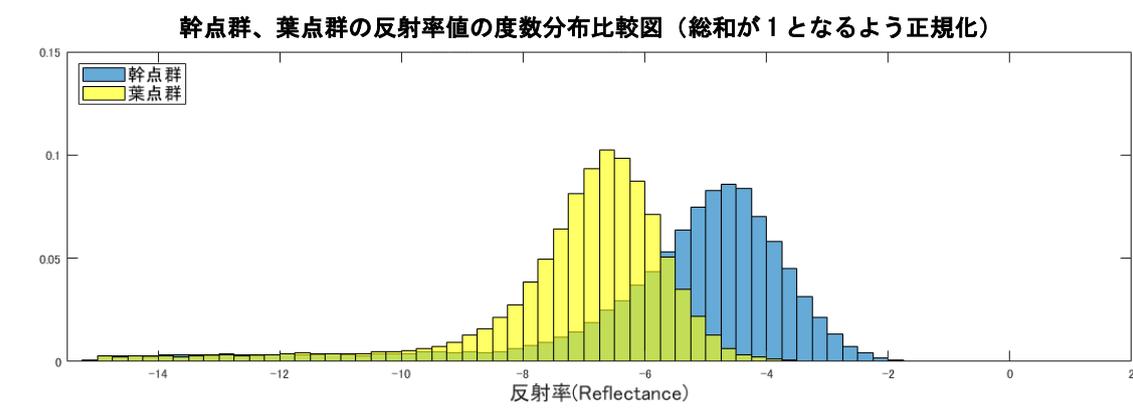
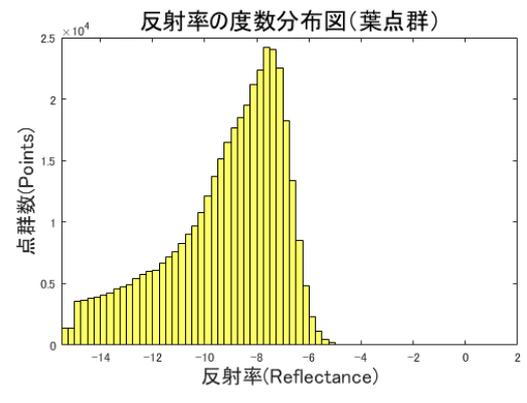
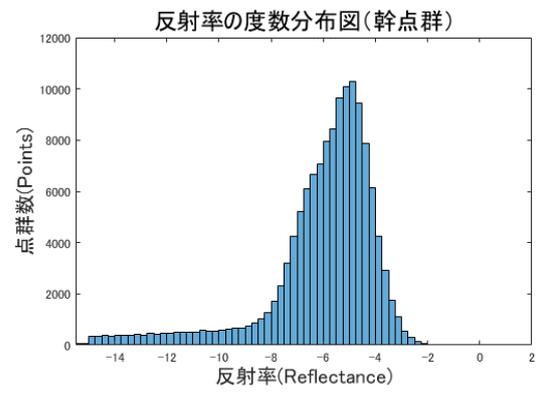
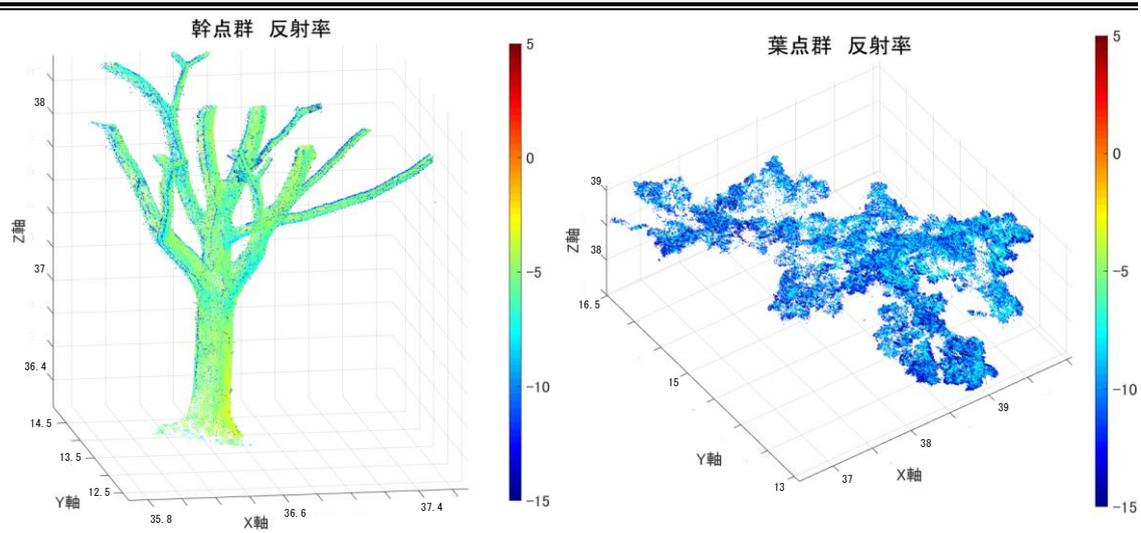


図 20 (j) ドウダンツツジ



標準偏差 2.30
 平均値 -6.12

標準偏差 2.73
 平均値 -9.61

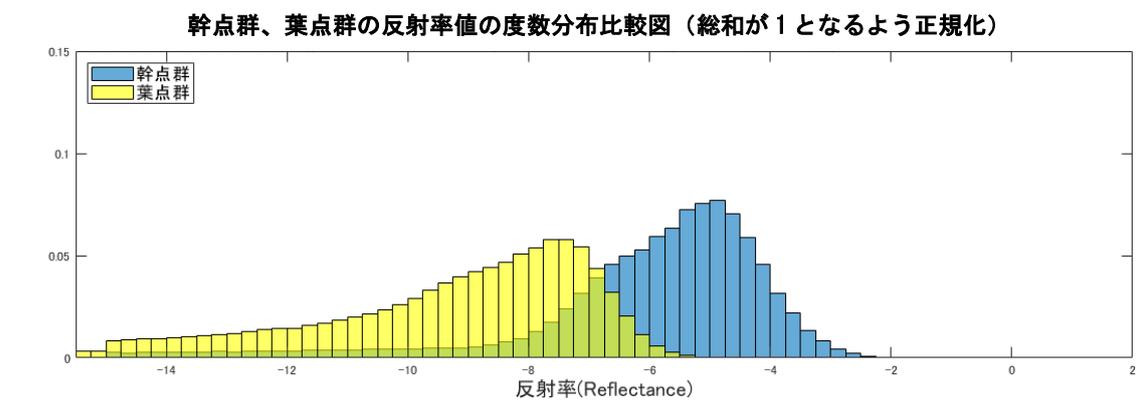
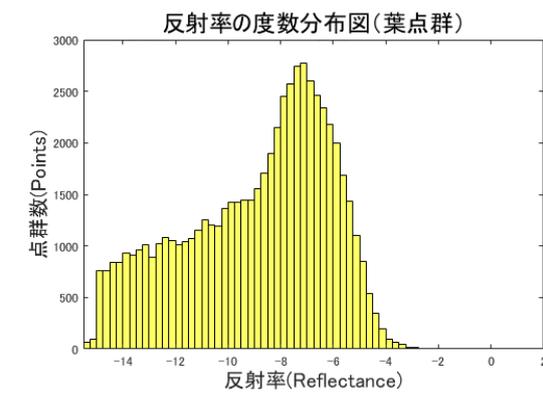
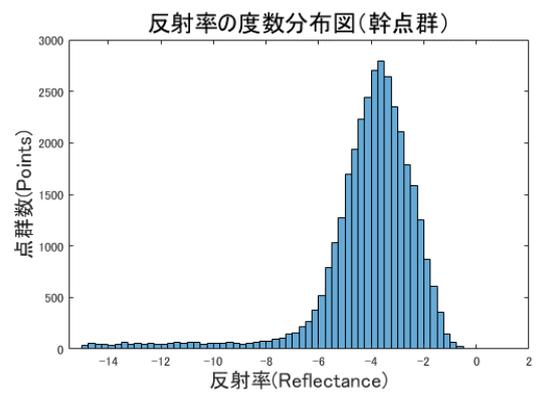
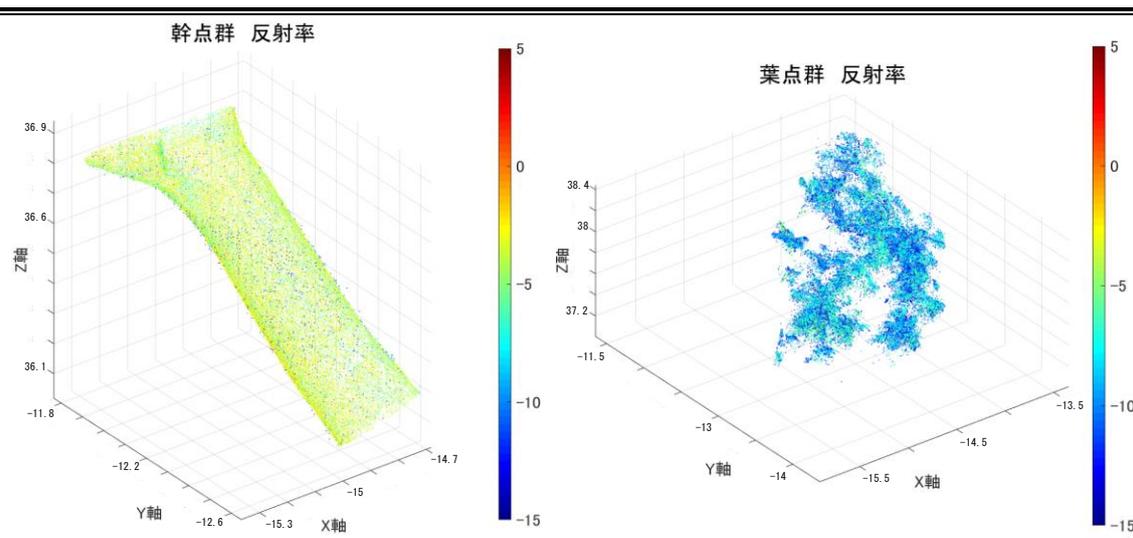


図 20 (k) イロハカエデ



標準偏差 2.04
 平均値 -4.13

標準偏差 2.93
 平均値 -9.06

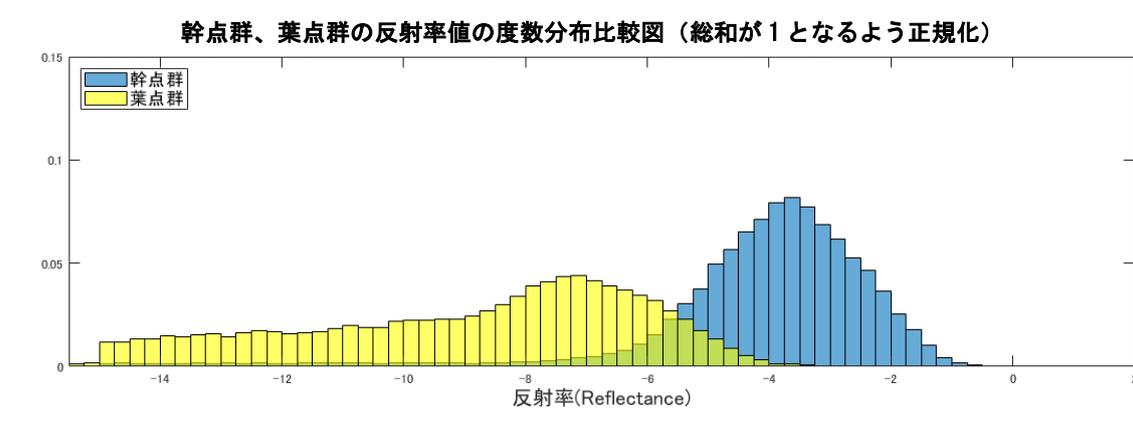
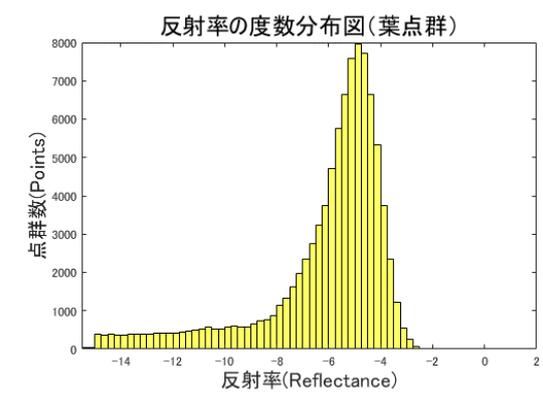
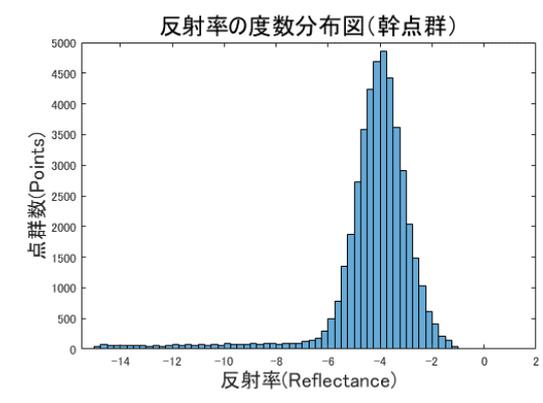
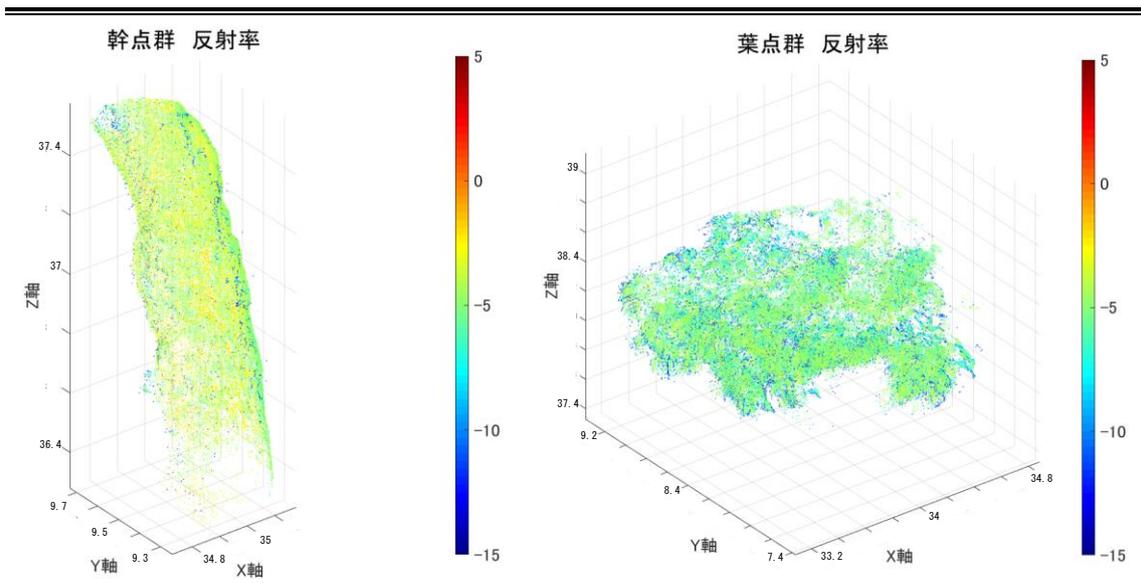


図 20 (1) ハゼノキ



標準偏差 1.89
 平均値 -4.33

標準偏差 2.55
 平均値 -6.18

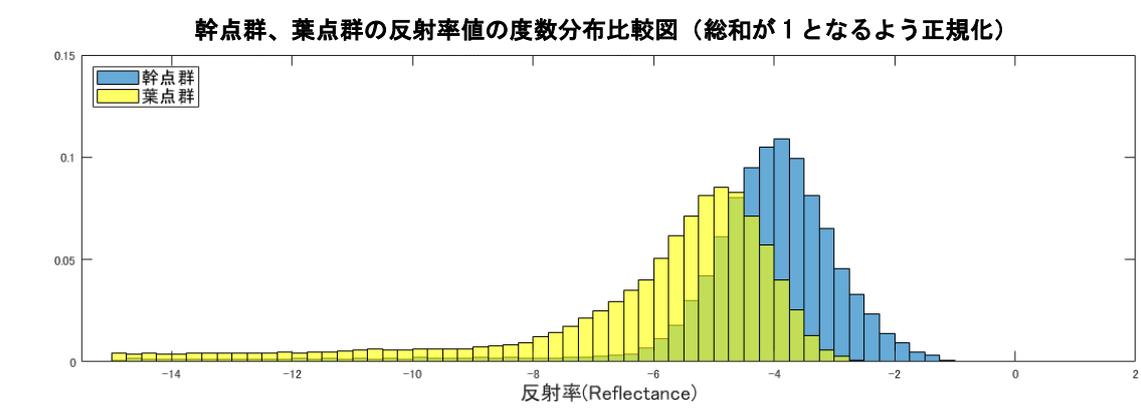
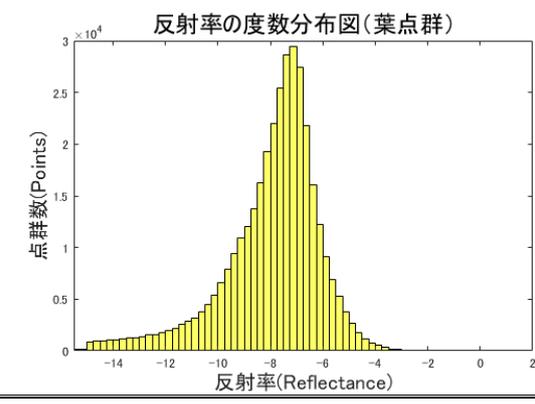
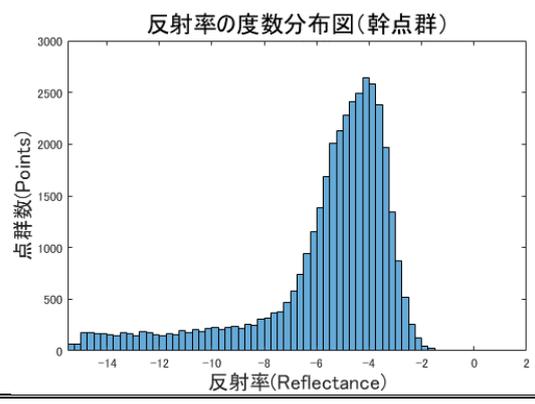
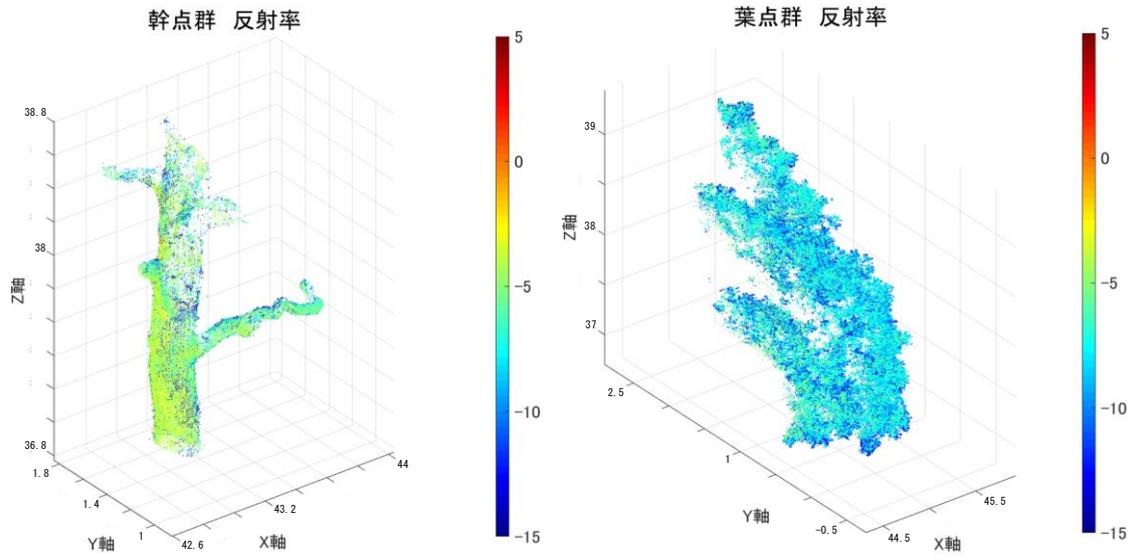


図 20 (m) ハナミズキ



標準偏差 3.38
 平均値 -6.04

標準偏差 1.92
 平均値 -7.97

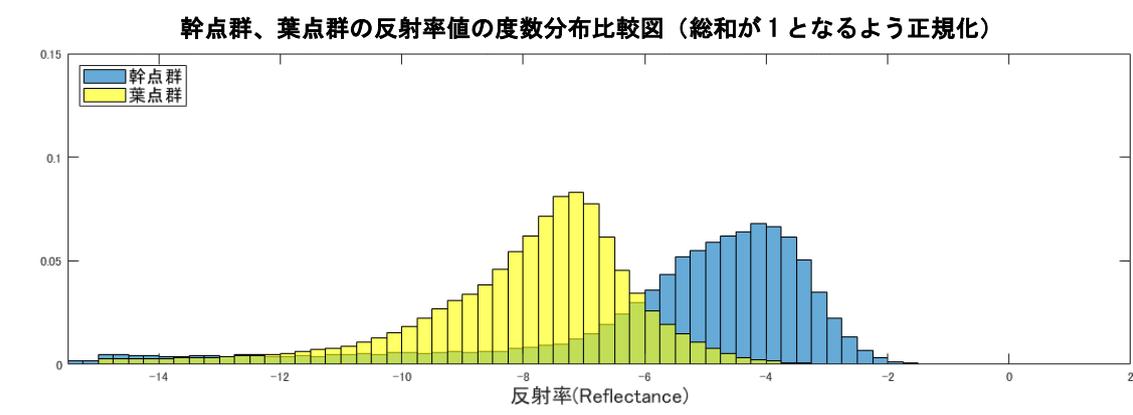
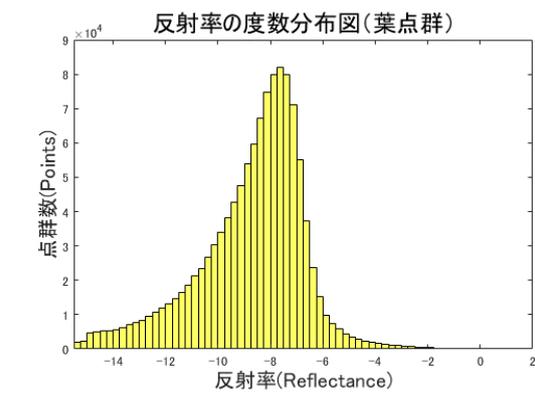
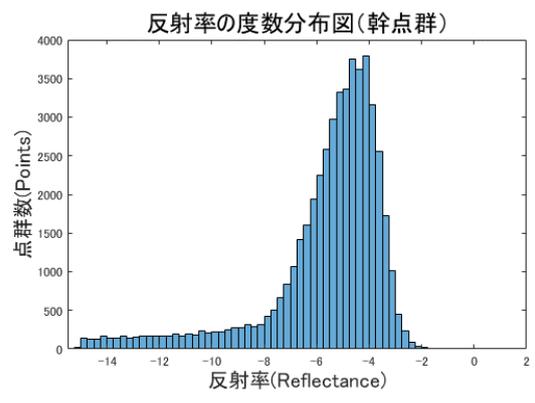
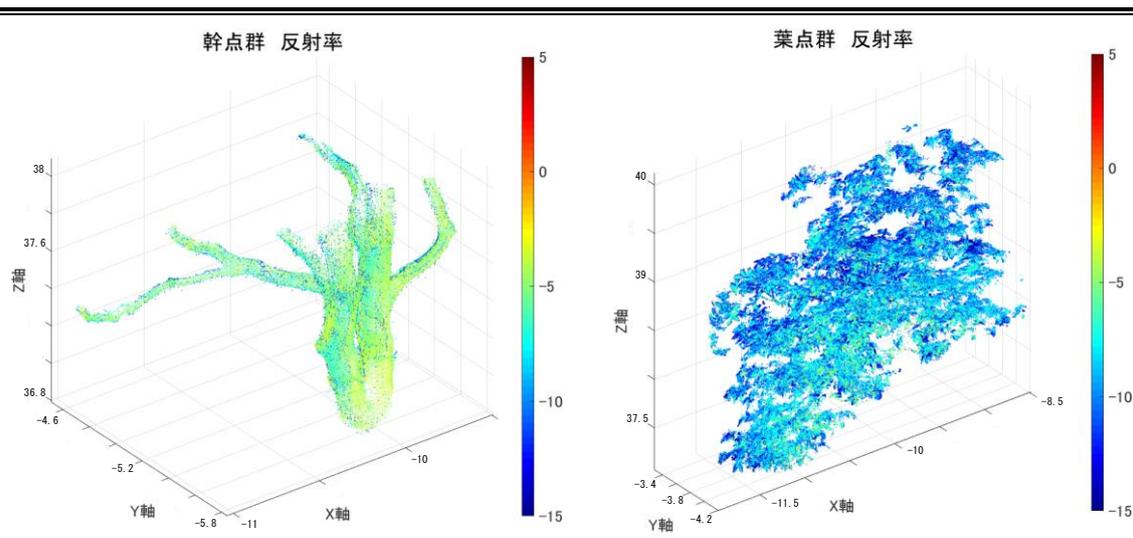


図 20 (n) モチノキ



標準偏差 2.41
 平均値 -5.70

標準偏差 2.26
 平均値 -8.84

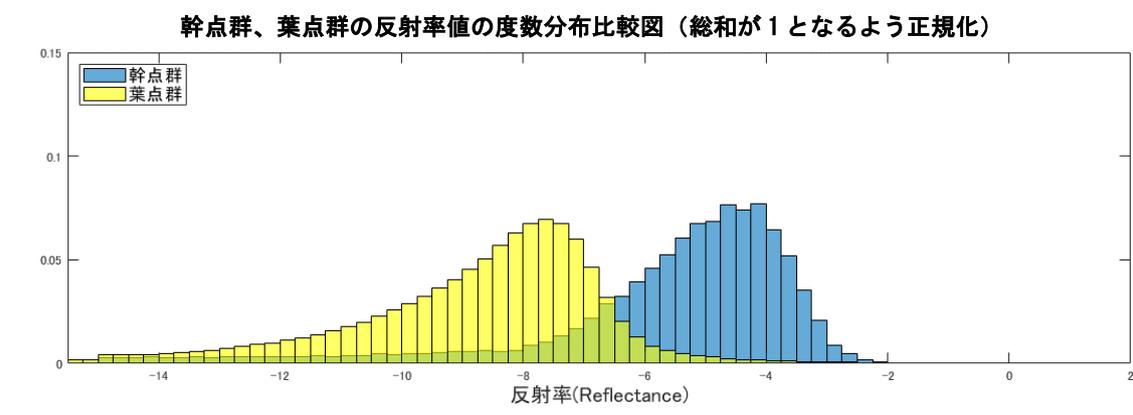
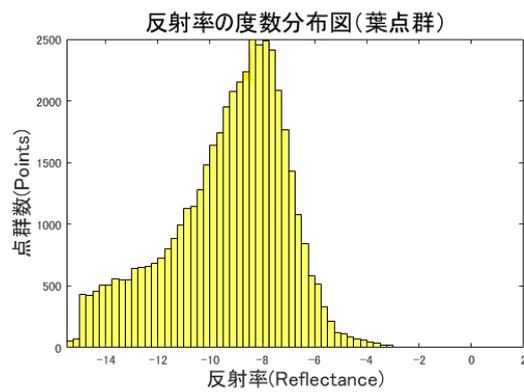
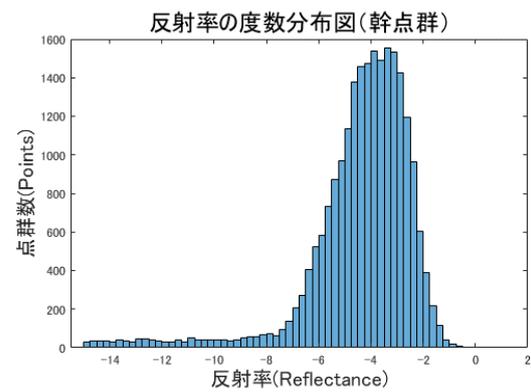
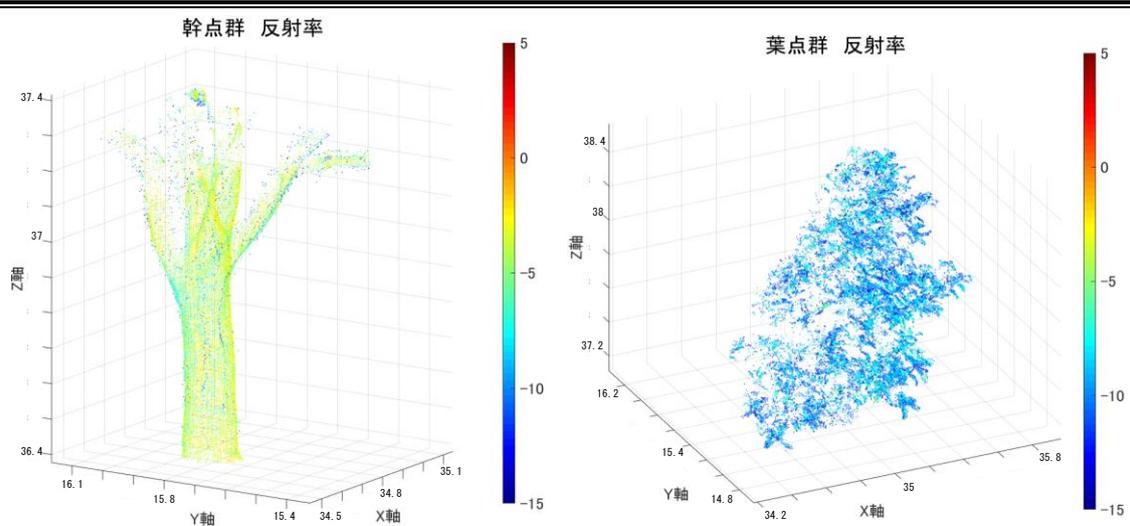


図 20 (o) モッコク



標準偏差 2.14

平均値 -4.43

標準偏差 2.51

平均値 -9.50

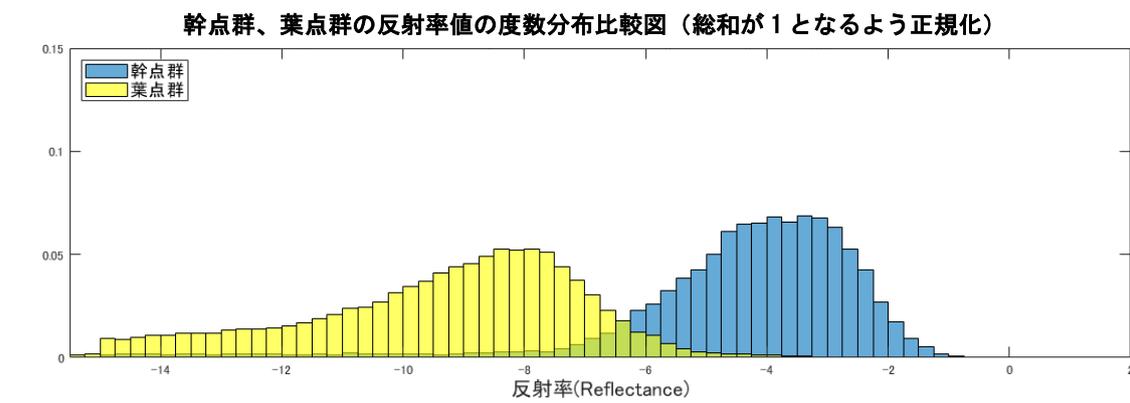


図 20 (p) ヤブツバキ

図 20 樹種ごとの反射率値の解析結果

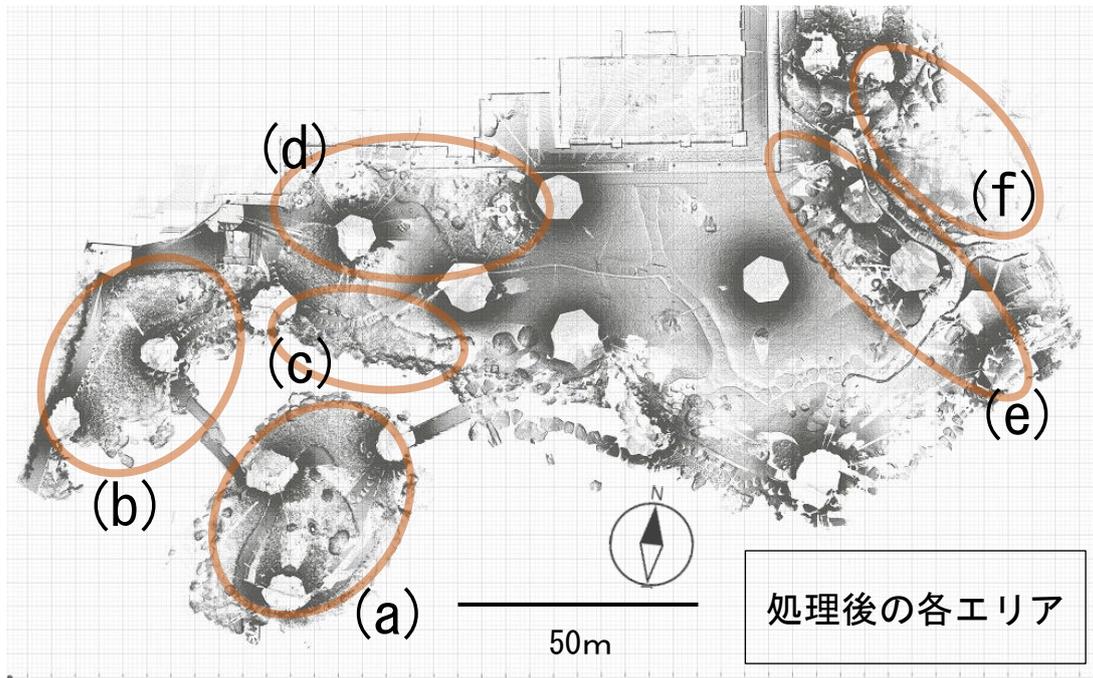


図 21 処理後の各エリア

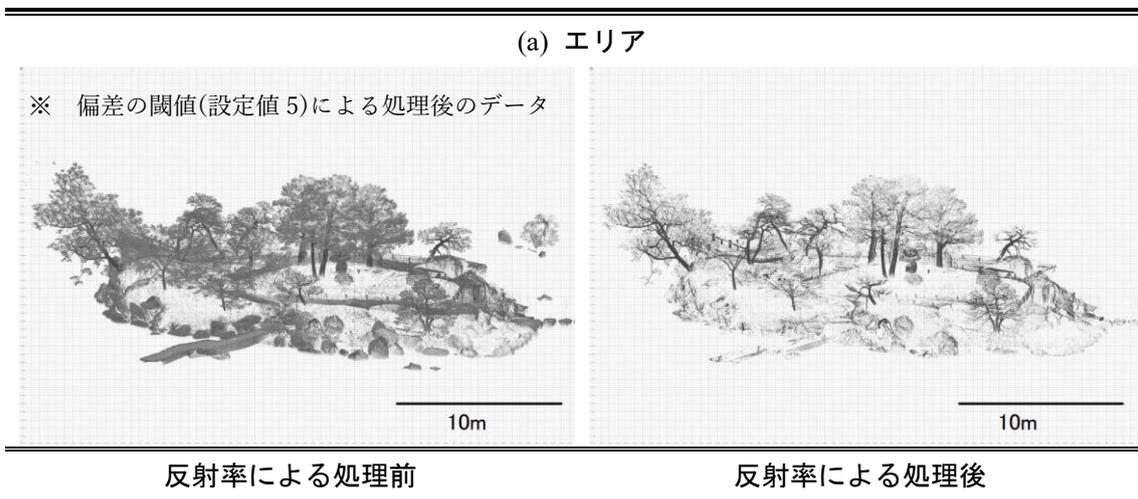
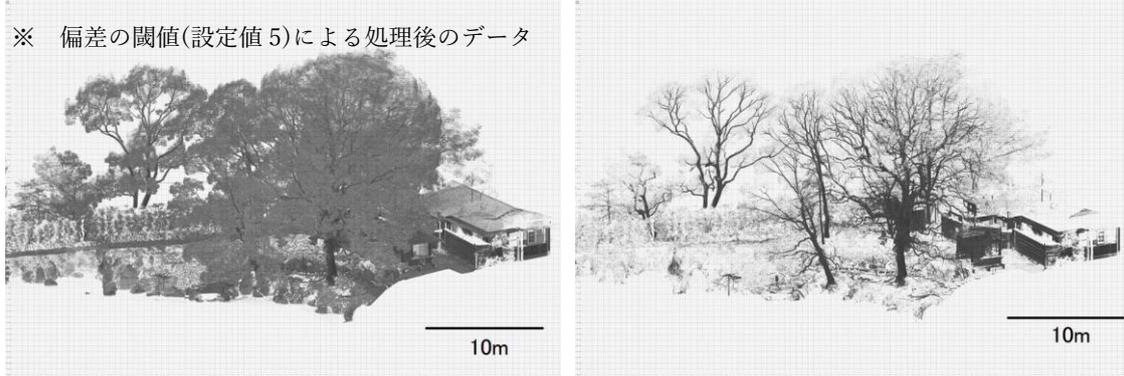


図 22 (a) 偏差および反射率による処理結果

(b)エリア

※ 偏差の閾値(設定値 5)による処理後のデータ



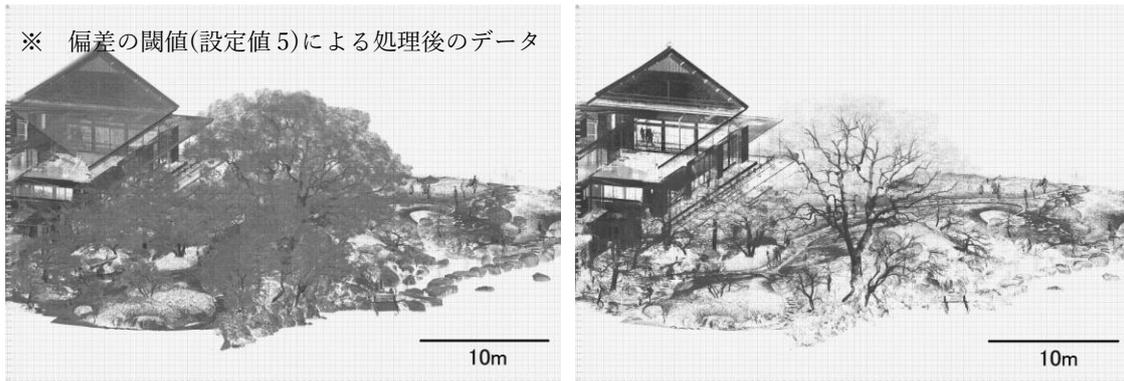
反射率による処理前

反射率による処理後

図 22 (b) 偏差および反射率による処理結果

(c)(d)エリア

※ 偏差の閾値(設定値 5)による処理後のデータ



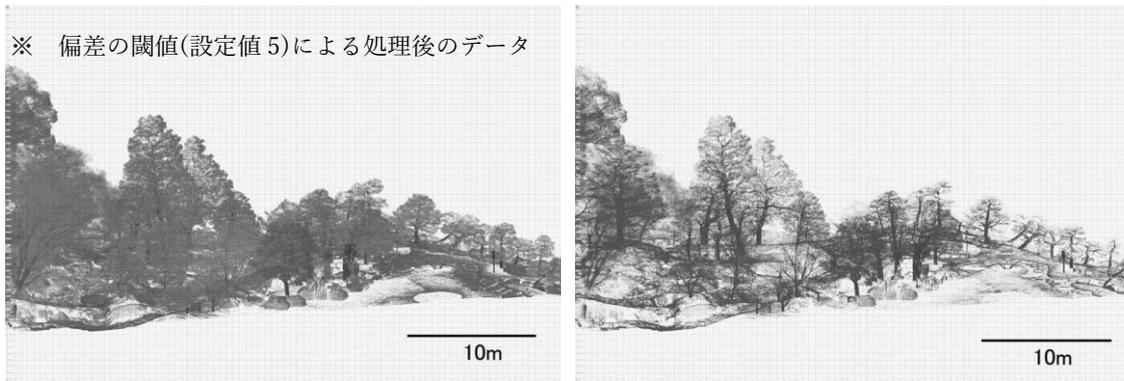
反射率による処理前

反射率による処理後

図 22 (c) 偏差および反射率による処理結果

(e)(f)エリア

※ 偏差の閾値(設定値 5)による処理後のデータ



反射率による処理前

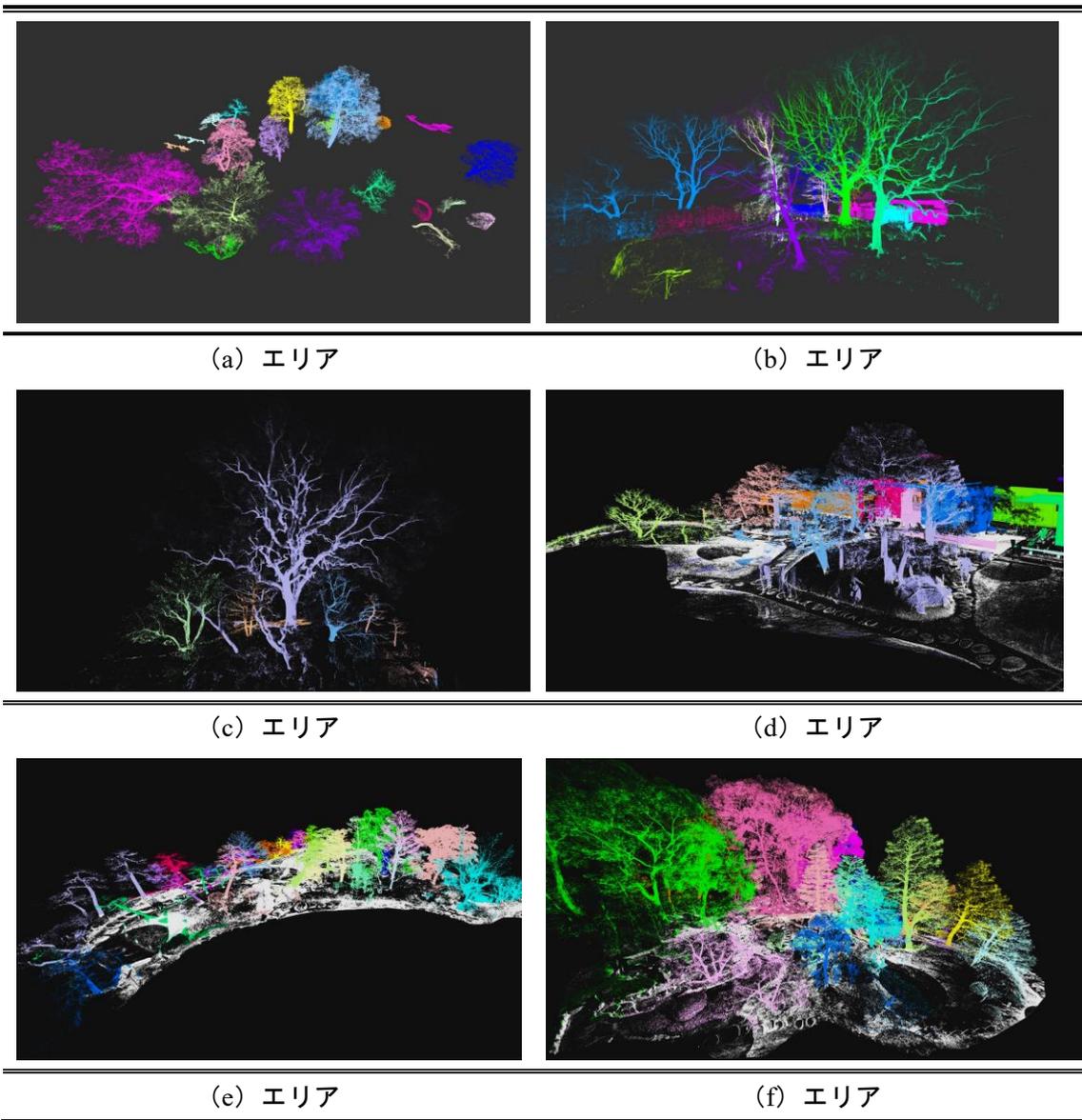
反射率による処理後

図 22 (d) 偏差および反射率による処理結果

3.5.4 セグメンテーション処理

偏差と反射率を用いた分離処理後の対象エリアの樹木点群は、単木ごとにデータとして区別されておらず、樹木点群を個体ごとにデータとして認識させるセグメンテーション処理をおこなう必要がある。樹木点群に対してセグメンテーション処理をおこなうことは、樹木の樹高やバイオマス量、葉の傾斜角などの構造パラメータを単木ごとに詳細に算出することが期待できるため、都市部の街路樹や森林での樹木点群のセグメンテーション処理に関する既往研究は数多く存在する⁹⁰⁾⁹¹⁾⁹²⁾⁹³⁾。

本研究で使用する TreeQSM は、処理にかける樹木点群が単木であることが条件としてあるため、対象エリアの点群データから樹木点群をセグメンテーション処理し、樹木個体ごとのデータを作成する必要があった。樹木点群のセグメンテーション処理の事例の多くは、平地林での検証による有効性が示されているものである。しかし、本研究では清澄庭園などの地形の起伏が作庭時に意図的に造成されている場所においてもセグメンテーション処理をおこなう必要がある。そこで、樹木点群処理に特化したアルゴリズムを提供するオープンソースである「SimpleTree」⁹⁴⁾⁹⁵⁾⁹⁶⁾を使用した。なお、SimpleTree のアルゴリズムは、フリーソフトウェアである「Computree」⁹⁷⁾によって GUI として利用することができる。Computree によるセグメンテーション処理による結果を図 23 に示す。



※ 各エリアは図 22 に表記した場所

図 23 セグメンテーション処理後の結果

3.5.5 Statistical Outlier Removal・Moving Least Square Smoothing によるノイズ処理

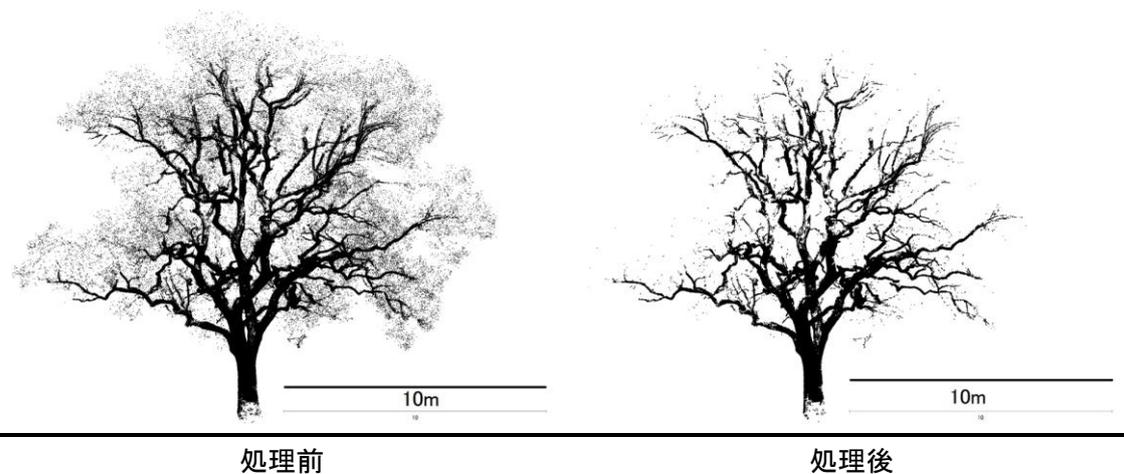
偏差と反射率の情報を利用した、葉点群と幹・枝点群の分離処理の有効性を(3.5.2)(3.5.3)で示した。しかし、偏差と反射率によって葉点群を削除する場合、閾値処理のみでは不要な点群がノイズとして残されることとなる。このようなノイズが完全に削除されていない場合、TreeQSM による処理によって構築される 3D 樹木モデルに形状的な影響が懸念される。このことから、Statistical Outlier Removal (以下、SOR)と Moving Least Square Smoothing (以下、MLS)によるノイズ処理を試みた。

SOR による処理は、ノイズとなる点群 (外れ値 : Outlier) を検出するため、各点の近傍の統計分析を行い、一定の基準を満たさない点群を削除する処理である⁹⁸⁾⁹⁹⁾。そのアルゴリズムとして、各点を最近傍隣接点探索 (Knn : K nearest neighbor research)¹⁰⁰⁾によって、指定した数の近隣点の検出をおこなう。その後、各点の検出された近隣点との平均距離を標準偏差として分布化し、標準偏差によって定義される閾値の外にある全ての点を異常値とみなし、削除をおこなう処理である。本研究では、近隣点の検出数を 10、標準偏差を 1 とする閾値を設けた。

MLS は点群を平滑化するために用いられる処理である。そのアルゴリズムとして、移動最小二乗によって点群の並びを近似し、ノイズを削除するものである¹⁰¹⁾。MLS は表面上の点群の並びに対して平滑化をおこなう処理であるため、点群による表面を形成している幹・枝点群に対しては平滑化が実行されるのに対し、葉点群のノイズに対しては表面としての形成がされていないため、有効的な削除を行うことができると考えた。また、SOR などの統計学的な指標を用いたノイズ処理は、ノイズの完全な削除となると、取りこぼしが生じてしまう問題が指摘されている⁹⁹⁾。しかし、MLS は点群表面を局所的に近似していく処理のため、物体の形状に対応したノイズ処理が可能である。本研究では各点から半径 0.015m 以内に平滑化が行われようとして閾値を設定した。

SOR、MLS による単木樹木の処理結果を図 24 に示す。

処理結果（樹木全体図）



処理結果（樹枝部分の拡大図）

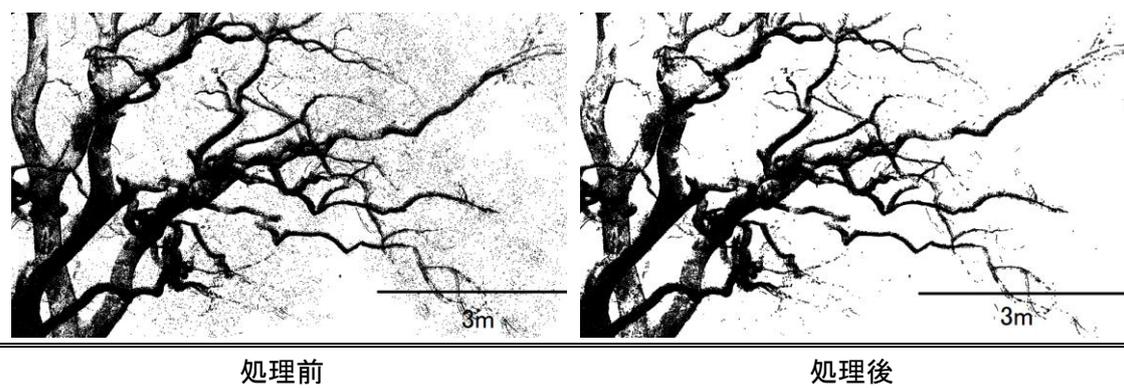


図 24 SOR、MLS による処理結果

3.5.6 TreeQSM による処理および処理結果

これまでの工程で処理された樹木点群を、単木データごとに TreeQSM による処理をおこなった。構築された樹種ごとの 3D 樹木モデルを図 25 に、対象エリア全体を図 26 に示す。

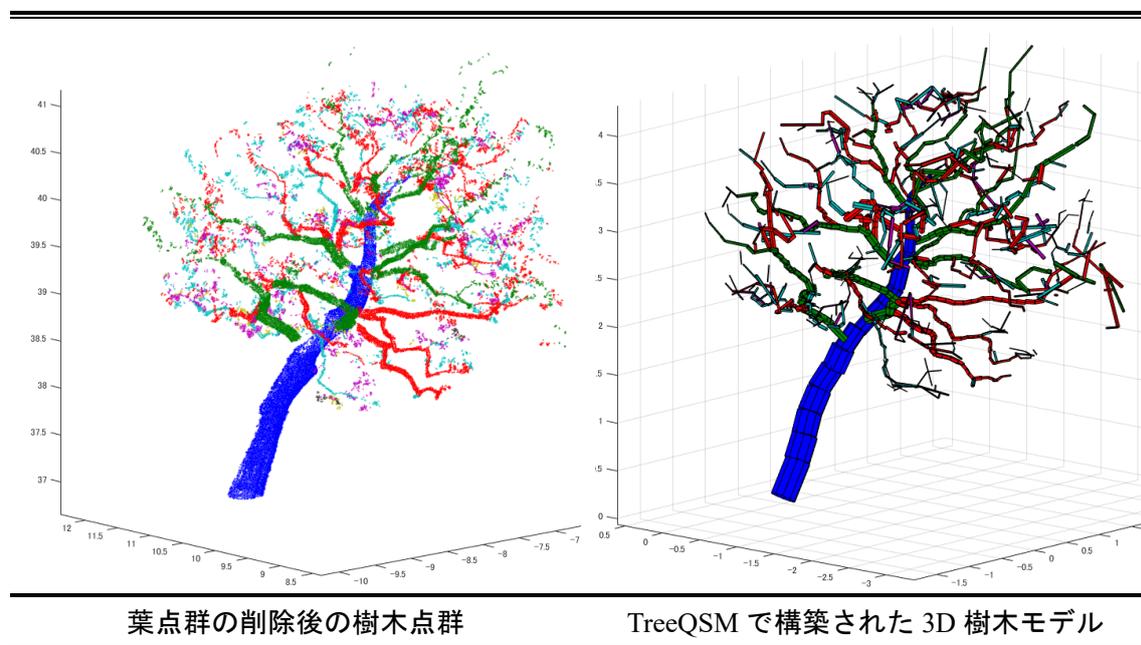


図 25 (a) ウメ

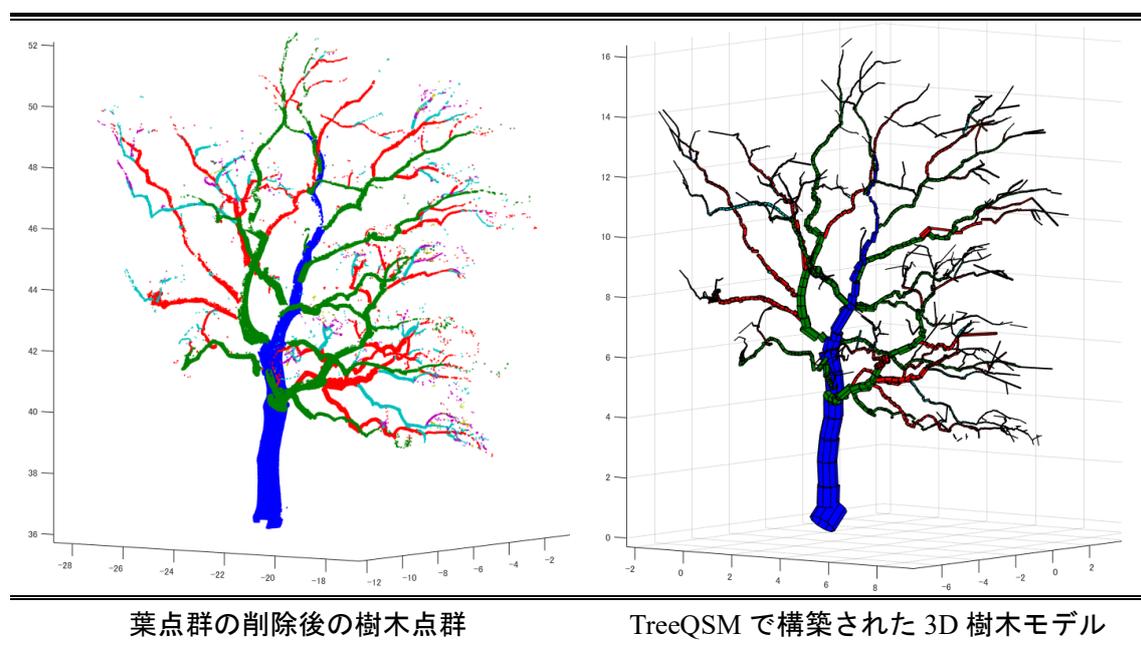
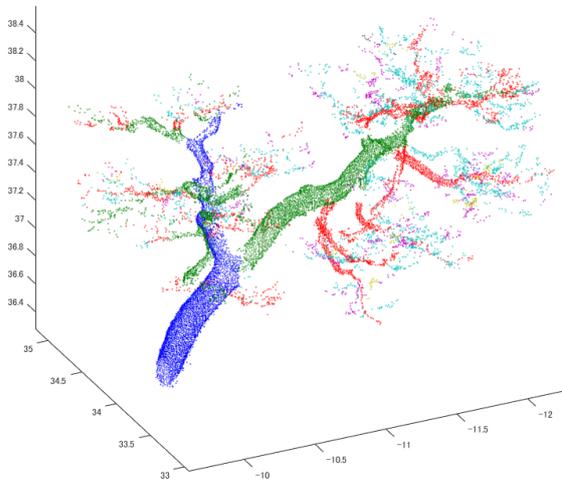
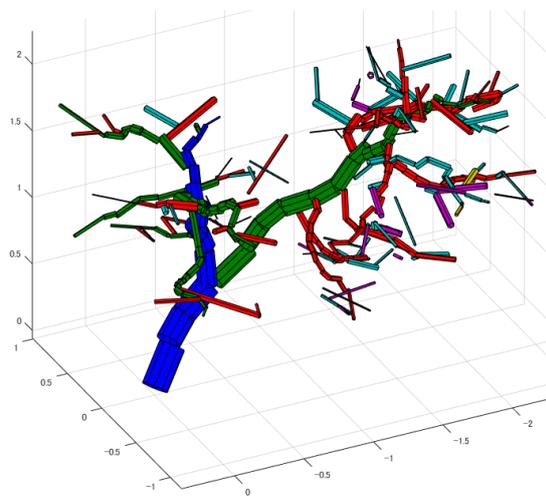


図 25 (b) クスノキ

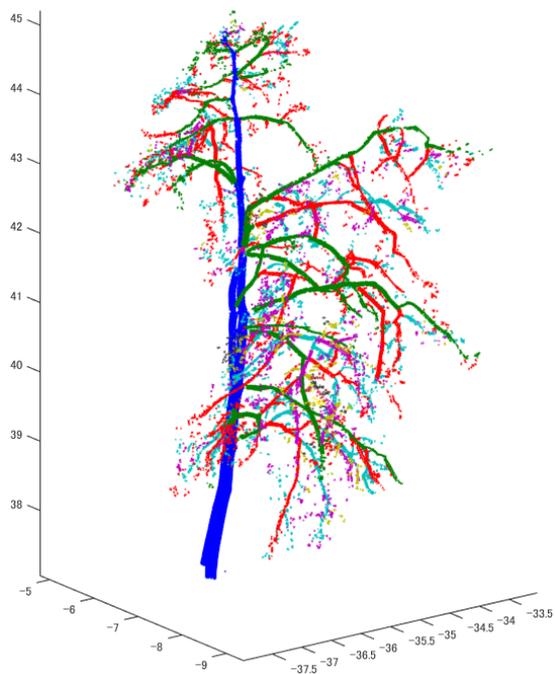


葉点群の削除後の樹木点群

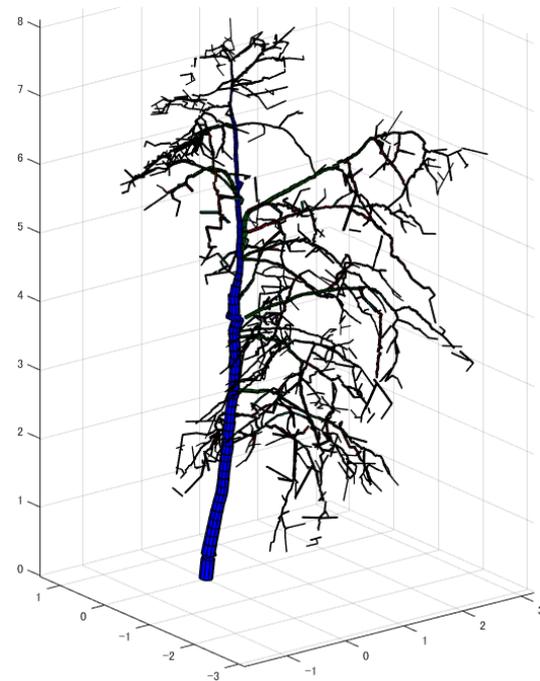


TreeQSM で構築された 3D 樹木モデル

図 25 (c) クロマツ



葉点群の削除後の樹木点群



TreeQSM で構築された 3D 樹木モデル

図 25 (d) クロガネモチ

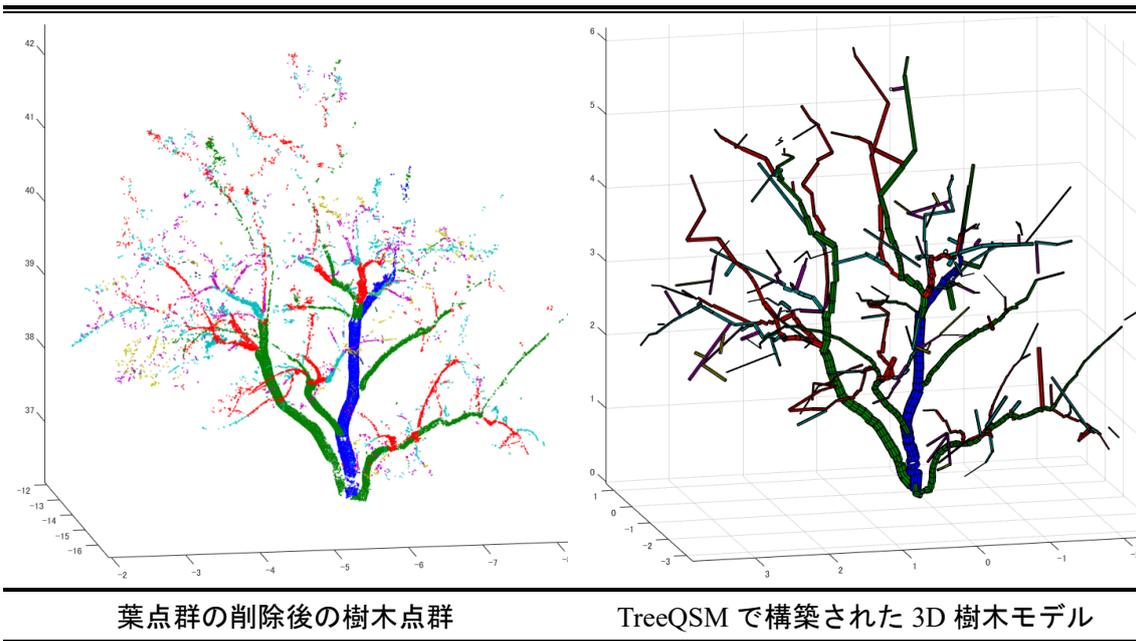


図 25 (e) ザクロ

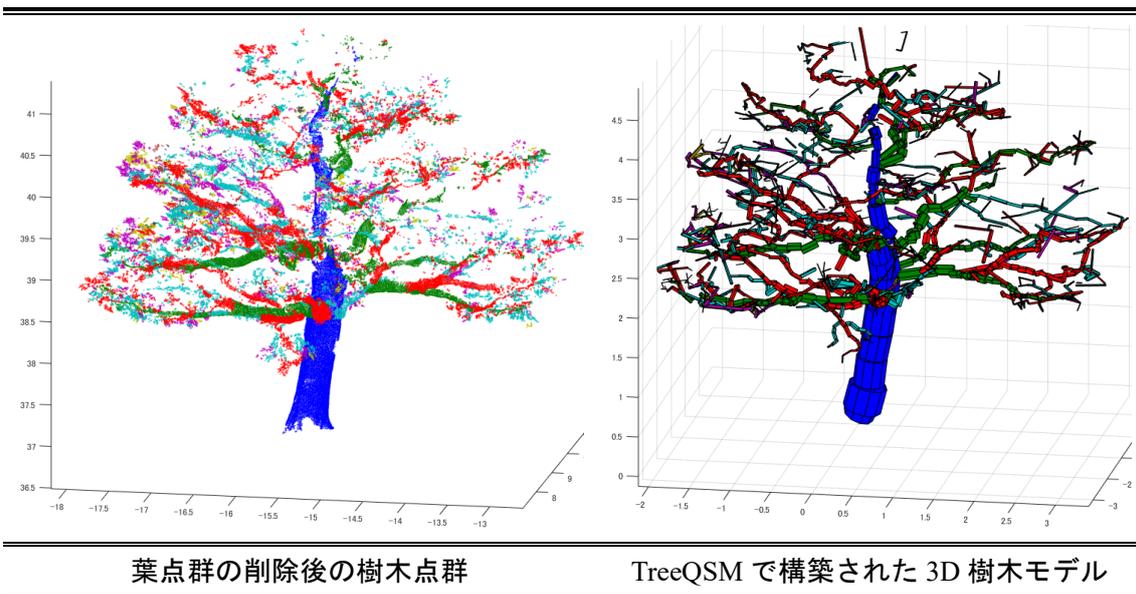


図 25 (f) スタジイ

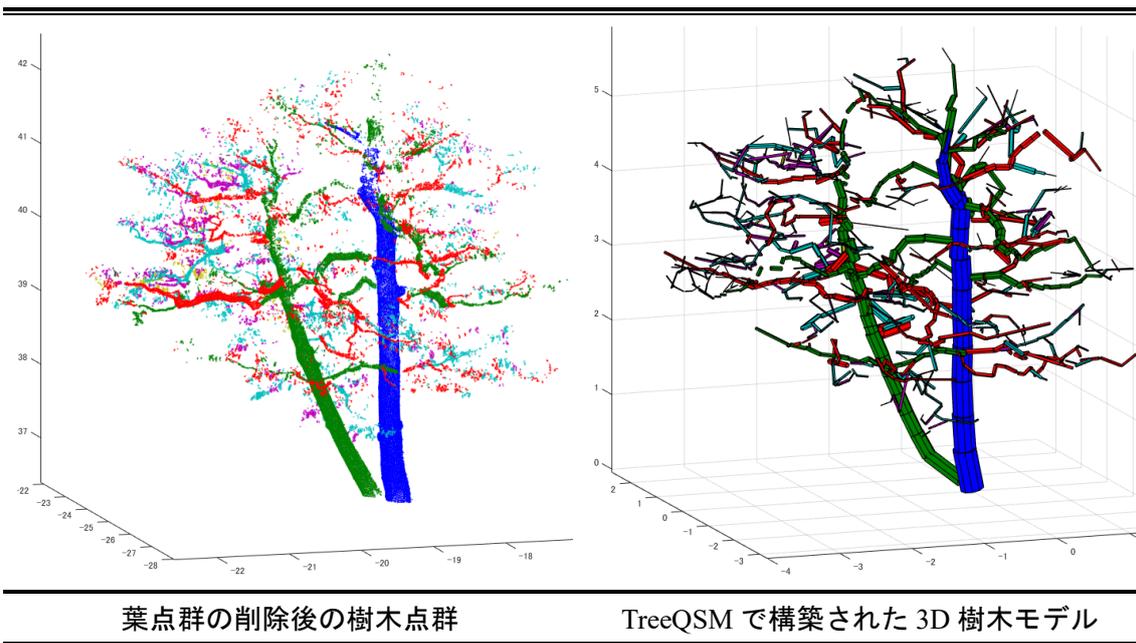


図 25 (g) タブノキ

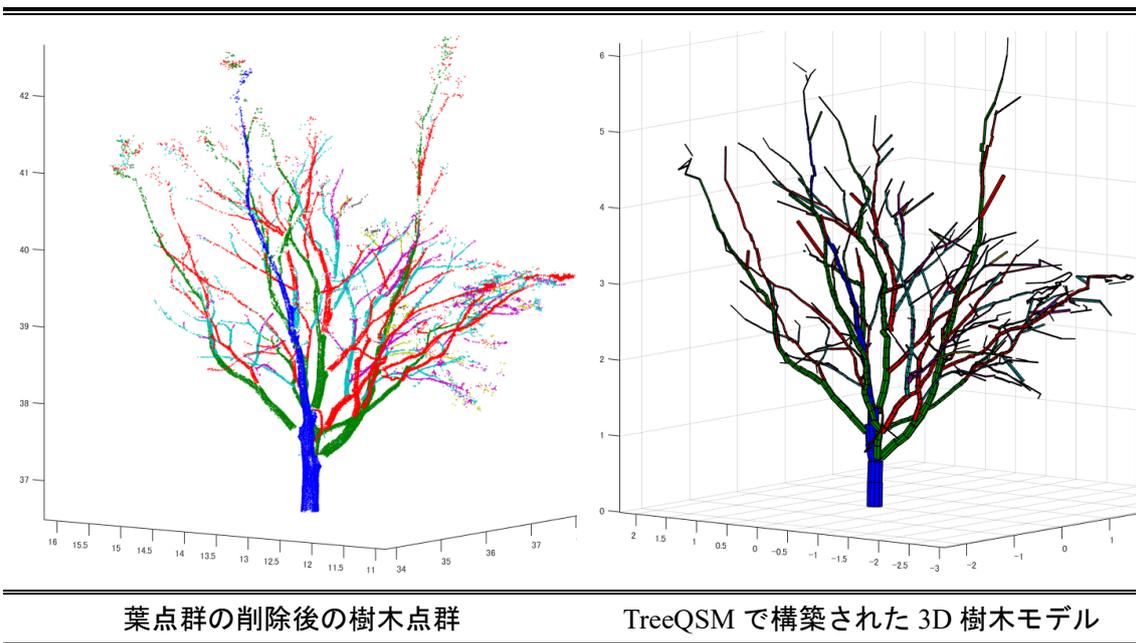


図 25 (h) イロハカエデ

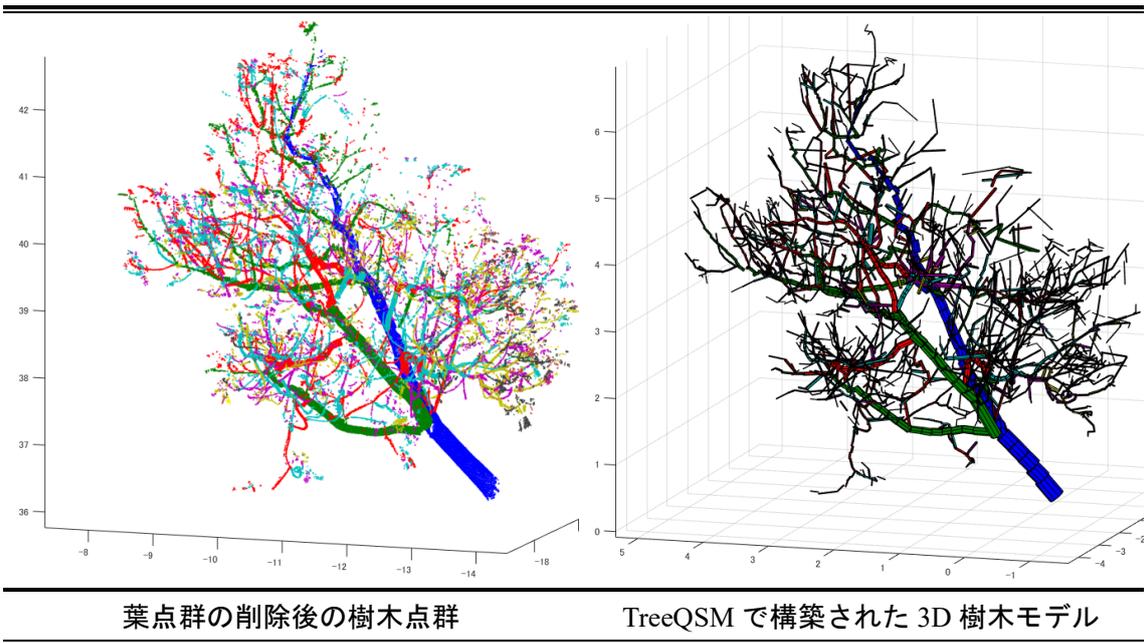


図 25 (i) ハゼノキ

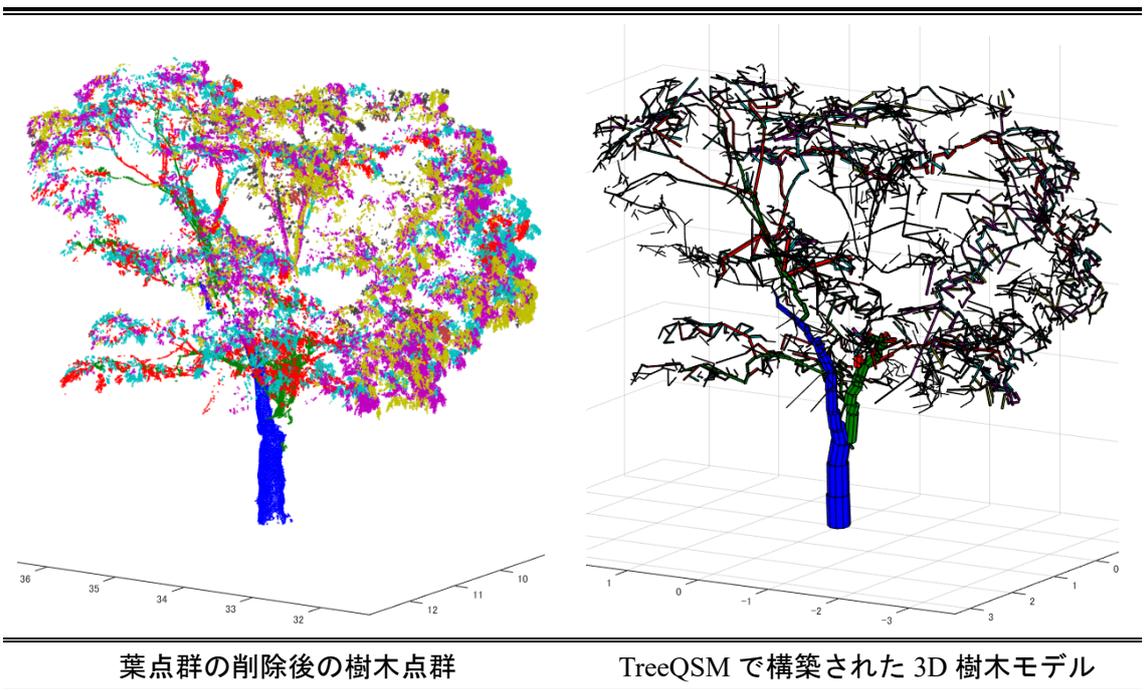


図 25 (j) ハナミズキ

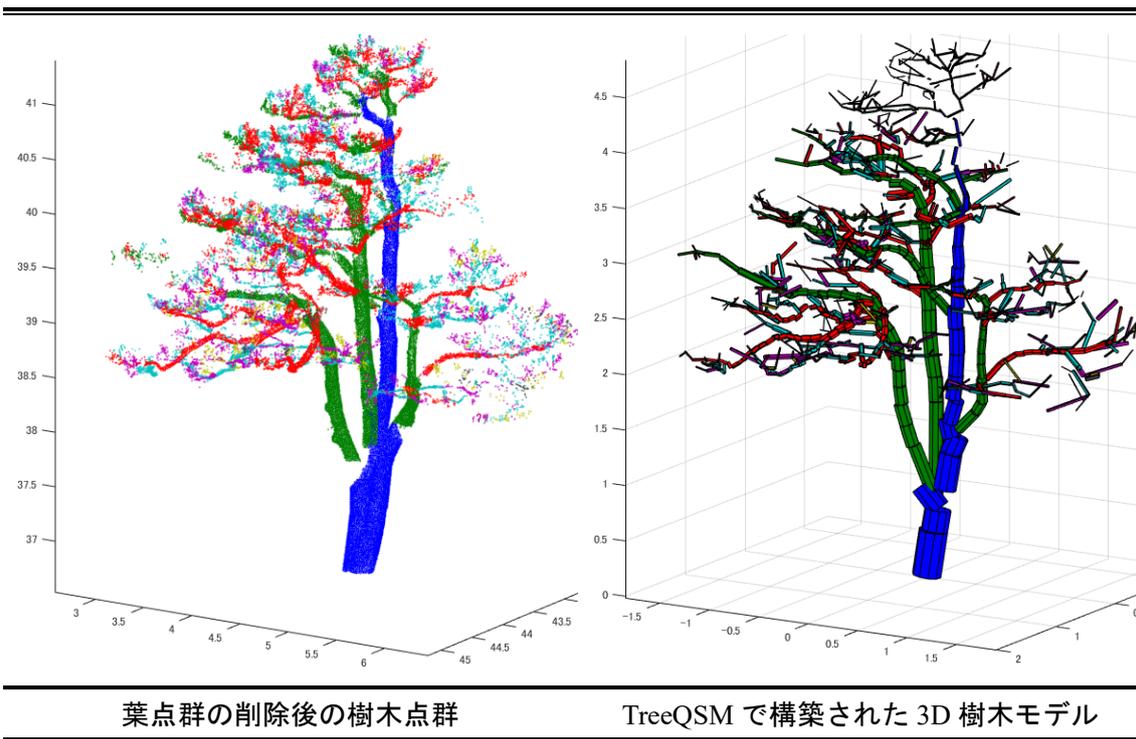


図 25 (k) モチノキ

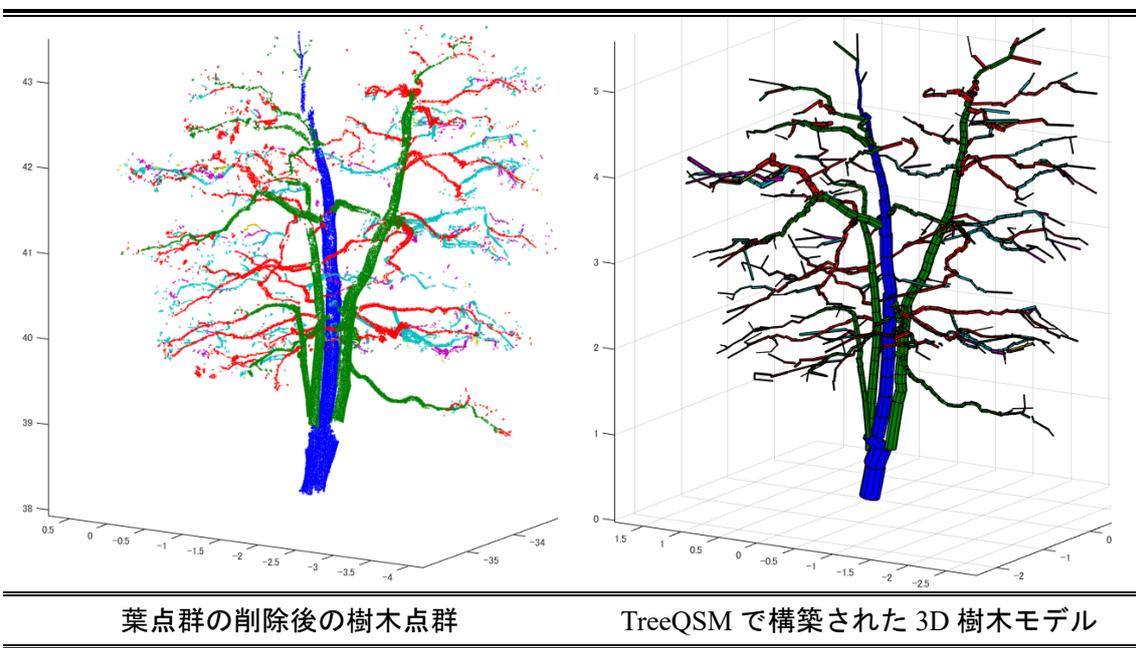


図 25 (l) モッコク

図 25 TreeQSM によって構築された樹種ごとの 3D 樹木モデル

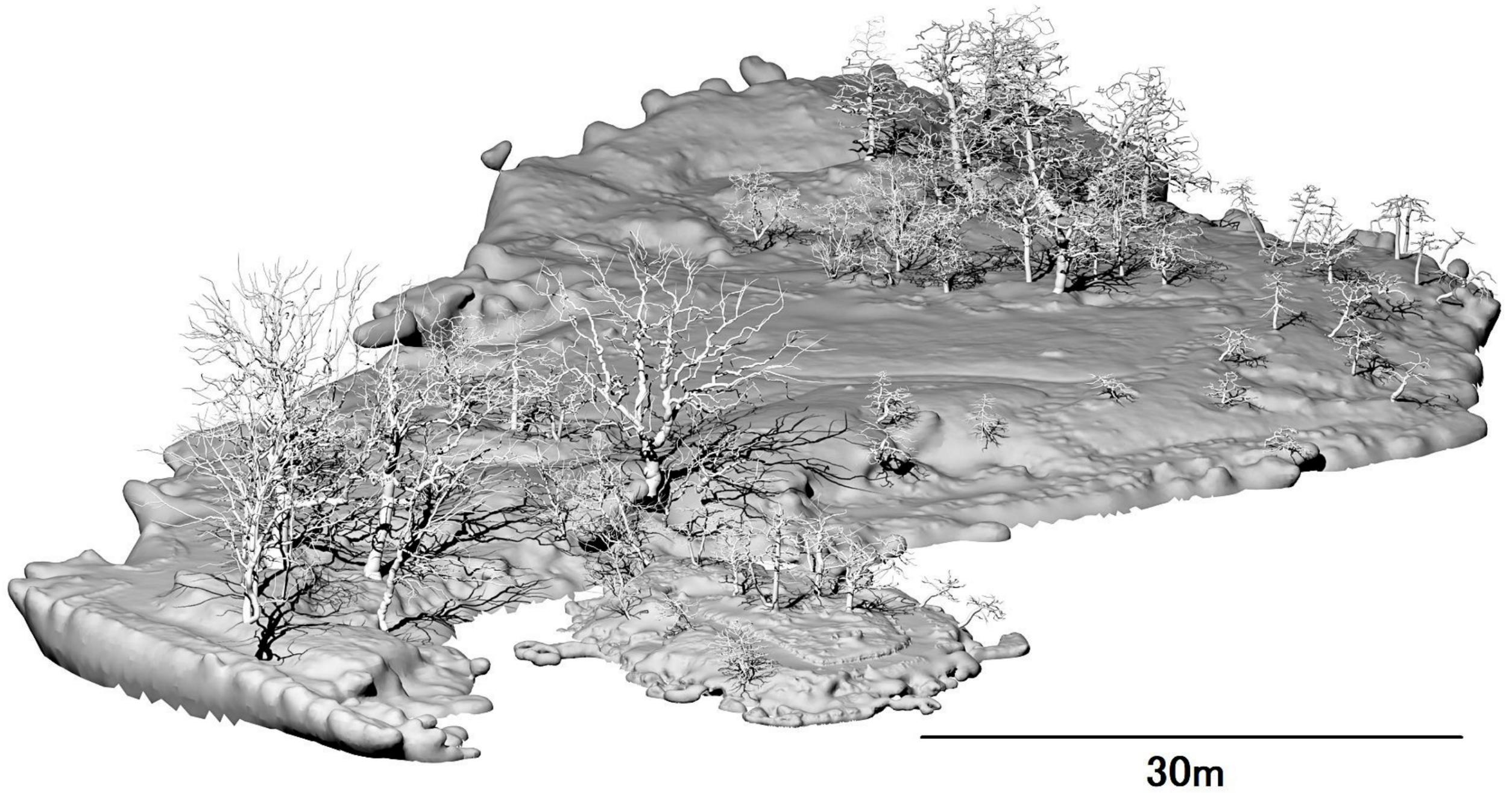


図 26 (a) 対象エリア全体の 3D 樹木モデルの構築図

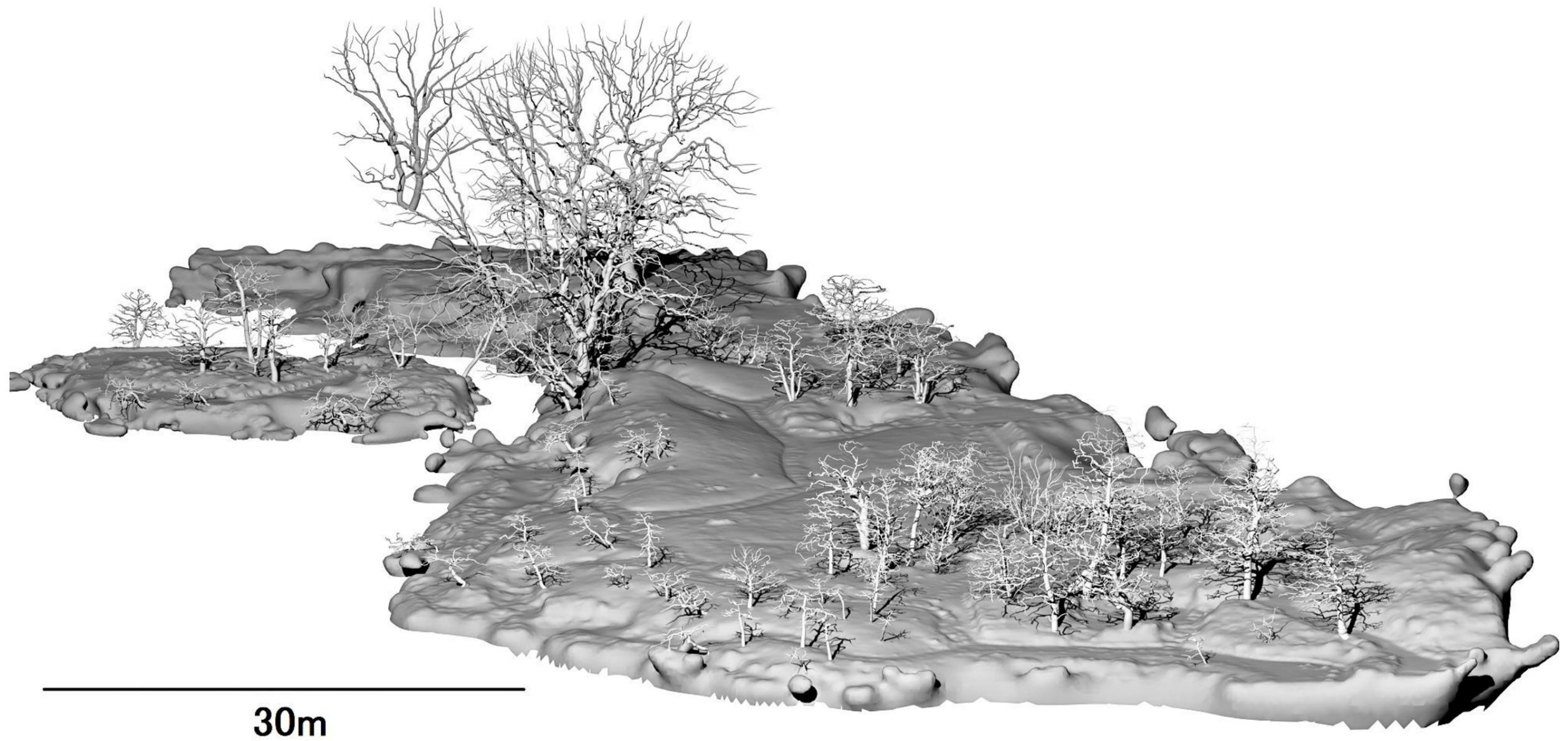


図 26 (b) 対象エリア全体の 3D 樹木モデルの構築図

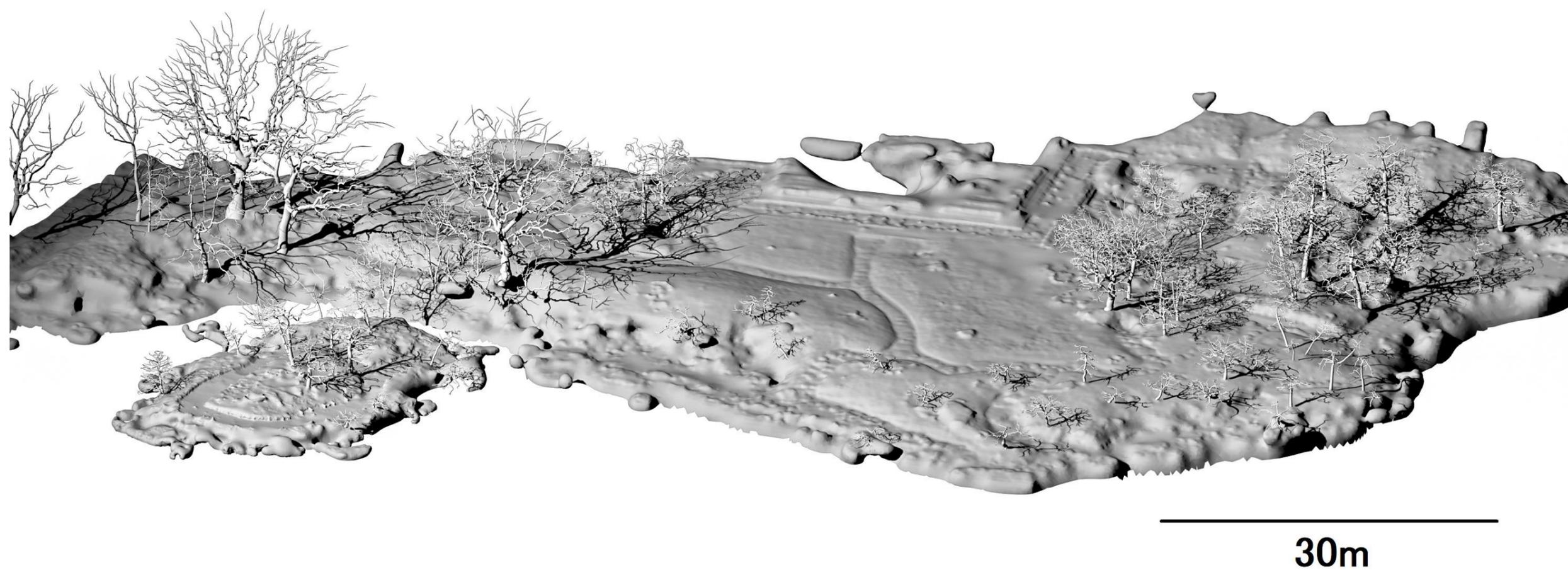


図 26 (c) 対象エリア全体の 3D 樹木モデルの構築図

3.6 小結

本章では、清澄庭園を対象とした TLS による計測をおこない、取得された樹木点群に TLS-QSM 法を適用させることで、効率的かつ詳細な 3D 樹木モデルの構築について述べた。樹木に対する従来の 3D モデリング手法では、枝を構成する点群はメッシュ化処理にて 3D モデル化することが不可能であり、手動と目視による復元に頼ってきた⁶⁷⁾⁶⁸⁾。一方、TLS-QSM 法によって復元された 3D 樹木モデルは、樹木構造の細部までを復元することが可能となり、これまでの目視と手動による工程を自動化できたことは、3D 樹木モデルの作成に費やす所要時間を格段に短縮することができた。

本手法の中で特に重要な工程となったのが、幹・枝点群と葉点群の分離であるが、偏差および反射率の閾値を用いた分離をおこなうことで、多様な樹種に対しての分離が可能となった。分離が可能となったと同時に、樹木点群が幹・枝点群のみで構成されていることが処理の前提条件となっている TreeQSM においても、落葉樹のみでなく常緑樹を含めた多様な樹種への適用が可能となった。さらに、偏差および反射率によって抽出しきれなかったノイズに対しても、SOR および MLS による処理によって、高精度な幹・枝点群の抽出が可能となった。

本来、TLS-QSM 法は林学分野での利用が多く、森林資源の有効な把握手段として用いられていた。そうした中、TLS-QSM 法を造園学分野が扱う領域である日本庭園にて実施し、その適用性と有効性を検証できたことは、本手法が日本庭園の庭園樹木に対する保存の一手法を示せた。同時に、庭園樹木によって現出された庭園景観の保存に対しても、大きな貢献が可能となると考えられる。最後に、造園学分野の観点から考えられる、本手法を用いて構築された、3D 樹木モデルの重要性に関する具体的な考察は、第 6 章の終章にて述べる。

第4章 原爆被爆樹木への応用

4.1 概説

本章では第3章で提案した TLS-QSM 法を用いた詳細な 3D 樹木モデルの構築を、被爆樹木に対して適用する。TLS を用いた文化遺産への調査、および保存に向けた取り組みの事例は数多く存在するが、その対象のほとんどが文化的建造物や遺構に対してのものであり¹⁰²⁾¹⁰³⁾、植物に対する取り組みは僅かである。そこで、被爆樹木の詳細な 3D 樹木モデルを作成し、主に保存という観点からの有効性と、「生きた文化遺産」である被爆樹木に対して、TLS の有効的利用の一手法を提案する。

第4章の流れとして、被爆樹木の文化的背景について (4.3)にて述べ、文化遺産としての重要性を理解する。次に、(4.4)にて被爆樹木に多く見られる特有の樹形について整理を行い、これらの樹形に対して 3D 樹木モデルによる再現の重要性を述べる。その後、被爆樹木のための TLS-QSM 法を主軸とした 3D 樹木モデルの構築プロセスを提案し、被爆樹木の 3D 樹木モデルの構築をおこなう(4.5)。最後に、TLS-QSM 法による被爆樹木の爆心地への傾斜角度、傾斜方位を効率的に算出するための応用をおこなう(4.6)。

4.2 被爆樹木の計測調査で使用した TLS の仕様

被爆樹木の調査では、2015年8月17日～2018年2月13日までの期間、RIEGL社製の LMS-Z390i を用いて計測をおこなった (図27)。以下の表3にその仕様を示す。なお、(4.6)の傾斜算出への応用での被爆樹木は、VZ-400i を用いて計測をおこなった。両機器の性能の比較であるが、精度に関して LMS-390i は 50m先で 6mm以内¹⁰⁴⁾、VZ-400i では 100m先で 5mm以内¹⁰⁵⁾の観測が可能である。レーザの掃射性能に関しては、LMS-390i は毎秒 8,000 発のレーザ掃射が可能であり、VZ-400i は毎秒 500,000 発 (PRR 1.2MHz の設定時) である。



図 27 RIEGL LMS-Z390i

表 3 LMS-Z390i の仕様

距離測定器性能	
アイセーフティー IEC60825-1:2007	クラス 1 (スキャニング中のビーム)
測定距離範囲 反射率 $\geq 80\%$ の自然物ターゲット 反射率 $\geq 10\%$ の自然物ターゲット	400m まで 140m まで
測定最短距離	自然物 : 1m 反射ターゲット : 2m
測定精度	$\pm 6\text{mm}$
再現性	$\pm 4\text{mm}$ (シングルショット) $\pm 2\text{mm}$ (平均化)
測定レート	11,000 点/秒 低速スキャン 振動ミラー 8,000 点/秒 高速スキャン 回転ミラー
レーザー波長	1550nm (近赤外線)
ビーム広角	0.3 mrad
スキャナの性能	
ラインスキャン スキャニング範囲 スキャニング機構 スキャニングレート	0° ~ 80° 回転ポリゴンミラー/振動ミラー 1 スキャン/秒 ~ 20 スキャン/秒まで 選択可能 (80°のスキャン範囲)
角度ステップ幅 $\Delta\theta$ レーザーショット間 角度読み取り分解能	$0.002^\circ \leq \Delta\theta \leq 0.2^\circ$ 0.001°

(表 3 LMS-Z390i の仕様) の続き

フレームスキャン スキャニング範囲 スキャニング機構 スキャニングレート 角度ステップ幅 $\Delta\theta$ レーザーショット間 角度読み取り分解能	0 ~ 360° 回転式光学ヘッド 0.01°/s ~ 15°/s $0.002^\circ \leq \Delta\phi \leq 0.75^\circ$ 0.001°
傾斜計	垂直設定力のチルト角 $\pm 10^\circ$
内部同期タイマー	GPS との同期用オプション
一般技術データ	
インターフェース 設定およびデータ出力用 設定用 データ出力用	イーサネット TCP/IP,10/100Mbit/sec RS232,19.2kBd ECP スタンダード、パラレル
主要寸法 (長さ×直径)	463mm×210mm
重量	約 15kg
インターフェース 設定およびデータ出力 設定用 データ出力用	イーサネット TCP/IP,10/100Mbit/sec RS232,19.2kBd パラレルインターフェース ECP
供給電源	12 ~ 28VDC
消費電力	標準 55W 最大 68W
消費電流	12VDC : 標準 4.6A 最大 5.7A 24VDC : 標準 2.3A 最大 2.8A
保護クラス	IP64 防塵・防滴構造
温度範囲	
作動温度	0°C ~ +40°C
保管温度	-10°C ~ +50°C

4.3 TLSによる被爆樹木計測の背景

国内や海外に存在する遺跡や文化的構造物を後世に残すために、TLSの計測による取得データの利用が大きな貢献をしてきた。古代ローマ遺跡での例では、遺跡に存在するモザイクの記録保存に対して、十分な精度を得られるとしてその有効性が示されている¹⁷⁾。また、軍艦島でのレーザ計測技術の例では、TLSの使用により大規模で劣化の進んだ構造物に対し、正確に破損図作成までを支援できることが述べられている¹⁰⁶⁾。さらに、TLSなどのレーザ計測技術が文化遺産に対し導入される流れを受け、English Heritageは文化的構造物に対して、レーザ計測技術のガイドラインを発表するなどしている¹⁰⁷⁾。このことから、レーザ計測技術は遺跡や歴史的建造物などの構造物に対して、有効な実施例や計測手法が確立されていると考えられる。しかし、「生きた」遺産として価値のあるものに対してレーザ計測技術を使用し、その有用性を実証した既往研究は少ない。

原子爆弾の投下によって被災した広島市・長崎市には、原爆ドームなどに象徴される被爆遺産のほかに、終戦から75年が経過しても今なお生きつづける被爆樹木が存在する。被爆樹木とは、広義には原爆にさらされたすべての樹木であり、原爆の記憶を今に伝えるものの中で「生きた」被爆遺産として、その生命力を尊びつつ、原爆の悲惨さを世界や後世に伝える役割を期待されている。原爆の惨禍を乗り越えた被爆樹木は、両都市にて保存に関する意識が高まっており、2018年8月6日に保存に向け厚生労働省が支援に乗り出す方針を決めた¹⁰⁸⁾。広島市には爆心地から約2km以内に161本の被爆樹木が登録されているが、うち民間の23施設・団体が守る被爆樹木58本のうちの24%（14本）に老木化や病気による枯死の恐れが出ている¹⁹⁾。そのため、早急に現在の被爆樹木の姿形をレーザ計測技術によって3次元データとして保存する重要性が高まっていると言える。実際に、長崎被爆50周年事業「被爆建造物等の記憶」にある悟真寺墓地内の登録されたクスノキであるが、2016年10月の調査にて姿形が変わった状態で確認されている¹⁰⁹⁾。このような背景から、原爆の「もの言わぬ証人」とも呼ばれる被爆樹木の保存・調査に、TLSを使用した新たな提案をおこないその有用性を考察した。

4.4 TLSによる被爆樹木計測の目的

本章では、被爆樹木を TLS にて取得した 3 次元データから、被爆樹木に多く見られる特有の樹形を再現した 3D 樹木モデルを構築することを目的とする。これらの樹形の中でも、特に注目するものとして、大脇ら¹¹⁰⁾による広島市での調査によって被爆樹木が爆心地に向かって傾斜（湾曲）している傾向があることが明らかされている。しかし、傾斜という特有の樹形は視覚的に認識する事は困難と考えられ、取得データから詳細な 3D 樹木モデルの構築をおこなうことで、主幹の傾斜という特有の樹形をより理解しやすく提示することを考えた。その中でも、3D プリンタの出力により模型を作成することは、視覚的な理解を容易にし、実際に手に触れることもできるため、被爆樹木の生態への理解をより深められる。しかし、模型による復元には、取得データから詳細な部分までを忠実に再現をした 3D 樹木モデルの構築が必要である。そこで、本研究では被爆樹木が持つ特有の異常を再現した 3D 樹木モデル作成のために、TLS-QSM 法を主軸とした手法を提案し、3D 樹木モデルが今後の被爆樹木の保存活動の取り組みにおいて、如何なる意義があるかを考察した。

4.4.1 計測対象とする被爆樹木の特有樹形

被爆樹木には原爆の熱線や爆風による被害を受けたことによる特有の樹形は大きく 5 種類に分られる。図 28 にその特徴を示す。これらの特徴をもつ被爆樹木の中でも、本研究では⑤の「主幹の傾斜」がみられる樹木を計測対象とした。さらにその中で、移植がされておらず単幹であり、①～④などの地上部被害痕跡が残るものを対象とした。なお、移植されたものや株立ちであるものは爆心地への傾斜特定をおこなうことができないため、計測対象からは除外した。

<p>① 火傷跡・亀裂</p> 	<p>② 洞（うろ）</p> 	<p>③ 地上部焼失による株立ち</p> 
<p>撮影年月日：2017/05/09 熱線や放射線，周囲の建造物等の火災により，幹肌に黒い火傷跡をもつものや，火傷による萎縮で亀裂が残されている</p>	<p>撮影年月日：2015/03/13 被爆による影響により，樹木の細胞組織が破壊され，主幹の空洞化が生じている</p>	<p>撮影年月日：2017/05/09 被爆時の爆風や火災等により，地上部が消失。その後，蘗（ひこばえ）から新たに芽吹き成長することで株立ち樹形となる</p>
<p>④ 爆心地反対側の肥大成長</p> 	<p>⑤ 主幹の傾斜</p> 	
<p>撮影年月日：2017/05/09 被爆の影響により，爆心地側の細胞組織が破壊され，爆心地の反対側のみ幹や根が肥大成長した樹形</p>	<p>撮影年月日：2017/05/09 被爆時に地上部が消失せず，その後移植がされていない単幹の樹木に多く見られる異常。主幹が爆心地側に傾斜していることが多い</p>	

図 28 被爆樹木に多く見られる特有の樹形の種類

4.4.2 被爆樹木の3D樹木モデルの構築手法

被爆樹木の3D樹木モデルの構築は、第3章で示したようにTLS-QSM法を主軸とした方法でおこなうが、被爆樹木を対象とした場合、異なる構築プロセスを踏む必要がある。そのプロセスとして、根元から主幹下部をメッシュ化処理にて3Dモデルの構築をおこない、それより上部の幹または枝部分をTreeQSMによって構築する(図29)。根元から主幹下部をメッシュ化処理による綿密な復元をおこなう理由として、図28に示したように最も被爆樹木の特徴(火傷跡、亀裂、根の肥大成長、傾斜など)が現れる部分であることが挙げられる。TreeQSMによる処理は、根元から枝先・樹木上部にかけて、細切れ状にセグメント化を行い、その各セグメントに対し円筒状モデルを近似していく手法であるため、樹木の複雑な表面形状の再現をおこなうことができない。そこで、メッシュ化処理による構築が不可能であり、さらに被爆樹木としての特徴が顕著に現れない地表から5m以上の幹と枝部分の復元をTreeQSMによっておこなった。

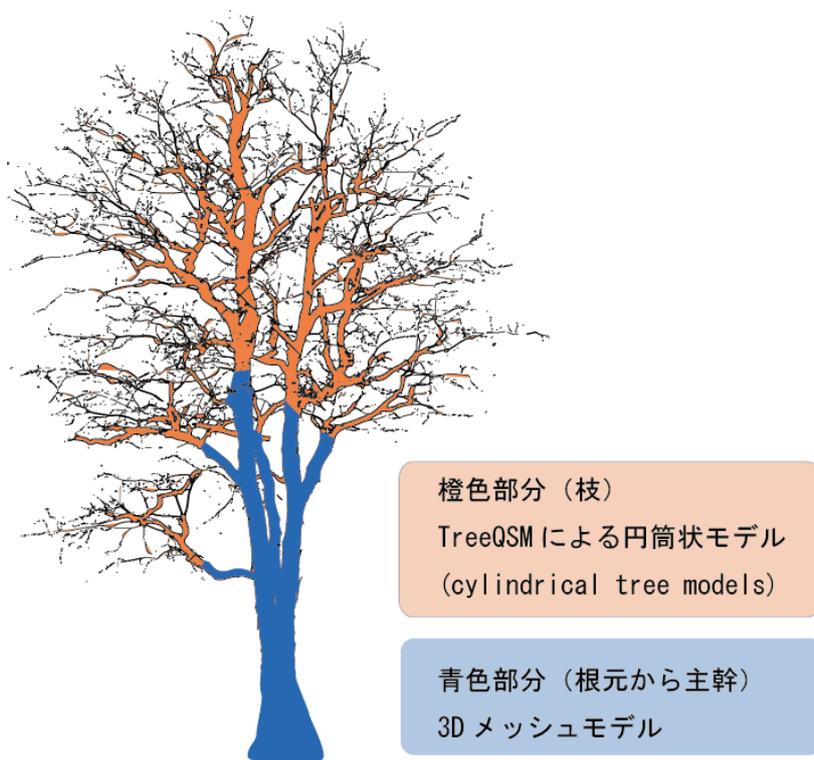


図29 復元する3D樹木モデルの構造

4.5 3D 樹木モデルの構築

図 30 に、被爆樹木の 3D 樹木モデル構築までの各工程と所要時間の詳細を記す。

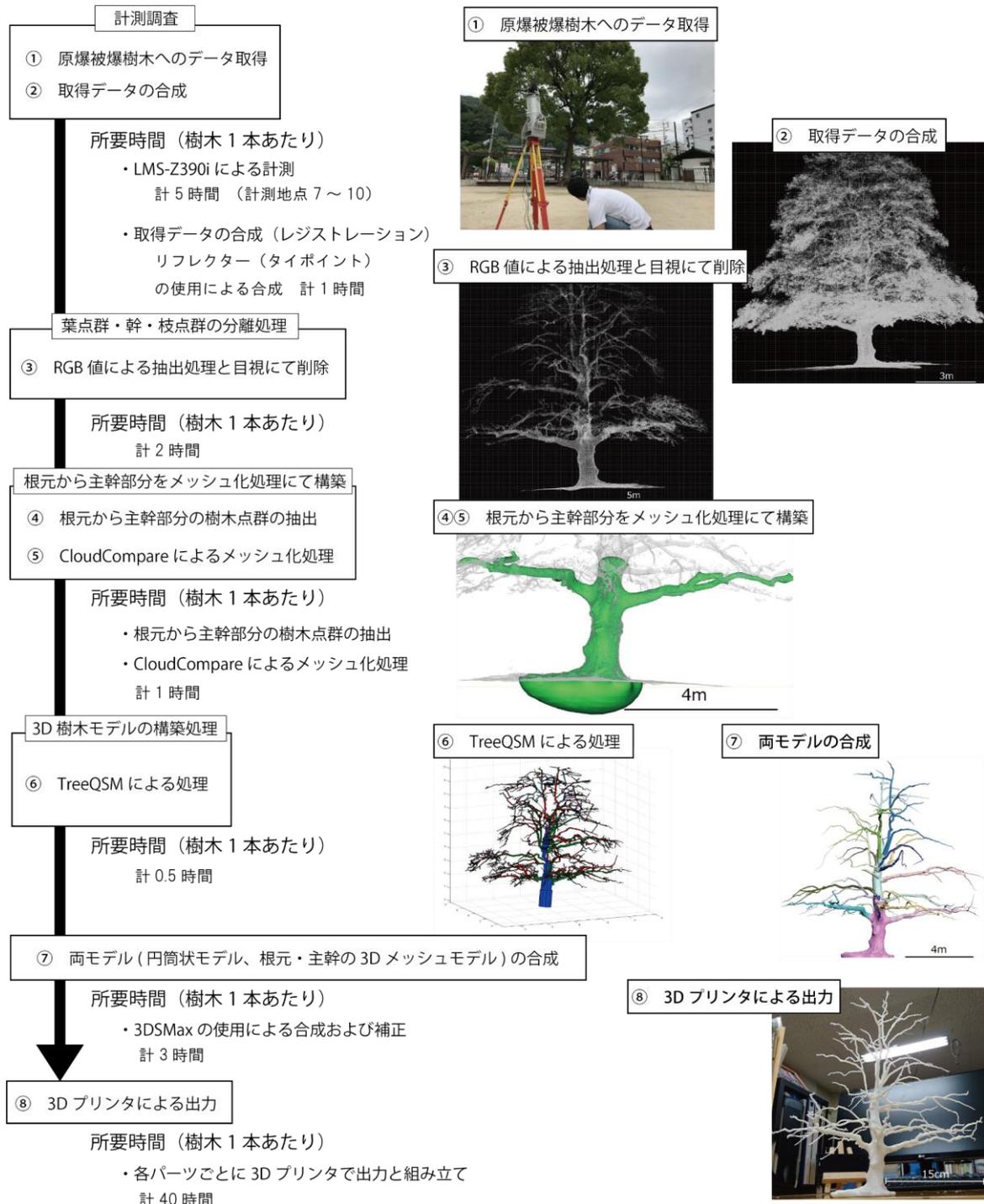


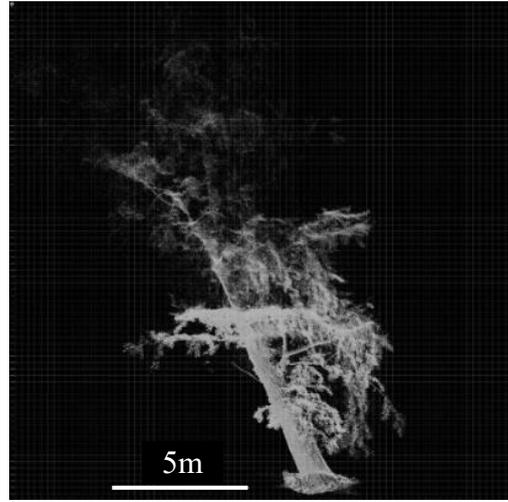
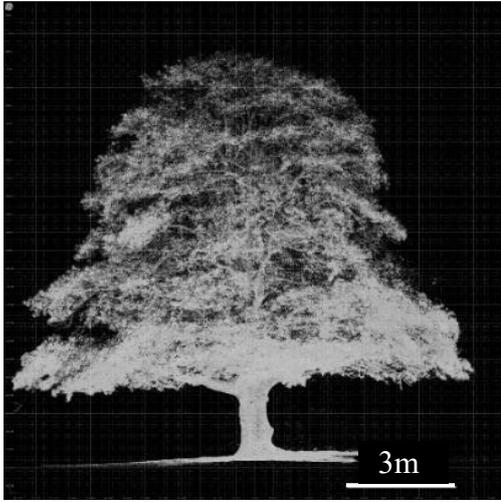
図 30 被爆樹木の 3D 樹木モデル構築のための工程

4.5.1 TLSによる被爆樹木の計測

RIEGL 社による実測に基づく単木計測マニュアルでは、全方位から十分に覆われるように計測がされる必要があり、3 箇所以上のスキャンポジションを設けることを推奨している。本研究での被爆樹木の計測では、推奨値より多くの計測地点（7 箇所～10 箇所）を設け、特に根元や主幹など被爆樹木としての特徴が色濃く残る部分を重点的に計測した。レジストレーション作業では、LMS-Z390i にはオートレジストレーション機能が備わっていないため¹¹¹⁾、リフレクタによるタイポイントの設置にておこなった。リフレクタによるレジストレーションでは、隣接する各器械点で得られた計測データから共通する点（タイポイント）を 4 点以上認識させることでレジストレーションを行うものである⁴²⁾⁴³⁾。この際、共通点の役割を果たすのがリフレクタである。リフレクタは、一般的な物体よりも照射されたレーザを強く反射するため、データ上での認識が可能であり、タイポイントとして機能する。レジストレーション後、単木の樹木点群データとなるように周りの建造物の削除を行なった。

これまで計測した被爆樹木の取得データおよび爆心地からの距離を図 31 に示す。なお、3D 樹木モデルの作成の対象とする被爆樹木は、クロガネモチ（広島城跡）とした。

広島



樹種：クロガネモチ (対象樹木)

樹種：イチヨウ

爆心地からの距離：910m

爆心地からの距離：1,370m

計測日：2015年8月17日

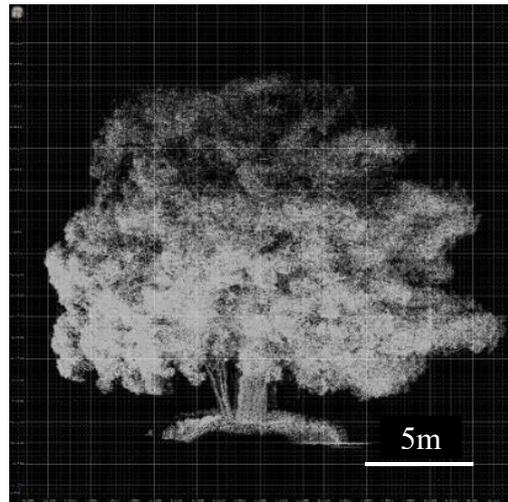
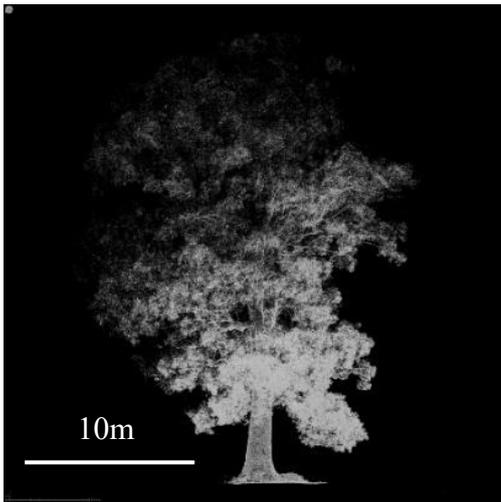
計測日：2015年8月18日

所在地：広島市中区基町21

所在地：広島市中区上幟町2-11

(広島城跡)

(縮景園)



樹種：クスノキ

樹種：クスノキ

爆心地からの距離：1,090m

爆心地からの距離：990m

計測日：2016年9月13日

計測日：2017年7月23日

所在地：広島市中区基町20

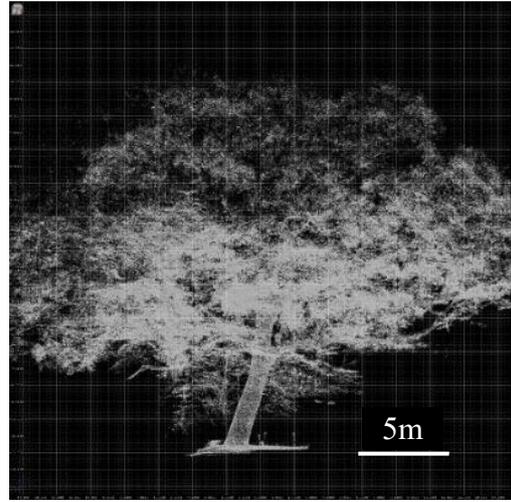
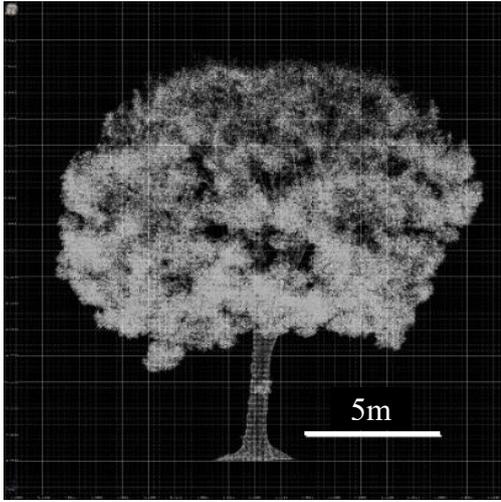
所在地：広島市中区基町16

(基町交番前)

(市営住宅南西側駐車場)

図31 (a) 計測した被爆樹木の取得データ

広島



樹種：クスノキ

爆心地からの距離：2,040m

計測日：2017年7月23日

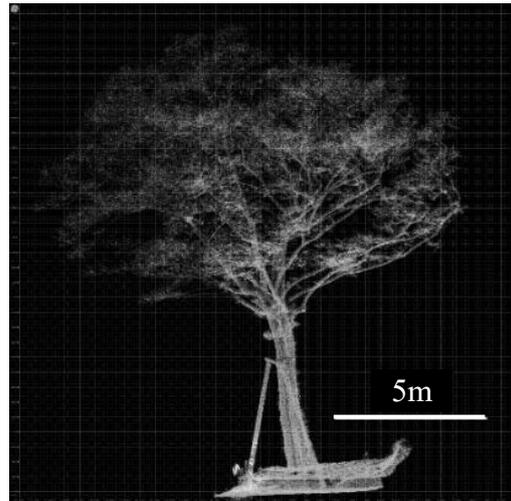
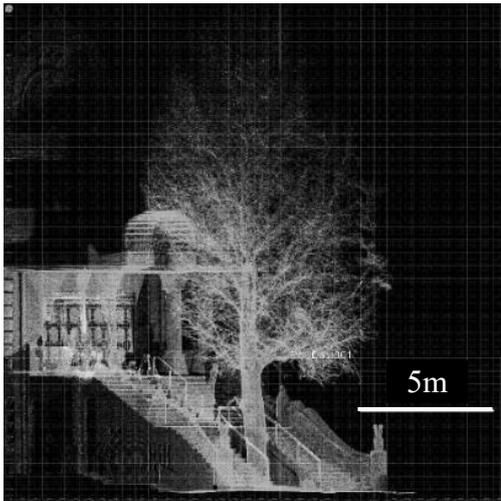
所在地：広島市東区二葉の里三丁目2
(シリブカ公園)

樹種：クスノキ

爆心地からの距離：1,950m

計測日：2017年7月24日

所在地：広島市南区比治山公園
(比治山公園)



樹種：イチヨウ

爆心地からの距離：1,120m

計測日：2018年2月12日

所在地：広島市中区寺町3-3
(報専坊)

樹種：エノキ

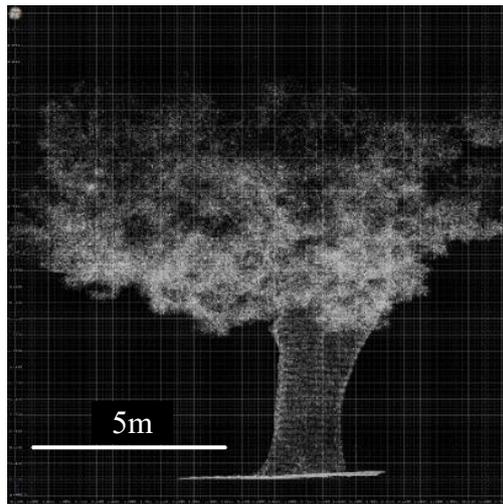
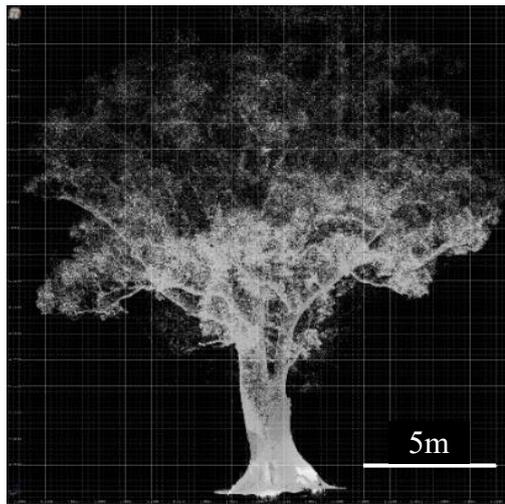
爆心地からの距離：1,440m

計測日：2018年2月13日

所在地：広島市中区上幟町6-29
(幟町中学校)

図 31 (b) 計測した被爆樹木の取得データ

長
崎



樹種：クスノキ

爆心地からの距離：1,690m

計測日：2016年2月23-25日

所在地：長崎県長崎市淵町 8-1

(淵神社)

樹種：クスノキ

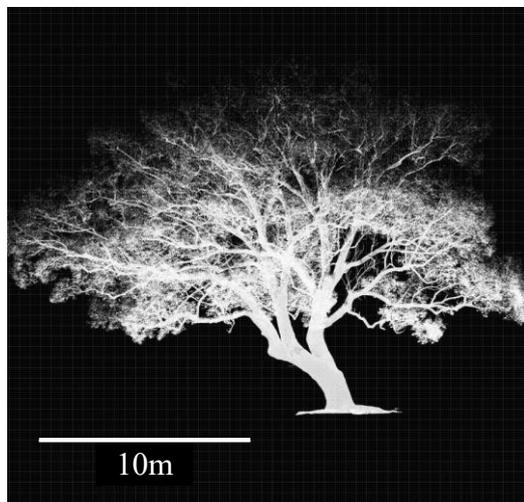
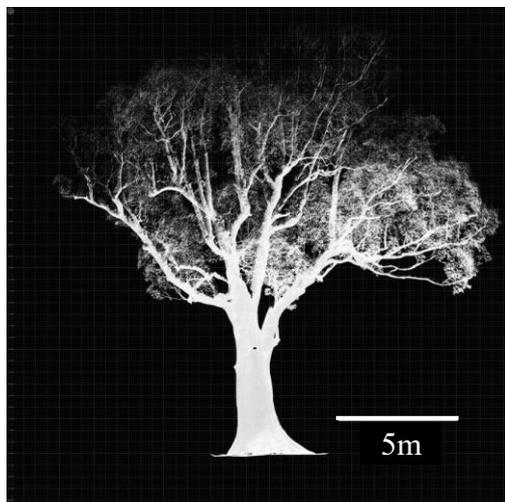
爆心地からの距離：2,370m

計測日：2016年10月21日

所在地：長崎市曙町 6-14

(悟真寺)

VZ-400i を用いた計測（傾斜算出の応用にて対象とした）



樹種：クスノキ（2016年の計測と同樹木）

爆心地からの距離：1,690m

計測日：2019年9月20日

所在地：長崎県長崎市淵町 8-1

(淵神社)

樹種：クスノキ

爆心地からの距離：700m

計測日：2017年9月19日

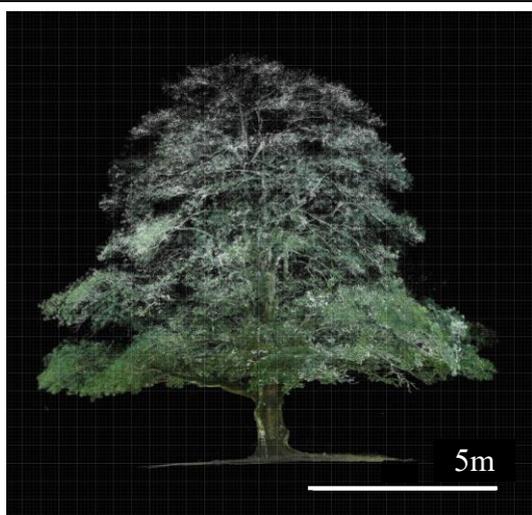
所在地：長崎市坂本 1 丁目 7-1

(長崎大学歯学部附属病)

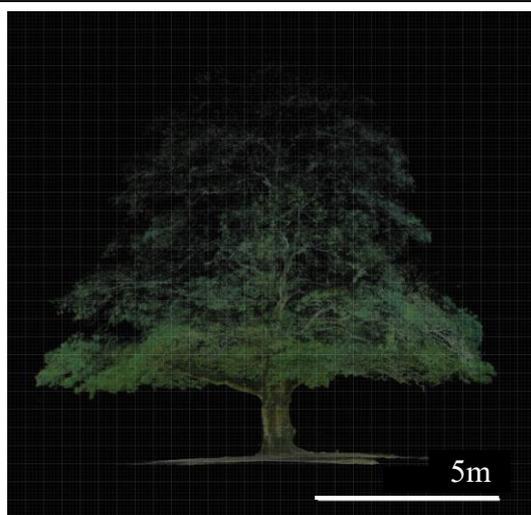
図 31 (c) 被爆樹木の取得データ

4.5.2 手動による葉点群の削除

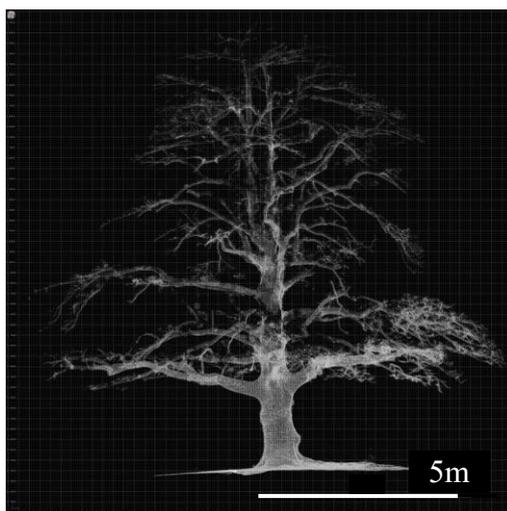
第3章では偏差と反射率を基にした葉点群の削除をおこなったが、LMS-390Zi を使用した計測では反射率の取得がおこなえない上、反射強度が正しく取得されない問題があるため、手動による葉点群の削除をおこなった。そこでまず、取得された樹木点群の外れ値を削除するため、RGB 値による点群の色指定によって外れ値の抽出をおこなった。対象樹木に RGB による閾値の設定を試した結果、R、G、B の3要素の値が同時に150以上となるように色の抽出設定をおこなうと、外れ値となる点群が抽出された。その後、枝・幹点群となる部分が抽出されるように目視による作業で葉点群の削除をおこなった (図32)。



(a) 原データの樹木点群



(b) RGB 値による削除

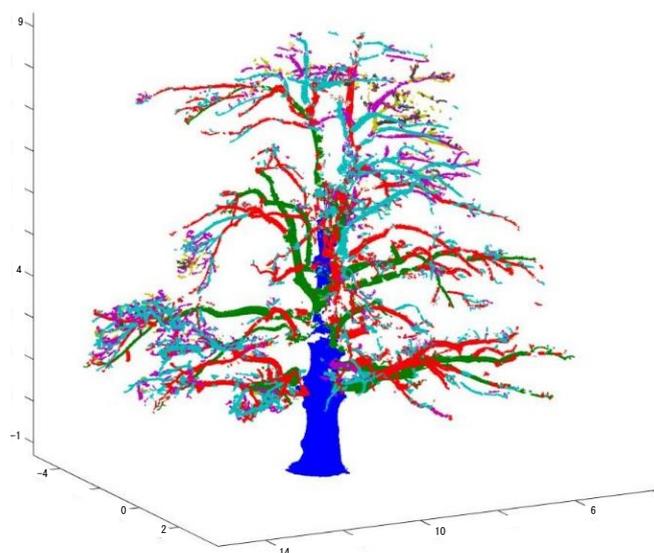


(c) 抽出された枝・幹点群

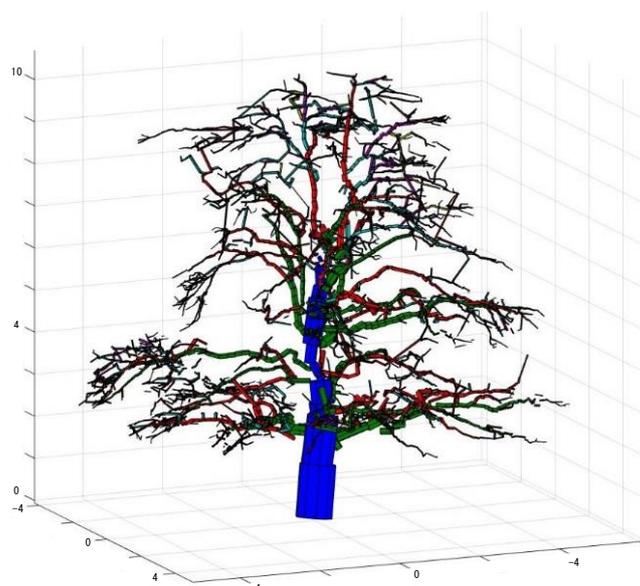
図32 枝・幹点群の抽出

4.5.3 TreeQSM による処理

抽出されたクロガネモチの幹・枝点群を TreeQSM によって処理をおこなった。処理の結果を図 33 に示す。処理結果から分かるように、QSM は円筒状モデルでは根元から主幹下部にかけて幹肌の精密な再現が行われていないことが分かる。



樹木点群

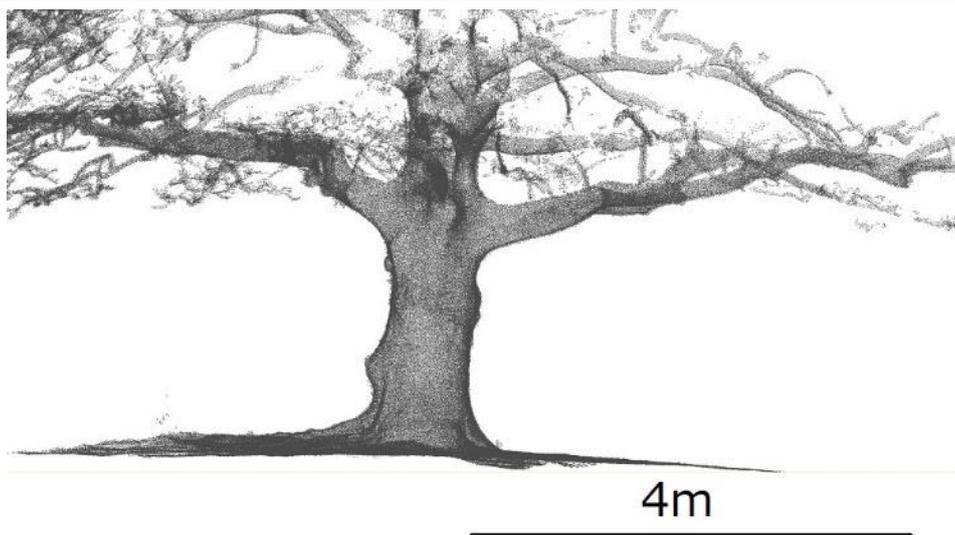


円筒状モデル

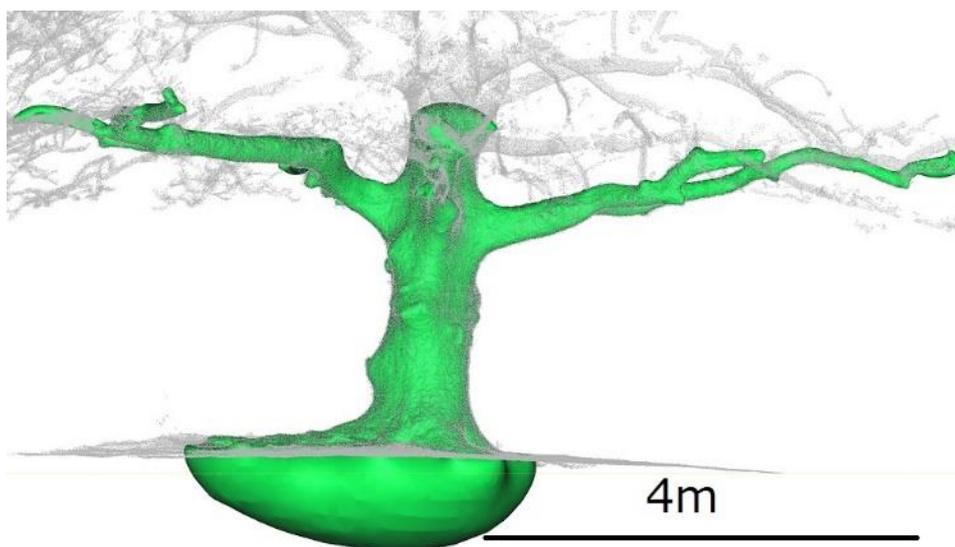
図 33 TreeQSM による円筒状モデルの構築

4.5.4 根元から主幹下部の抽出とメッシュ化処理

根元から主幹下部にかけての樹木点群の抽出および、メッシュ化処理をおこなった。対象としたクロガネモチの幹・枝点群では、地表から地上 5m 付近までの範囲を抽出した。メッシュ化処理には、点群編集のためのフリーソフトウェア「CloudCompare」¹¹²⁾を用いておこなった。生成された 3D メッシュモデルを図 34 に示す。図 34 から分かるように、メッシュ化処理によって主幹の幹肌までの形状を詳細に復元することが可能である。



樹木点群（地表から上部へ 5m まで）



メッシュモデル

図 34 根元・主幹の樹木点群のメッシュ化処理

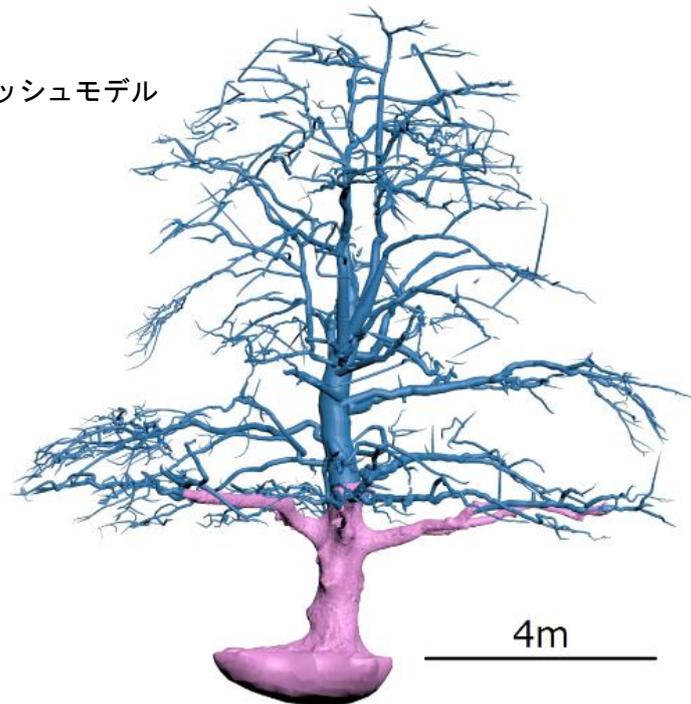
4.5.5 両モデル（QSM、3D メッシュモデル）の合成と補正

両モデルを Autodesk 社の 3D モデリングソフトウェア「3DSMax」の使用によって合成をおこなう。しかし、構築された(4.5.3)の図 33 の円筒モデルであるが、中央部分が取得された樹木点群データが十分でないため、円筒が実際のスケールよりも小さい状態で生成されている。そのため、円筒が正しいスケールとなるように、樹木点群からその箇所直径寸法を算出し、円筒モデルに適合させることで補正をおこなった。

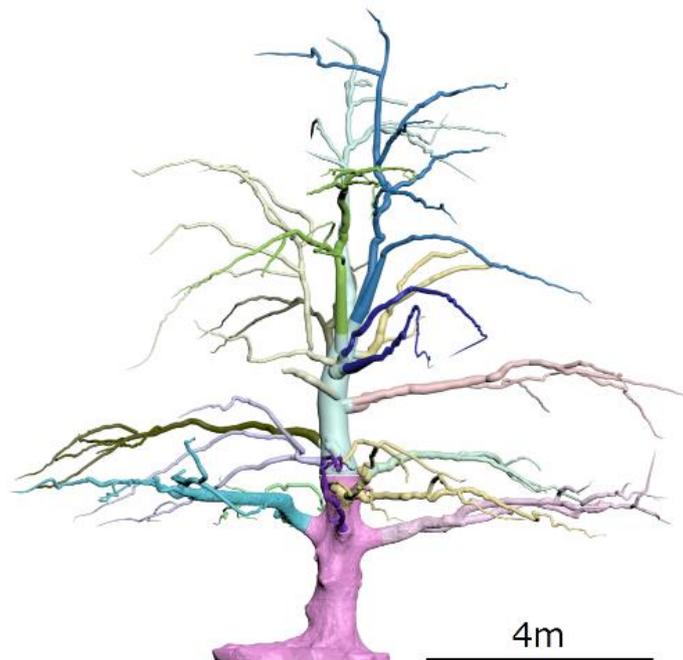
また、出力に使用する 3D プリンタ「L-DEVO 社製 M3145TP」は、FDM（熱溶解積層法）式であり、熱可塑性樹脂のフィラメントを高温で溶かし、積層させることで物体を形成する方法を採るものである。この方式の 3D プリンタは、3D 樹木モデルなどの鉛直方向（Z 軸）に主幹があり、水平方向（XY 軸）に枝が伸びるため、空中で分岐する枝部分は出力が困難である。そこで、縦軸（Z 軸）に伸びる主幹部分と、横軸（XY 軸）に伸びる枝部分を各パーツに分け、段階的に 3D プリンタに出力できるようにした。さらに 3D 樹木モデルは、3D プリンタの造形台サイズから 1/35 スケールで出力するが、使用したノズル（熱で溶かした樹脂を吐出する部品）の直径は 0.4mm である。そこでノズルの直径を考慮し、1/35 で出力した場合に造形物が直径 1mm 以下となる小枝となる部分は生成が困難なため、削除をおこなった（図 35）。

青 : QSM

ピンク : 3D メッシュモデル



合成後、円筒サイズの補正をおこなった 3D 樹木モデル

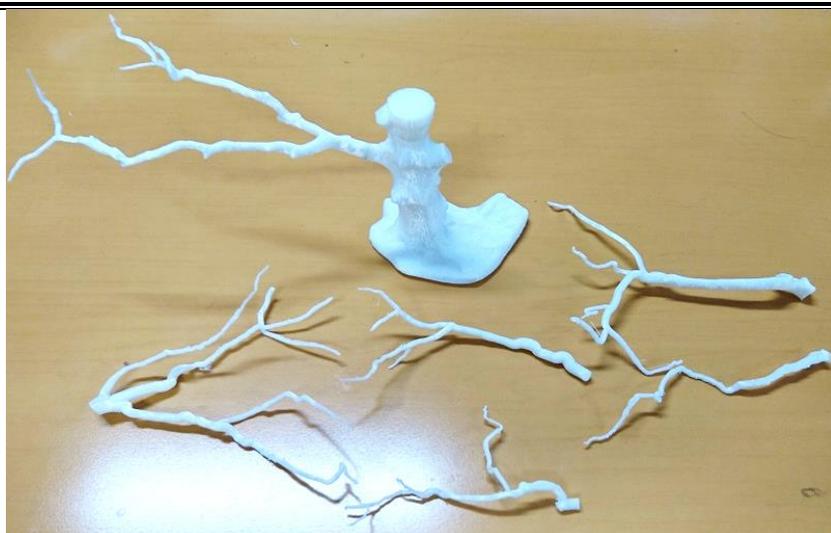


小枝となるモデルを削除し、各パーツに分けた 3D 樹木モデル

図 35 3D 樹木モデルの合成と補正

4.5.6 3Dプリンタによる出力

本研究における出力の設定として積層ピッチを 0.2mm とし、樹幹と枝のパーツを段階的に 3D プリンタから出力する。出力が完了した各パーツを組み立てていくことで 3D 樹木モデルの完成となる。組み立てから完成までの工程を図 36 に示す。枝のパーツの接着には、3D 樹木モデルのデータを参考に目視でおこなった。このことから、完成した 3D 樹木モデルは、枝が伸びる方角などの厳密性が考慮されていないが、今回の被爆樹木の形状再現性において重要なのは樹木の傾斜および、根の爆心地反対側の肥大成長である。そのため、完成した 3D 樹木モデルは被爆樹木が持つ異常を再現できており、ハンズオン展示等での必要となる被爆樹木の再現性は満たしていると考えられる。



① 3D プリンタにて出力された各パーツ

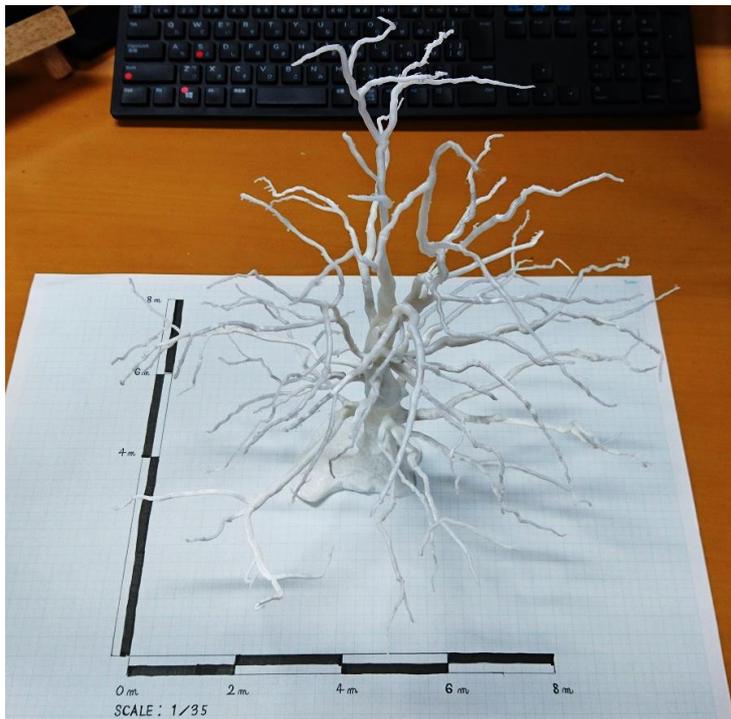


② 各パーツの組立て

図 36 (a) 被爆樹木の模型の組立て



③ 3D 樹木モデルの完成（正面）



④ 3D 樹木モデルの完成（鳥瞰）

図 36 (b) 被爆樹木の模型の組立て

4.6 被爆樹木の傾斜算出への応用

大脇ら¹³²⁾による傾斜傾向の調査手法は、スマートフォンアプリ「Spyglass」¹¹³⁾を用いておこなっている。その手法として、姿勢センサによって被爆樹木の傾斜を算出し、次に根元から主幹が最も傾いている方向を目視によって決定することで、傾斜方位角を GNSS の位置座標と方位から算出する。さらに、あらかじめ登録しておいた爆心地の位置座標を、測定した被爆樹木の位置座標から爆心地方位を算出し、その後、傾斜方位角と爆心地方位角の残差を求めることで、爆心地への傾斜傾向を明らかにしていた。

しかしながら、この手法は計測を迅速に完了できるというメリットがあるが、目視を伴うことが計測精度に影響する懸念がある。そこで、爆心地方位への傾斜という事実にさらなる信頼性を与えるため、TLS による取得データから傾斜角を算出し、傾斜方位角と爆心地方位角との偏差から明らかにした。

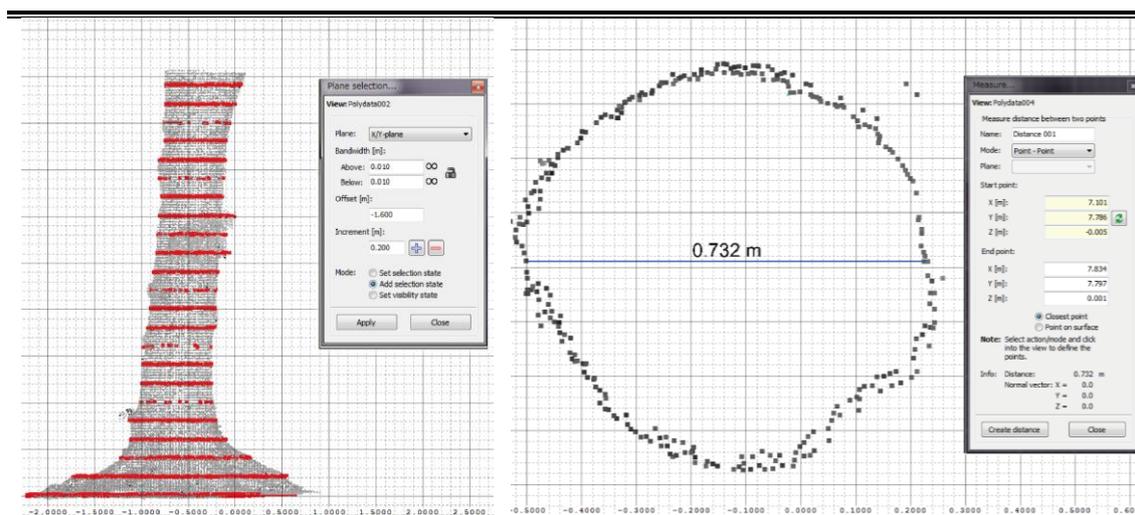
4.6.1 従来の傾斜の算出方法と問題

従来の傾斜算出の手法として、主幹となる樹木点群を抽出し、主幹の樹木点群に閾値を設け、地表部から上部へ 0.2m ごとに、各断面点群の厚みを Z 軸方向に 0.02m として、点群データの断面抽出をおこなった (図 37)。この抽出方法をおこなうことで、各断面の点群データは輪切りされたような円状 (楕円状) となる。これらの円から中心点を導き出すために、円周上に円の長径、短径を構成する 4 点の座標 (X、Y) を読み込み、4 点の座標から中心点を割り出していくことで、対象樹木の傾斜角、傾斜方位角、爆心地から傾斜方位角の方位差分と偏差率を算出した¹¹⁴⁾。表 4 が対象樹木 10 本 (LMS-Z390i を用いて計測した被爆樹木) に行った算出結果である。

しかしながら、この手法では各断面の中心を求める際に、手動と目視によって 4 点を選択するため、精度面での影響が懸念される。また、樹木 1 本の傾斜を算出するのに多くの労力と時間を必要とする。このことから、手動による作業を無くすことで効率化を図り、かつ被爆樹木の傾斜算出のために、正確な中心座標の算出と、傾斜算出をおこなう必要がある。そこで、TLS-QSM 法による、効率的かつ正確な樹木の傾斜および傾斜方位の算出手法の応用をおこなった。対象とする被爆樹木は、2019 年 9 月 18 日-21 日の長崎市での計測調査でデータを取得した、淵神社と長崎大学歯学部付属病院に存在する被爆クスノキとした。

表 4 従来の手法による傾斜の算出結果

	算出値	傾斜角度	傾斜方位	爆心地方位 (地図より算出)	方位差分 B-C	偏差率 (D÷180°)
広島	クログネモチ (広島城跡)	2°56'	216°52'	210°11'	6°41'	3.7%
	イチョウ (縮景園)	35°34'	251°37'	244°02'	7°35'	4.2%
	クスノキ (基町交番前)	6°12'	190°28'	191°43'	1°15'	0.7%
	クスノキ (市営住宅)	11°13'	175°39'	166°00'	9°39'	5.4%
	クスノキ (シリブカ公園)	2°51'	119°13'	246°01'	126°48'	70.4%
	クスノキ (比治山公園)	7°10'	211°42'	303°03'	91°21'	50.8%
	イチョウ (報専坊)	1°35'	207°44'	154°29'	53°15'	29.6%
	エノキ (織町中学校)	11°7'	233°29'	248°18'	14°49'	8.2%
長崎	クスノキ (淵神社)	12°11'	322°21'	10°34'	49°50'	27.7%
	クスノキ (悟真寺)	3°47'	9°27'	3°11'	6°16'	3.5%



主幹の平断面抽出

点群座標の計測

図 37 点群データの断面抽出

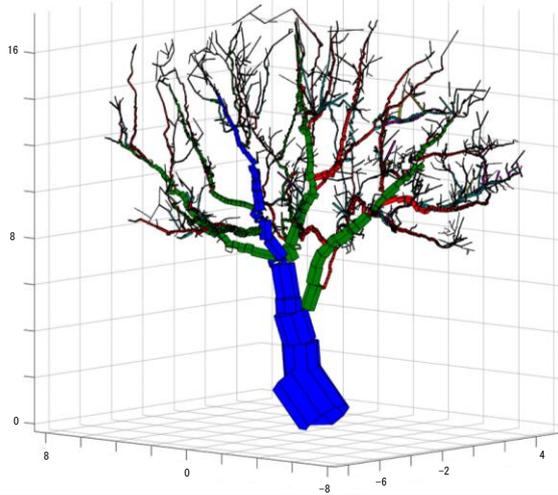
4.6.2 TLS-QSM 法を用いた傾斜と傾斜方位の算出方法

TreeQSM によって構築される円筒モデルは、円筒ごとの中心座標を抽出することが可能であり（図 38）、この中心座標を利用した傾斜と傾斜方位角の算出をおこなう。まず、傾斜の算出手法として、円筒の中心座標の主成分分析による近似直線から、傾斜の算出をおこなう。次に、傾斜方位の算出であるが、VZ-400i による計測にて使用が可能となる **Automatic Registration 2** は、GNSS 情報がレジストレーションに加味されるため、結合データにおける Y 軸は、自動的に真北を示すよう設定されている。そこで、中心座標の 3 次元情報から、X 軸、Y 軸を抽出し、その XY 座標に対して回帰直線を算出することで、被爆樹木の傾斜方位を算出した。また、爆心地方位の算出であるが、**Google map** によって被爆樹木と爆心地の 2 地点の緯度と経度によって求めた。

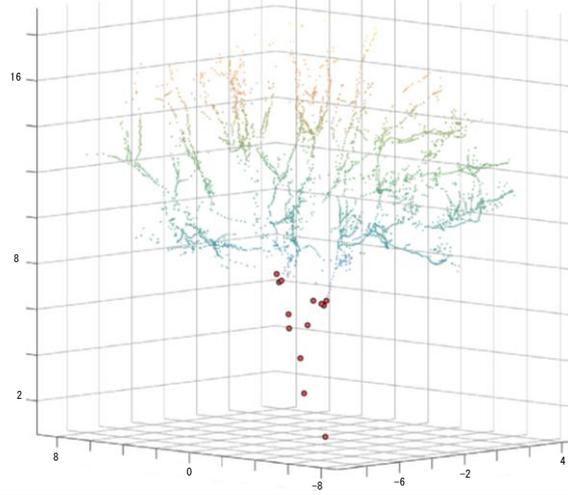
淵神社・長崎医大の両クスノキは、被爆前から存在していたと主幹と、被爆時のダメージによる失われた部位から新たに成長した幹が分岐する形で存在している。被爆時に被害を受けた樹木は治癒が進むにつれ、被爆前の幹が爆心地方向に傾斜していったと考えられる。しかしその後、被爆後の幹が成長にしていく影響により、樹木が全体のバランスを保とうとするため、被爆前の主幹が徐々に爆心地への傾斜から遠ざかっていることも考えられる。このことから、抽出する円筒モデルの中心座標の部位は、分岐した両主幹を含めた樹木の傾斜が算出されるように中心座標の抽出をおこなった。

クスノキ（淵神社）

中心座標の中でも主幹部分
(赤●)の中心座標を使用



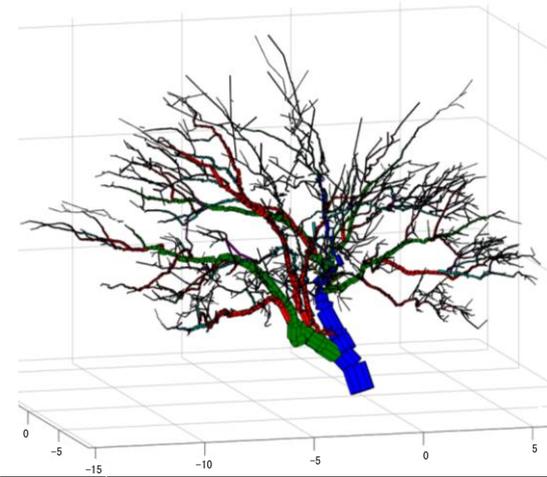
円筒モデル



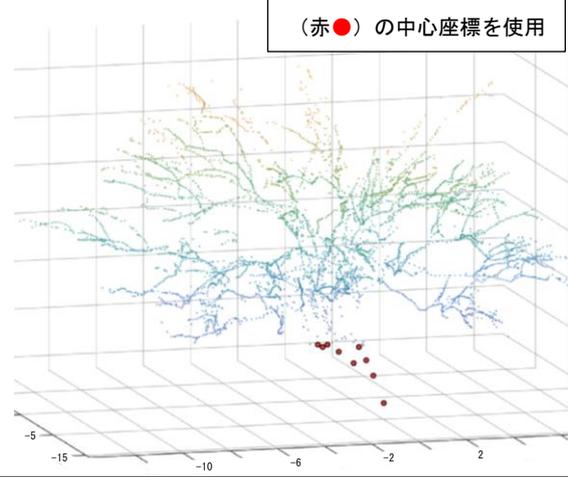
円筒モデルから抽出された中心座標

クスノキ（長崎大学歯学部附属病院）

中心座標の中でも主幹部分
(赤●)の中心座標を使用



円筒モデル



円筒モデルから抽出された中心座標

図 38 抽出された円筒モデルの中心座標

4.6.3 算出結果

TLS-QSM 法を用いた傾斜と傾斜方位の算出結果を図 39 に示す。本手法を用いた淵神社クスノキの算出結果を、表 4 の従来の手法によって得られた結果と比較すると、ほぼ一致していることが分かる。また、本手法による算出によって、従来の手法では 3 時間程を必要としていた所要時間を、30 分程に短縮することができた。このことから、本手法は従来の手法との算出結果と十分な一致が見られたことと必要となる所要時間の短縮を踏まえると、被爆樹木が爆心地へ傾斜している傾向を把握するための有効的な手段であると考えられる。

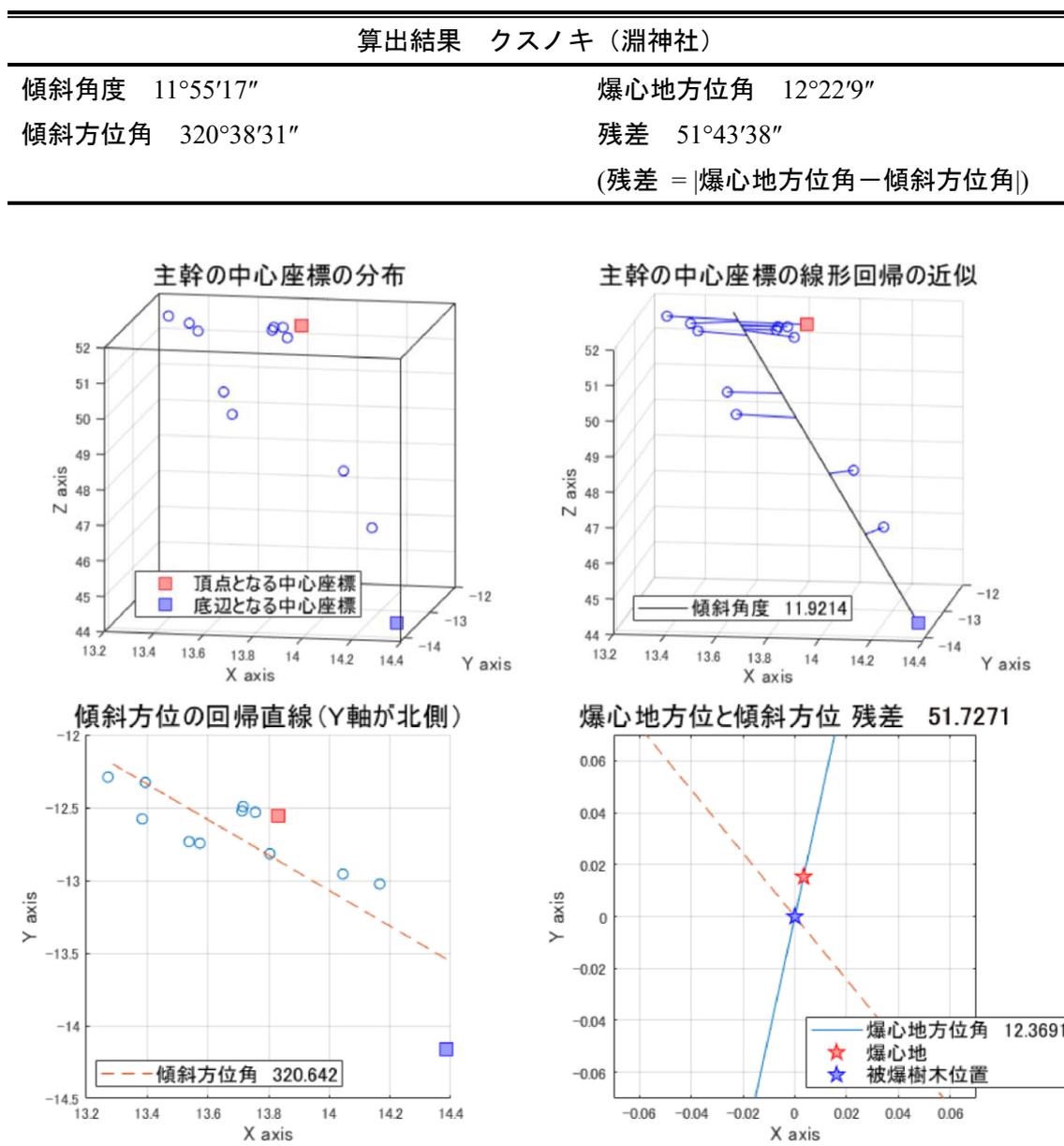


図 39 (a) TLS-QSM 法を用いた傾斜と傾斜方位の算出結果

算出結果 クスノキ（長崎大学歯学部付属病）

傾斜角度 22°54'44"

爆心地方位角 319°28'26"

傾斜方位角 310°40'18"

残差 8°48'8"

(残差 = |爆心地方位角 - 傾斜方位角|)

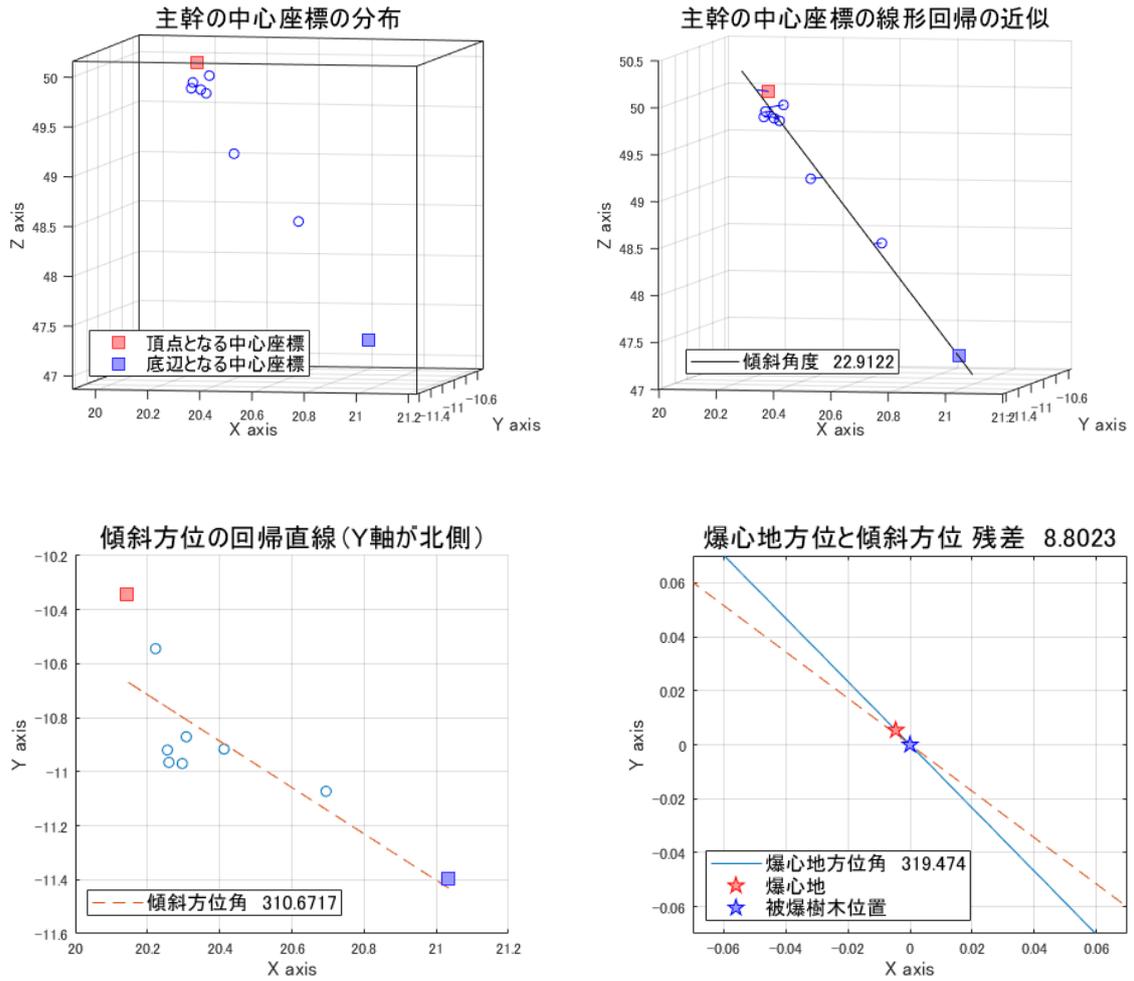


図 39 (b) TLS-QSM 法を用いた傾斜と傾斜方位の算出結果

4.7 小結

本章では、TLS を利用した文化遺産への利用と貢献を明らかにし、文化的価値の高い樹木に対しては、その利用が乏しかったことを背景に挙げた。その中で本研究では、「生きた被爆遺産」として文化的価値が高まっている被爆樹木に対して、TLS-QSM 法を主軸とした応用をおこない、被爆樹木のための 3D 樹木モデルの構築手法を提案した。結果として、メッシュ化処理が可能な根元から主幹の 3D モデルと QSM を組み合わせることで、原爆による被害の外傷を反映させた 3D 樹木モデルの作成が可能となった。また、3D プリンタによって出力された模型は、爆心地への傾斜という現地での認識が困難な特有の樹形に対し、その視認を可能とすることを可能とした。このことから、被爆樹木を本手法にて復元することは、その特徴を詳細に反映できることから有効であると考えられる。

さらに、被爆樹木が爆心地に向かって傾斜しているという特徴を、TreeQSM によって構築された 3D 樹木モデル（円筒状モデル）の中心座標を使用することで、正確かつ効率的な算出を可能とした。以上のことから、認識が困難な爆心地への傾斜に対して、TLS による被爆樹木の計測データに対し、より多く同様の処理をおこなうことで、この事実に対して信頼性を高める手法となる。

第5章 樹木点群および3D樹木モデルの精度検証

5.1 概説

TLSによって取得される樹木点群から、TLS-QSM法を適用させることで詳細な3D樹木モデルを構築することが可能となったが、取得される樹木点群および構築された3D樹木モデルの樹形精度を明らかにする必要がある。そこで、以下の2つの項目の精度検証をおこなう。

(a) TLSにて取得される樹木点群の精度検証

TLSを使用した樹木計測によって得られる樹木点群の形状精度を、TSを用いた計測によって得られる3次元座標を基に精度比較をおこなう。また、樹木計測の環境条件として、風による樹木の動きが精度に影響することが考えられるため、風速計を用いた計測も同時におこなう。

(b) TLS-QSM法にて構築される3D樹木モデルの精度の検証

TreeQSMによって構築された3D樹木モデルと、構築の基となった樹木点群と再現性の精度検証をおこなう。その手法として、3D樹木モデルから3次元座標のみを抽出し、樹木点群の座標と照合し両点群の距離を算出し、QSMが構築された範囲を明らかにすることで精度検証をおこなう。

さらに、(3.3)での東京農業大学世田谷キャンパス内の正門前広場にて計測にて、樹高17mまでの樹木計測の有効性を述べたが、その確証を得るための検証をおこなう。その手法として、TreeQSMによって構築された3D樹木モデルと基となった樹木点群から、樹高17m付近の樹木点群および3D樹木モデルを抽出し、同様の手法を用いた精度検証をおこなうことでその有効性を検証する。

5.2 TLSにて取得される樹木点群の精度検証

TLSを用いた樹木計測は、3次元形状を取得する有効性が示されているが、実際にその形状に対して精度検証を行った事例は皆無であった。そこで、TSを利用した精度検証をおこなうことで、TLSによって取得される樹木の形状精度を明らかにした。対象とした樹木は、東京農業大学世田谷キャンパス内に自生する樹木3本（ハクモクレン、カナメモチ、ウメ）とした。

5.2.1 精度検証の手法

本研究で用いた手法として、精度比較で対象とする樹木にターゲット（リフレクタ）の設置をおこない、TSによってターゲットの計測をおこない3次元座標を算出する。同時に、TLSでも対象樹木にスキヤニングをおこない、ターゲットを検出することで3次元座標を得る。その後、TSの3次元座標を基準としたTLSで取得された3次元座標との残差の標準偏差を出すことで、精度検証をおこなった（図40）。なお、3次元座標の取得時には、風による樹木の動きが大きく精度に影響すると考えられるため、風速計を用いた計測時の最大風速と平均風速を記録した。また、TLSによるターゲットの検出時に、自動的に検出がされなかったターゲットは精度検証に含んでいない。

TSとTLSの2機種種の3次元座標は、それぞれローカル（相対）座標のため、平行移動および回転移動による位置補正をすることで座標系を統一する必要がある。そこで、基準となる3点（OP（原点）、A,B）を計測し、それらの3次元座標を使用することでTSとTLSの座標系を統一した（図41）。この処理により、TSによって得られたターゲットの3次元座標から、TLSによって得られるターゲットの3次元座標を照合することが可能となる。

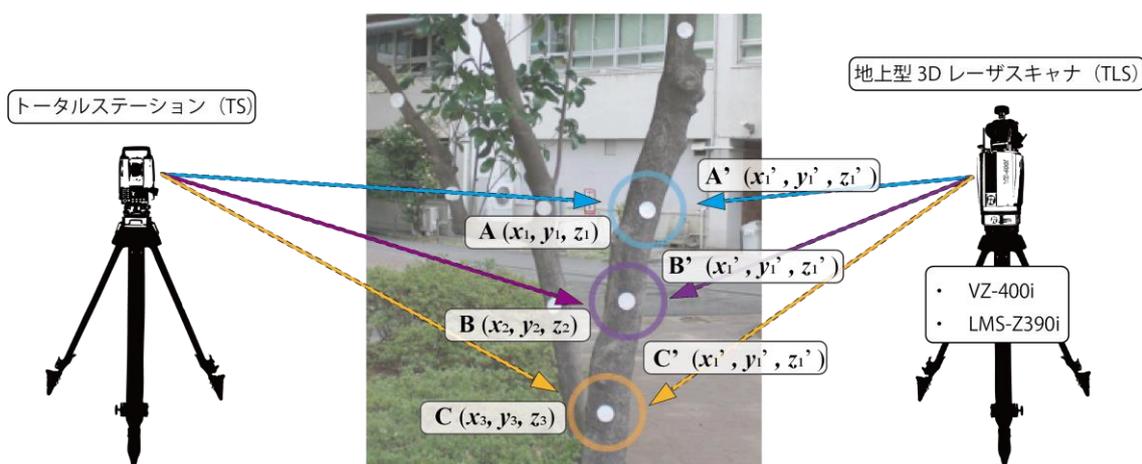
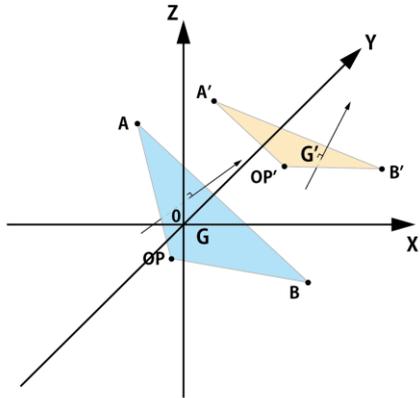
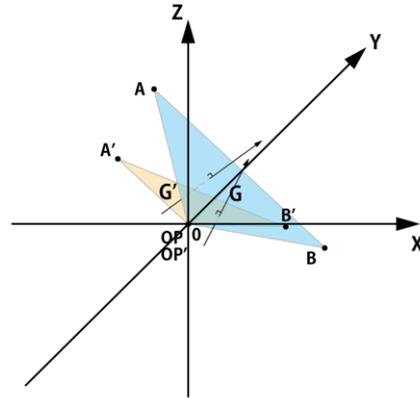


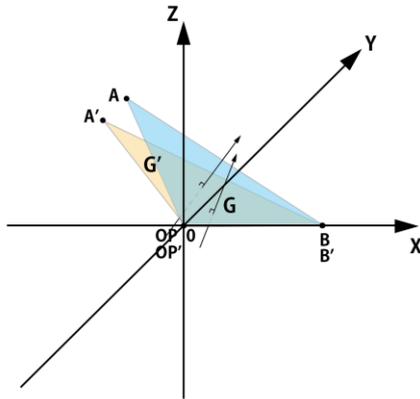
図40 ターゲットの設置と3次元座標の取得



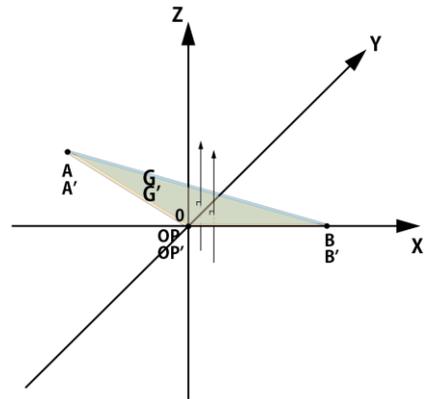
① TS, TLS によって得られる両座標系はローカル（相対）座標となっている



② OP（原点）の座標を統一し平行移動をおこなう



③ 両平面 (G,G') の直線 (OPB,OP'B') が X 軸に沿うように回転移動



④ 両平面 (G,G') が Z 軸に対して垂直となるように回転移動

図 41 平行移動と回転移動による座標系の統一

5.2.2 精度検証の結果

TS と TLS (VZ-400i、LMS-Z390i) 2 機種 of 座標の照合による、残差の標準偏差の結果を表 5 に示す。

表 5 TS を用いた TLS による樹形情報の取得の精度検証

樹種	ハクモクレン			
風速	最大(MAX) :	1.7m/s	平均(AVG) :	1.1m/s
			標準偏差	
機種	検証点	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
VZ-400i	20	1.2	1.5	1.7
LMS-Z390i	17	50.9	124.3	7.5
樹種	カナメモチ			
風速	最大(MAX) :	2.8m/s	平均(AVG) :	1.4m/s
			標準偏差	
機種	検証点	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
VZ-400i	16	59.8	69.0	28.5
LMS-Z390i	16	84.0	91.4	24.6
樹種	ウメ			
風速	最大(MAX) :	3.4m/s	平均(AVG) :	1.6m/s
			標準偏差	
機種	検証点	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
VZ-400i	19	7.7	73.5	13.9
LMS-Z390i	18	7.8	73.5	12.4

5.2.3 精度結果の特徴と分析

精度検証を考察すると、風による樹木の動きを考慮に入れた場合、全ての軸（X 軸、Y 軸、Z 軸）に対して、標準偏差でおおよそ 70 mm 以内の誤差にて樹木の形状データが取得できることが分かった。また、垂直方向の Z 軸に対して精度が高い要因は、風による樹幹の上下の動きが少ないことが考えられる。対照的に、水平方向の X 軸、Y 軸に対しては風による樹木の動きが大きいため精度が低下した。さらに、精度の傾向として、設置したターゲット（図 42）が、幹枝が細くなる樹木上部や枝先に近づくにつれ、風による動きの影響を受けやすくなると考えられ、精度が低下することが明らかとなった（表 6）。



図 42 ウメに設置したターゲット（検証点）

表 6 ウメに設置したターゲット（検証点）の高さごとの残差

TS と VZ-400i との残差				
※検証点	地表からの高さ (m)	残差		
		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
4	0.841	3.0	8.2	1.1
1	1.114	1.0	3.3	3.6
5	1.223	4.3	6.2	5.5
3	1.486	8.1	0.5	10.4
2	1.522	0.7	4.5	7.7
7	1.700	9.2	11.5	22.4
6	1.816	4.5	21.6	20.6
8	2.070	15.0	37.2	30.0
11	2.101	3.4	62.1	15.3
9	2.123	4.7	63.0	27.9
17	2.222	10.5	77.8	20.4
10	2.502	16.1	105.4	36.8
13	2.505	2.8	115.8	25.9
15	2.701	13.7	170.4	13.3
18	2.717	28.1	154.6	31.8
16	2.741	19.4	172.5	25.3
12	2.808	1.9	177.9	27.4
14	2.924	9.2	181.1	42.4
19	2.953	24.1	204.2	42.9

※ 番号は図 43 の検証点

5.3 TLS-QSM 法にて構築される 3D 樹木モデルの精度検証

TLS-QSM 法によって構築される 3D 樹木モデルに対し、構築の基となった樹木点群との比較により再現性についての精度検証をおこなう。そこで、樹木全体を対象とした樹木点群と 3D 樹木モデルの精度比較と、樹枝部のみを対象とした同様の精度比較をおこなった。また、(3.3)の東京農業大学世田谷キャンパス内の正門前広場での計測にて、樹高 17m 程度までの樹木であれば形状情報の取得ができていたことを述べた。そこで、その確証を得るため、樹高 12m-17m 付近のみを対象とした 3D 樹木モデルの再現性の精度検証をおこなった。精度検証として使用する樹木は、清澄庭園の対象エリアで最も樹高のあるクスノキとした。なお、クスノキの樹高は、葉点群のある状態で 17.657m、幹・枝点群の状態にて 16.432m である (図 43)。

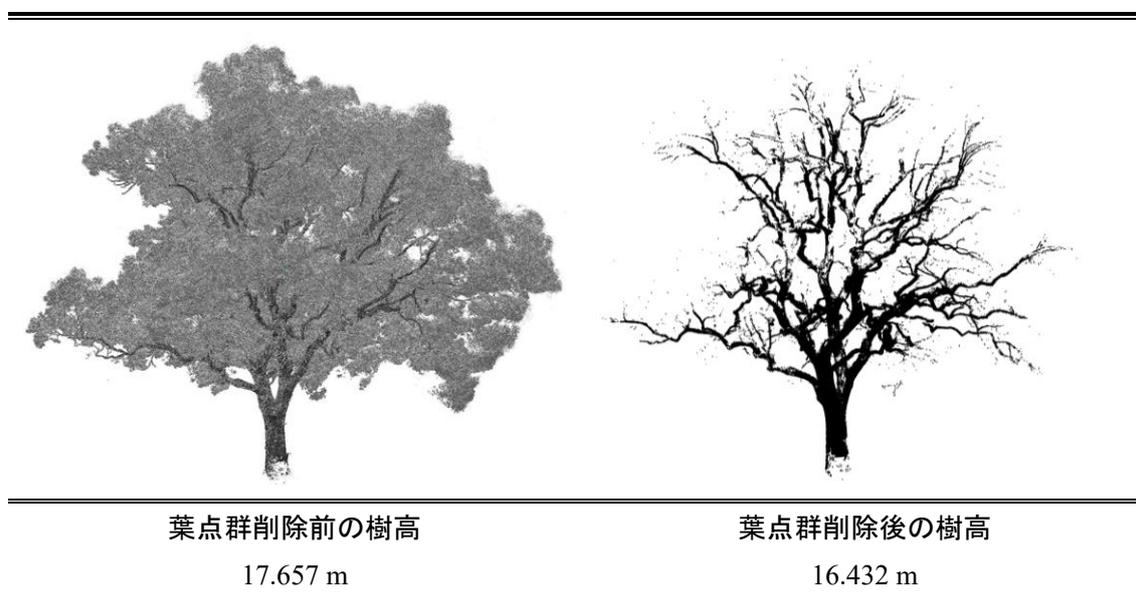
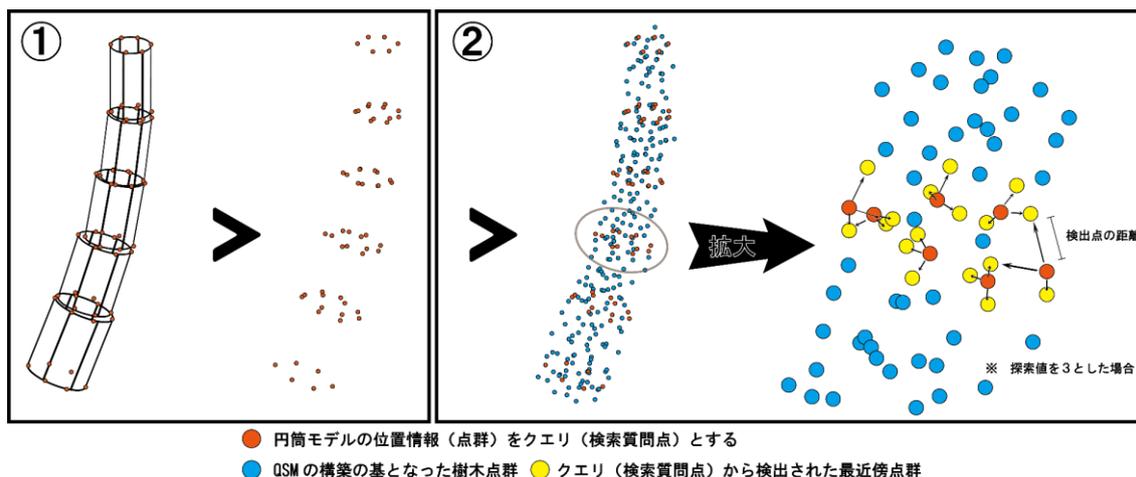


図 43 精度検証の対象とするクスノキ

5.3.1 精度検証の手法

精度検証の手法として、TreeQSM によって構築された 3D 樹木モデル（円筒状モデル）から、3次元座標のみを抽出する。その後、3D 樹木モデルから抽出された 3次元座標点を構築の基となった樹木点群と照合し、検索質問点（クエリ点）¹⁰⁰⁾¹¹⁵⁾として、最も距離が近い点群を検出する（Knn：最近傍隣接点探索）ことで、樹木点群から構築される 3D 樹木モデルとの距離を明らかにした（図 44）。なお、クエリ点からの最近傍探索値は 5 とした。



- ① 円筒モデルから位置情報のみを抽出
- ② 円筒モデルの位置情報を QSM の構築の基となった樹木点群と照合し、クエリとして最近傍探索をおこなうことで、検出点（樹木点群）との距離を算出する

図 44 構築される 3D 樹木モデルの精度検証の手法

5.3.2 樹木全体での精度検証の結果

樹木全体に対しての精度検証の結果を図 45 に示す。結果、平均距離 0.018m および標準偏差 0.016m の範囲に 3D 樹木モデルが構築されることが明らかとなった。

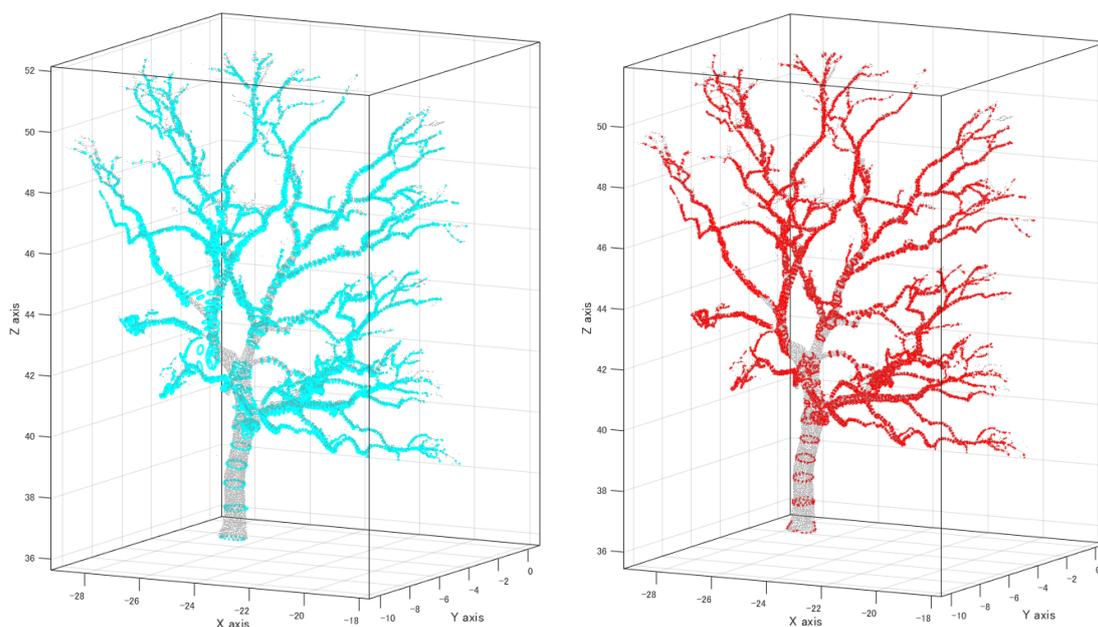
樹木点群と円筒モデルの位置差座標の表示 円筒モデルの位置座標をクエリとして検出

● 樹木点群

された樹木点群の最近傍点群

● 円筒モデルの位置座標

● 検出された最近傍点群



最近傍探索値 : 5

最大距離 : 0.441 m

平均距離 : 0.018 m

標準偏差 : 0.016 m

図 45 樹木全体を対象とした 3D 樹木モデル構築の精度検証

5.3.3 枝部に対する精度検証の結果

枝部に対する精度検証を図 46 に示す。結果、平均距離 0.012m および標準偏差 0.006m の範囲に、枝モデルが生成されることが明らかとなった。

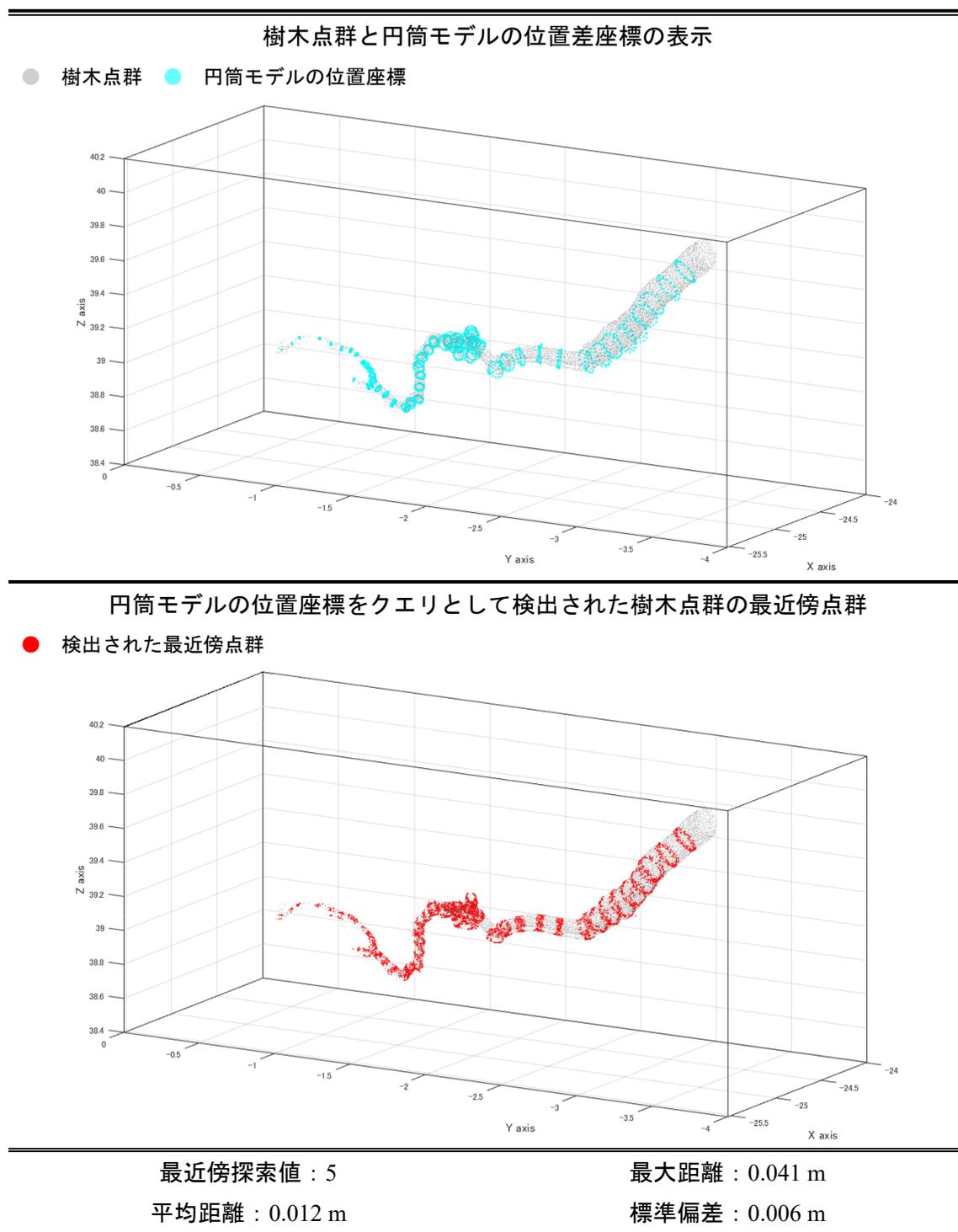
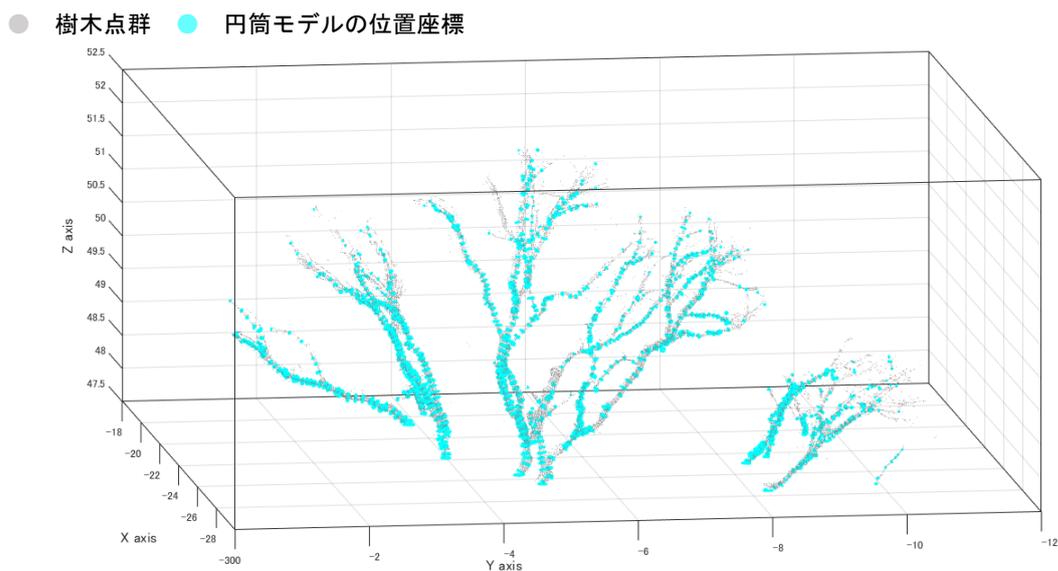


図 46 枝部分を対象とした 3D 樹木モデル構築の精度検証

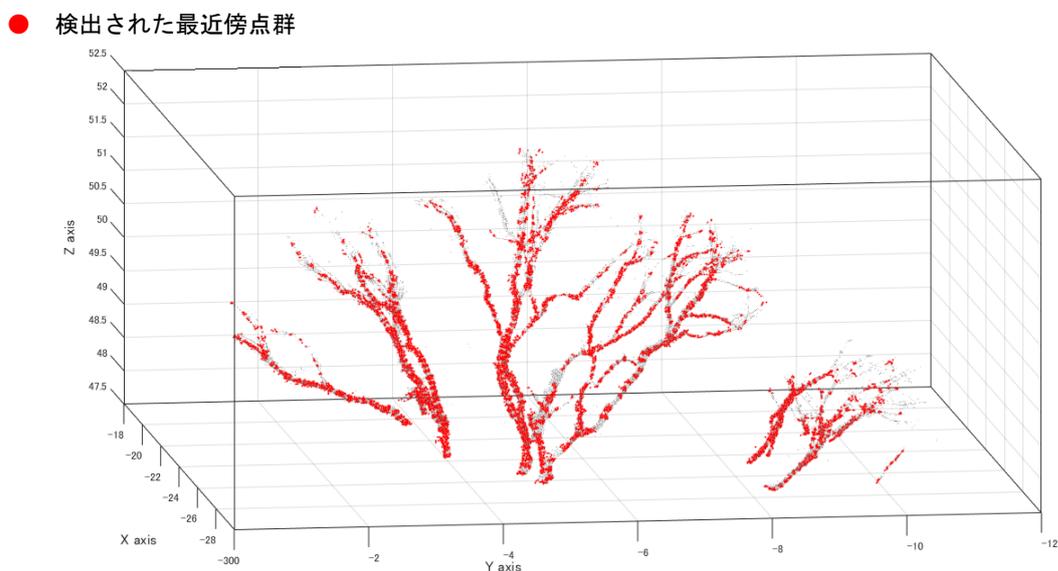
5.3.4 樹高 12-17m 地点での精度検証の結果

樹高 12-17m 付近での 3D 樹木モデル構築の有効性を検証するため、対象樹木から樹高約 12m 以上の部分の樹木点群と 3D 樹木モデルの抽出をおこない精度検証をおこなった。図 47 の結果から、平均距離 0.018m および標準偏差 0.011m の範囲に 3D 樹木モデルが構築されることが明らかとなった。

樹木点群と円筒モデルの位置差座標の表示



円筒モデルの位置座標をクエリとして検出された樹木点群の最近傍点群



最近傍探索値 : 5

最大距離 : 0.206 m

平均距離 : 0.018 m

標準偏差 : 0.011 m

図 47 樹高 15m 付近を対象とした 3D 樹木モデル構築の精度検証

5.4 精度の考察

5.4.1 TLSにて取得される樹木点群の精度検証

TLSにて取得される樹木点群の精度検証では、おおよそ標準偏差 70 mm以内の精度にて樹形情報を取得できることが明らかとなった。この精度を、「地上レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル（案）」¹¹⁶⁾に適用させ考察をおこなった。本マニュアルは、TLSによる土木工事時の切土・盛土量の算出に対しての取得精度の規程であるが、まず、条件として器械高を 1.5m とし、50m 先の対象物（規程では水平面）が数 mm 以内で観測できることが条件としてある。本研究で使用した VZ-400i では 100m 先で 5mm¹⁰⁵⁾、LMS-Z390i では 50m 先で 6mm 以内¹⁰⁴⁾での観測が可能となっていることから、この規程に当てはめることができる。規程では、観測点間隔 1m とした場合、50m 先の標高に対して較差精度 20 mm（標準偏差）以内での計測が必要である。さらに、観測点間隔 0.5m とし 25m 先の標高に対しては較差精度 5mm（標準偏差）とされている。このことから、標準偏差 70mm という精度は公共測量の規程では、十分な精度とは言えない。しかしながら、表 5 に示すように、ハクモクレンの計測時の風速が小さい場合は、規程を満たす精度で計測が可能であり、カナメモチ、ウメの計測時の風速が大きい場合は、規程を満たすのは困難である。地上レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル（案）には当然ながら、風速に関する規程は存在せず、樹木は切土・盛土とは異なり、常に風などの環境条件で動きを伴う動体的な対象物であり、計測で常に誤差が生じてしまうことを念頭に入れなければならない。このことから、樹木に対する特有の規程が望まれる。

5.4.2 TLS-QSM 法にて構築される 3D 樹木モデルの精度検証

TLS-QSM 法によって構築される 3D 樹木モデルが、構築の基となった樹木点群からどれほどの再現性を満たしているかを、樹木全体から枝部、樹高 12m-17m 付近へと対象を絞り、精度検証をおこなった。結果として、樹木全体で標準偏差 0.016m、枝部で標準偏差 0.007m、樹高 12-17m 付近でも標準偏差 0.011m 以内の範囲にて 3D 樹木モデルが構築されていることが明らかとなった。また、(3.3)にて樹高 17m 程度の樹木に対してまで、TLS を用いた樹形情報の取得の可能性を述べたが、精度検証から 3D 樹木モデルが高精度に構築されていることが明らかになったことで、その確証を得ることが出来た。以上のことから、TreeQSM 法による樹形の再現性において、精度面からも有効性を示すことができた。

第6章 終章

6.1 本研究の成果

本論では、これまで日本庭園の保存ための測量手法として、庭園樹木の正確な樹形情報の記録が成されておらず、さらにその重要性に対して十分な考察がおこなわれなかったことに着目し、ICTを利用した庭園樹木の記録をおこなうための検討をおこなった。そこで、ICTの1つである地上型3Dレーザスキャナ（TLS）を使用した計測を清澄庭園にて実施し、庭園樹木の取得データ（樹木点群）を基にした、詳細な樹形を反映させた3D樹木モデルの構築手法を提案することで、保存へ向けた考察をおこなった。

本研究を遂行するにあたり、第2章にて樹木の形状情報の取得に特化した3次元計測手法の検討をおこない、レーザ計測技術の中でも特に、TLSによる樹木計測の有効性を示した。第3章では、清澄庭園でTLSを用いた実測調査を事例として、TLS-QSM法による処理を樹木点群へ適用させることで、効率的かつ詳細な3D樹木モデルの構築が可能となった。第4章では、文化的価値として保存への意識が高まりつつある被爆樹木に対し、TLS-QSM法を主軸とした応用をおこなうことで、被爆樹木が持つ特徴を反映させた3D樹木モデルの構築が可能となった。第5章では、TLSにて取得される樹木点群および構築された3D樹木モデルに対して精度検証を実施することで、樹木の再現性に関しても有効性を示すことができた。本章では、本論の総括として各章にて得られた成果から、日本庭園にてTLSの利用がもたらす役割をまとめる。

6.1.1 日本庭園の保存と復元に向けた保存手法としての重要性

日本庭園は、成長変化する植物を主たる構成要素としている空間であり、庭園樹木は日本庭園の特質を決定づける重要な景観構成要素でありながら、庭園内の植物要素の保存が最も困難であり、日本庭園の文化的価値としての側面を樹木管理の不備によって喪失される問題があった⁸⁾¹¹⁷⁾¹¹⁸⁾。特に、庭園樹木には主庭や池畔（ちはん）など注視密度の高い空間における景観木¹¹⁹⁾となるものには、たとえばマツの緑摘みのように一枝一葉のレベルで手入れの精度や樹形の保存が工夫される必要性が求められている³⁾。このことを踏まえると、本研究で提案した3D樹木モデルは、精度検証の結果からも十分に主幹から幹・枝に至る樹形の再現性を満たしていることから、現存の樹木を原形で記録し、樹形を維持していくことへの重要な資料としての役割に十分期待することができる。

さらに、歴史的庭園や近代庭園において、失われた本来の日本庭園の姿形を復元する取り組みがおこなわれているが、植栽の復元では原始古代から近代にいたるまで、日本庭園の樹形を詳細に記録した資料というものは少なく、古写真や絵図などから当時の植栽のありかたを考察していた⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾¹²⁰⁾。芸術上・観賞上の価値が認められる日本庭園を、恒久的な形で維持管理していく重要性がある一方、災害などによる被害や樹木の損失、時代によって求められる日本庭園の機能性の変化などにより、日本庭園の姿形が経年によって変化していく

ことも、今後避けられない側面も考えられる¹¹⁷⁾。このことから、本手法で提案した3D樹木モデルは、その時代に存在した日本庭園の姿形を、特に庭園樹木によって現出された空間の記録として保存していくことにも貢献できる。

以上のことより、日本庭園における庭園樹木の樹形情報の取得をTLSによる3次元形状として記録し、詳細な3D樹木モデルとして記録する重要性が考えられ、今後の保存や復元に向けた取り組みの中でも重要な資料となる。

6.1.2 原爆被爆樹木の3D樹木モデルの意義と重要性

遺跡や歴史的建造に対して、3次元計測技術を導入するメリットは、既に多くの調査研究事例によって述べられている。特に、English Heritageによる「3D Laser Scanning for Heritage」では、レーザ計測技術を用いた適切な使用と目的、メリットについてまとめられている¹⁰⁷⁾。そこで、生きた文化遺産である被爆樹木に対し、TLSを利用した調査がどのような意義があるかを、生態学的立場も踏まえながら考察をおこなった。以下に、TLSを利用した被爆樹木の3D樹木モデルを作成する意義について述べる。

- ① 測定時点の正確な樹形を保存でき、その後の各種要因による変化を知る基準となる。
- ② 樹木全体の樹形を一望しテクスチャに触れることで、個体ごとの特徴と被害状況などを体感できる。
- ③ 被爆樹木のテクスチャを模型として写像することで、ハンズオン展示など多くの観察者に対応できる。
- ④ 多くの被爆樹木モデルを併置して一望することで、各樹木の個性を認識できる。

①については、広島市では被爆樹木を1996年度にリスト化し、平和行政の一環として保存のための治療や土壌改良の経費を予算計上してきたが、多くが老木化や病気による枯死の不安を抱えている。このことから、被爆樹木の形状の変化を3Dモデルによって蓄積していくことで、樹木医等の専門家による健康状態の判断に貢献することができる。②、③、④については、3Dプリンタによって出力された模型は手で触れることができ、被爆樹木の理解を一層深めることができる。そのため、平和教育への活用が考えられ、特有樹形等の実態を把握することに役立つと考えられる。さらに、被爆樹木が爆心地へ向かって傾いていることを鳥瞰的に認識できるため、爆心地からの距離と被爆樹木の分布図を利用することで、3D樹木モデルの模型をそのマップに設置し、爆心地との方位関係を認識することが可能である。それにより、被爆樹木が単木の集合ではなく、爆心地を中心として市内に面的に広がる一体的な「森」であるという発想が提唱されており¹¹⁰⁾、それらの空間的相互関係を認識させることにも貢献できると考えられる。

6.2 本研究の成果から予測される学術的発展性

本研究では、詳細な 3D 樹木モデルを、保存・復元のための記録としての観点からその重要性について述べた。一方、他分野においても詳細な 3D 樹木モデルは、植物学や林学、農学、気候学に至る様々な分野において応用が利く、重要な解析・研究材料として重要性が述べられている¹²¹⁾¹²²⁾¹²³⁾¹²⁴⁾。このことから、本研究で取り組んだ、樹木に対する ICT を利用した有効的活用法として、3D 樹木モデルの構築・活用・解析をおこなうことは、汎用性と実用性が高いことから、社会的な貢献に直結することでも重要と考えられる。そこで以下に、本研究の成果から予測される学術的発展性について述べる。

6.2.1 3D 樹木モデルがもたらす造園業界への生産性の向上

近年、ICT を利用した抜本的な生産性向上を目指す取り組み「i-Construction」を、国土交通省が 2016 年度より開始し¹⁶⁾、建築・土木業界では調査・測量から設計、施工、検査、維持管理・更新まで、あらゆる建設生産プロセスにて総力を挙げ生産性の向上に取り組んでいる¹²⁵⁾¹²⁶⁾¹²⁷⁾¹²⁸⁾。i-Construction の取り組みの中で、「BIM(Building Information Modeling)」¹²⁹⁾¹³⁰⁾・「CIM(Construction Information Modeling)」¹³¹⁾¹³²⁾などの 3DCAD によって作成される建築モデルに、建物・構造物に関する情報（客室名称・面積、材料・部材の使用、仕上げ等）をモデルに付属させるモデリング技術がある。この技術は、ICT によって得られた取得データを基に構築され、建設情報基盤として設計から施工に至る全プロセスのシームレス化に貢献し、生産性の向上に大きな役割を果たしている¹³³⁾。このことから、BIM・CIM によって構築された建築モデルは、「形状の見える化」によって専門知識を持たない者に対しても、分かりやすい構造情報を提供することができる¹³⁴⁾¹³⁵⁾¹³⁶⁾¹³⁷⁾。

そこで、3D 樹木モデルが造園業界でもたらす貢献として、建築・土木業界にて取り組まれている i-Construction によって普及した、BIM・CIM と同様の役割をもたらすと考えられる。造園業界では庭園維持管理の中で、樹木管理は非常に重要である。しかしながら、樹木の維持管理のための剪定には、現地での造園技能者による判断でおこなわれており、前もって庭園樹木の樹形をあらかじめ把握したうえで、庭園景観の維持管理をも考慮に入れた剪定計画をおこなうことができれば、生産性に大きな期待ができる。よって、本研究で提案した 3D 樹木モデルの構築手法は、日本庭園における「形状の見える化」として、庭園樹木の樹形状況を詳細に把握可能とし造園業界で必要とされる樹木の維持管理に大きな貢献ができると考えられる。

また、TLS-QSM 法は、本来樹木の地上バイオマス量 (AGB) などのパラメータの算出を目的とした手法である⁷⁵⁾⁷⁹⁾⁸⁰⁾。このことから、樹木の全体積・主幹体積・枝体積、樹高、主幹の長さ・枝の長さなどの情報を正確に取得することが可能である。さらに、TLS による反射率による情報を解析していくことで、水の欠乏 (水ストレス)¹³⁸⁾¹³⁹⁾¹⁴⁰⁾によっておこる枯れた樹枝の検出も可能になると考える。以上のことを踏まえると、建築・土木業界での i-Construction による BIM の活用による生産改革が、造園業界では 3D 樹木モデルの活用によ

って可能となる。さらに 3D 樹木モデルの付属情報は、日本庭園の樹木管理にとどまらず、庭園の補修から計画、そして定期的な計測による樹木成長のパラメータまで算出が可能と考えられ、造園業界でのあらゆる施工プロセスのシームレス化に貢献することができると考えられる。

6.2.2 3DCG 分野における 3D 樹木モデルがもたらす発展性

3DCG（コンピュータグラフィック）分野では、樹木などの植物の 3D モデリングに関する研究が活発におこなわれており、詳細な 3D 樹木モデルの再現への手法構築に多くの関心が集まってきた¹⁴¹⁾。しかしながら、3DCG で使われる多くの 3D 樹木モデルは、実測による 3D モデリングがおこなわれたものではなく、樹種に応じた樹形の再現が達成されていない。さらに、樹形の幾何学的な複雑さによる 3D モデリングの再現性の難易度から、樹木表現が簡略化されている場合も多い¹⁴²⁾¹⁴³⁾。このことから、本研究の手法を用いた 3D 樹木モデルを利用することは、精度検証による再現性の有効性を示されていることから、3DCG に利用することへも有効であると考えられる。同時に、建築・土木分野では、プロジェクト計画における最終的な完成予想図を、BIM・CIM による 3D モデルとして第三者に構造的な観点から理解しやすいように提供することが一般的となっている。そこで、このような完成予想図をさらに発展させる目的として、建物のみならず計画されている植栽（樹種・樹形）までを盛り込んだ完成予想図を提供していくことが、本研究による 3D 樹木モデルの利用によって可能になると考えられる。

6.3 総括

本研究で示した、3D 樹木モデルの効率的な構築手法は、日本庭園での造園学的な観点と文化的価値を有する被爆樹木に対しての観点から、特に保存へ向けた有効的手段となることを述べた。また、詳細な 3D 樹木モデルは多様な分野から研究材料としての重要性が大きいことから、造園業界における生産性の向上と 3DCG 分野への活用への期待を例とした学術的発展性を述べた。このことを踏まえると、樹木は街路樹として我々の生活環境にある身近なものから、庭園樹木のような観賞上のもの、被爆樹木のような文化的価値のあるもの、そして 3DCG 分野での仮想世界で利用される仮想樹木など、現実から仮想現実に至るまであらゆる所に存在するオブジェクトと考えることができる。このことから、3D 樹木モデルの利用目的には、管理や保存、リアリティなど研究分野に応じて求められる需要が異なる。しかし、全ての研究分野に共通する 3D 樹木モデルに求められる重要な要素として、正確な樹形の再現性である。

本研究では、TLS を使用した計測によって得られた樹木点群から TLS-QSM 法を主軸とした 3D 樹木モデルの構築をおこなった。しかし、本来 TLS-QSM 法は AGB 推定のための 3D モデリングアルゴリズムであり、使用した TreeQSM においては樹形再現性に対しても有効性が示されているが、精度検証による明確な再現性が明らかとなっていなかった。そこで、TLS による樹形情報の取得精度と構築される 3D 樹木モデルの再現性の精度検証によってその有効性を示した。これにより、本研究の 3D 樹木モデルの構築手法は、樹形の再現性の観点から考察しても、樹木に関わる多様な研究分野に対して適応性が十分に考えられる

以上より、本手法による詳細な 3D 樹木モデルの迅速な構築を可能にしたこと、かつ精度検証による再現性の明確化によって、改めて汎用性と実用性の面において重要な研究手段として今後の発展に大きな期待ができる。

謝辞

本論文は、著者が指導教員である國井洋一教授のご指導の下、博士後期課程においておこなった研究成果をまとめたものである。

國井洋一教授には、学部から博士前期課程の期間を踏まえ、博士後期課程に至る長きにわたり献身的な指導を賜った。自身の性分にて、他者からの指導や意見による研究方針の介入によって、研究の一貫性を損失させてしまいやすいことを考慮して下さり、研究活動では、研究テーマや方向性に関して最大限の自主性を尊重していただいた。しかしながら、自主性の方向性を見誤った時には、その都度、厳しく的確な意見と研究方針に関する新たな見地を示していただき、何度も訪れた難局を乗り越えていくことができた。また、国内での学会活動にとどまらず国際学会での発表の機会を頂けたことは、国内での研究活動にとどまらず、国際的な場においても研究活動を遂行する重要性和、国際標準として自身の研究の立ち位置を常に認識することの重要性に気づかせていただいた。ここに深甚なる謝意を表す。

山崎元也教授には、主査として研究活動において包括的な観点からご助言を賜った。特に、学位論文を執筆する上で、研究の全体的な流れと内容に関して、瞬時に第三者に明確に伝えられる手段と組み立てを考慮しておくことの重要性をご指導していただいた。そのため、学術的観点と大衆の観点の両面性を山崎元也教授のご指導の下、本論文に含ませることができたと考える。ここで敬意と謝意を表す。

鈴木貢次郎教授には、副査をお引き受けいただき、さらに樹木の専門知識の乏しい自身に対して多くのご助力を賜った。清澄庭園での樹木調査においては、鈴木貢次郎教授からの清澄庭園での樹木調査の協力および資料提供を賜ることができなければ、樹木計測が主体となった本研究に学術的要素を盛り込むことが困難となっていたと思われる。ここで敬意と謝意を表す。

栗野隆准教授には、副査をお引受けいただき、研究においては主に日本庭園の成り立ちと発展に関する情報を提供して下さった。特に、日本庭園における測量による実測平面図の作成の歴史と、その必要性が高まるきっかけとなった出来事に関する資料を提供して下さったことは、本研究の主体となる日本庭園での TLS を用いた実測による重要性和発展性に大きな道筋を見出すことが可能となった。ここで敬意と謝意を表す。

鈴木雅和名誉教授（筑波大学）には、副査をお引き受けいただき、本論文において提案した技術が如何なる学術的・社会的な重要性を持つかのご助言を賜った。特に、原爆被爆樹木などの文化的価値を有する樹木に対し、本研究の技術を応用することの機会と広島市・長崎市における計測調査の便宜を図っていただいた。それにより、技術的探求による無機的な側面が強い本論文を、文化的背景という極めて有機的な学術的側面を本論文に持たすことができた。ここで敬意と謝意を表す。

近津博文名誉教授（東京電機大学）には、学会などでお会いする都度、自身の研究活動の啓発のきっかけとして大きな影響を与えて下さった。忘れられないお言葉として「セブン・イレブンをやりなさい。」（朝7時に研究を始め夜11時に帰宅する生活をすれば結果は必ず

ついてくる) というものがある。恥ずかしながら、自身はセブン・イレブンのような研究生生活には到底及ばないものであったが、研究者としての覚悟を意識する上で大きな糧となった。ここで敬意と謝意を表す。

中川雅史教授(芝浦工業大学)には、日進月歩で ICT 技術の発展が進む航測業界において、常に動向の探索意識を持ち続けることの重要性を説いていただいた。そのため、多岐にわたる分野を扱う航測業界において、どの分野に対しても最低限理解できる知識を身に付けておく必要性を学ばしていただいた。ここで敬意と謝意を表す。

増田宏教授(電気通信大学)には、研究室にまでお招きお頂き、樹木点群を対象とした研究に関連する増田研究室の既往研究や、海外を中心とした研究事例の情報提供などをしていただいた。分野として既往研究が多くない中、頂いた情報は研究活動において大きな助けとなった。ここで敬意と謝意を表す。

溝口知広准教授(日本大学)、石川貴一朗准教授(日本工業大学)、松本剛氏(株式会社飛騨の森でクマは踊る 取締役)には、2017 年の岐阜県飛騨市におけるレーザ計測機器を用いた雑木林調査でお世話になった。計測調査に参加できたことで、林業におけるレーザ計測技術の重要性と樹木管理における貢献の大きさを知ると同時に、技術的な知識でも多くを享受することができた。ここで敬意と謝意を表す。

清水英範教授(東京大学)、布施孝志教授(東京大学)には、日本測量協会の学生編集員活動においてお世話になったと同時に、学会などでお会いする都度、自身の研究活動において常に気をかけていただいた。特に、布施孝志教授からは、研究生生活における経験をお聞かせ頂いたことは大きな心の助けとなった。ここで敬意と謝意を表す。

佐々木公一氏(株式会社リーグルジャパン)および松田重雄氏には、地上型 3D レーザスキャナの使用において、長年に渡り献身的な計測指導およびデータ処理の指導を賜った。特に、本機器を使用した樹木計測の研究事例や仕様の不明瞭な個所についての迅速な資料提供は、本論文の執筆をする上で大きいな助けとなった。ここで敬意と謝意を表す。

金子千里氏(公益財団法人東京都公園協会 清澄庭園サービスセンター)および清澄庭園サービスセンター職員の皆様には、2016 年の計測調査を初めとした、2018 年の樹木調査及び 2019 年の計測調査の、長きにわたるご協力をいただいたことに誠に感謝を申し上げます。特に、計測調査においても、普段立ち入ることのできない築山(富士山)への立ち入りを特別に許可していただき、全面的な協力によって計測調査は充実したものとなった。ここで敬意と謝意を表す。

奥野正太郎氏(長崎平和文化研究所 客員研究員)、下條一仁氏(長崎市淵神社 宮司)には 2016 年と 2019 年に実施した長崎市の原爆被爆樹木の計測において、全面的なご協力に尽力していただいた。また、下條一仁氏には計測による協力以外にも、祖父が体験した原爆投下直後の原爆被爆樹木のお話をお聞かせいただき、原爆被爆樹木が持つ無言の主張を感じ取ることが少なからずできたと考える。ここで敬意と謝意を表す。

渡部朋子氏(特定非営利活動法人 ANT-Hiroshima 理事長)、堀口力氏(アーボリカルチ

ヤー広島 代表)には、広島市における原爆被爆樹木調査にて全面的な協力に尽力していただいた。特に、平和教育活動において原爆被爆樹木を後世に残していくための活動と、重要性の国際的な発信を続けていく姿勢は、計測調査を通して大きな感銘を受けた。ここで敬意と謝意を表す。

石井匡志氏(株式会社アゴラ造園)には、本論文での研究背景にて、庭園樹木管理の現況や過去の日本庭園の植栽復元のための取り組みに関する情報などを提供していただいた。それにより、本論文の背景や考察的な内容を十分充実させることが可能となったと考える。ここで敬意と謝意を表す。

また、自身の研究活動において日本写真測量協会(JSPRS)および動体計測研究会(ARIDA)の多くの関係者には、学部3年から長きにわたり多大な支援とご鞭撻をいただいた。特に、藤野千和子氏、小野邦彦氏、田中邦一氏には、学会でお会いする都度、研究の先行きに関する不安に対して親身となってお話を聞いて下さり、研究活動において大きな励みとなり本論文を完成させることができた。さらに、長きに渡る研究活動において、既に卒業した先輩、同輩、後輩および在学中の後輩たちには、計測調査およびデータ処理において多くの協力をいただいた。また、学生生活においても多くの学生と出会いや、共に長い時間を過ごしたことは掛け替えのないものであり、今後の人生において大きな宝となる。ここで感謝を述べさせていただきます。

最後に、長きに渡る研究生生活によって常に不安と心配をかけながら、影ながら支援をして下さった両親、そして、生活面において常に物質的な援助を続けて下さった長兄、次兄には、自身以上に行く先の不安を与え続けたであろう。そんな中でも、自身の研究活動に忠言することなく、常に激励となる言葉を送っていただいたことで、迷いなく研究に邁進することができた。心残りとして、在学中に祖父母が鬼籍に入ってしまった、感謝の意を直接伝えることが叶わなくなってしまったが、今後の社会活動において「人に役立つ人間」となり、自立した姿を見せることで恩返しができればと思う。ここで、心から感謝を述べさせていただきます。

参考文献

1. ICOMOS-International Federation of Library Associations and Institutions (IFLA) International Committee for Historic Gardens. Florence Charter on Historic Gardens. (1981).
2. 林 レイ子. 庭園の芸術性について. 造園雑誌 19, 1-3 (1954).
3. 東京都における文化財庭園の保存・復元・管理等に関する調査報告書. 東京都建設局公園緑地部 社団法人 日本造園学会 (1989).
4. 加藤 友規. 何有荘庭園における歴史的変遷と復元的考察. 日本庭園学会誌 25, 23-29 (2011).
5. 河原 武敏. 平安・鎌倉絵巻に見る庭園植栽の技法. 造園雑誌 48, 67-72 (1985).
6. 河原 武敏. 平安鎌倉時代における庭園植栽の維持管理に関する研究. 造園雑誌 57, 13-18 (1994).
7. 浅野 二郎, 仲 隆裕, 安蒜 俊比古藤井 英二郎. 茶庭における植栽の変遷に関する史的考察. 造園雑誌 49, 61-66 (1986).
8. 阪上 富男, 加藤 友規. 名勝無鄰菴庭園の年間維持管理-山縣有朋-の感性を読み取った庭園管理のあり方-. ランドスケープ研究 78, 98-103 (2015).
9. 文部科学省 史蹟名勝天然記念物保存法 (大正八年四月十日法律第四十四号) https://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/others/detail/1318165.htm (2019年11月21日 確認)
10. 赤坂 信. 大正末期から昭和初期における名勝保護と公園事業をめぐる議論. 日本都市計画学会 都市計画論文集 No. 39, 199-204 (2004).
11. 栗野 隆 昭和の作庭記-森蘊の足跡を辿る 4-25 綴水社 (2020).
12. 井出 久登. 原熙 職域の拡大と専門家養成の先駆者. ランドスケープ研究 59, 239-242 (1996).
13. 独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所 庭園の記録 <https://www.nabunken.go.jp/nabunkenblog/2015/05/20150501.html> (2019年9月14日 確認)
14. 久垣秀治 京都名園記 (上巻・中巻・下巻) 誠文堂新光社 (1969)
15. 栗野 隆, 國井 洋一. 清閑亭庭園を対象とした3次元測量と直接測量との併用による歴史的庭園の調査技術. ランドスケープ研究 造園技術報告集 76, 126-129 (2013).
16. 国土交通省 i-Construction 委員会 報告書 <http://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html> (2019年10月11日 確認)
17. 松田 重雄, 佐々木 公一. レーザー反射強度データを併用できる地上型レーザーキャナの現状. 写真測量とリモートセンシング vol. 49 215-218 (2010).
18. 味岡 収. 古代ローマ都市遺跡における3次元計測技術の実践と活用. 九州大学学術情報リポジトリ Kyushu Univ. Institutional Repos. (2015)

doi:<https://doi.org/10.15017/1654611>.

19. 中國新聞アルファ 「被爆樹木の24%が生育に問題 広島市,回復への補助制度」, 2019 年 1 月 7 日 , https://www.chugoku-np.co.jp/local/news/article.php?comment_id=494348&comment_sub_id=0&category_id=256 (2019年1月19日 確認)
20. 曾 鑫, 荒木 俊輔, 碓崎 賢一. MMS 点群を対象とした樹木に影響されない建物壁面の抽出手法. *GISA 地理情報システム学会 E-6-1*, (2014).
21. Zimble, D. A., et al. Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR. *Remote Sens. Environ.* **87**, 171–182 (2003).
22. Mcroberts, R. E., Cohen, W. B., Erik, N., Stehman, S. V. & Tomppo, E. O. Using remotely sensed data to construct and assess forest attribute maps and related spatial products. *Scand. J. For. Res.* **25**, 340–367 (2010).
23. Jucker, T., et al. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes. *Glob. Chang. Biol.* **23**, 177–190 (2017).
24. Zhang, X., Li, H., Dai, M., Ma, W. & Quan, L. Data-driven synthetic modeling of trees. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.* **20**, 1214–1226 (2014).
25. Livny, Y., et al. Automatic Reconstruction of Tree Skeletal Structures from Point Clouds. *ACM Trans. Graph.* **29**, 1–8 (2010).
26. Cheng, Z.-L., Zhang, X.-P. & Chen, B.-Q. Simple Reconstruction of Tree Branches from a Single Range Image. *J. Comput. Sci. Technol.* **22**, 846–858 (2007).
27. Hidaka, N., Michikawa, T., Yabuki, N., Fukuda, T. & Motamedi, A. Quality Enhancement Technique for Similarity-based Polygonization from Point Cloud. *16th Int. Conf. Comput. Civ. Build. Eng.* 1152–1159 (2016).
28. Hidaka, N., Michikawa, T., Yabuki, N., Fukuda, T. & Motamedi, A. Creating Product Models From Point Cloud of Civil Structures Based on Geometric Similarity. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.* **40**, 137–141 (2015).
29. 赤木 康宏, 北嶋 克寛. 統計的手法に基づく種の特徴を保持する樹木形状の生成手法に論文関する研究. 電子情報通信学会論文誌 **J89-D**, 1019–1035 (2006).
30. 進士 五十八. 日本庭園の特質に関する研究 -特に史的庭園空間の尺度分析とモデルについて-. 造園雑誌 **45**, 236–246 (1982).
31. 丹波 麻実, 北尾 靖雅. 回遊式的園における庭園景観の構造に関する研究-空間構造分析による庭園空間の中心と周縁の関係分析-. 日本建築学会近畿支部研究報告集 489–492 (2008).
32. 加藤 慎也, 天野 光一, 横山 公一. 廻遊式庭園におけるシークエンス景観に関する基礎的研究. 景観・デザイン研究講演集 **5**, 107–112 (2009).
33. 丹羽 鼎三. 作庭形式上より観たる日本庭園の類別. 造園雑誌 **7**, 128–136 (1940).

34. 久野 紀光, 仲間 浩一, 中村 良夫. 庭園の眺めにおける建築の景観的役割に関する研究. *ランドスケープ研究* **58**, (1995).
35. 積田 洋, 福島 顕次, 島津 美咲. 座観式日本庭園におけるランドスケープの構成と心理評価の分析. *日本建築学会計画系論文集* **81**, 2393–2399 (2016).
36. 篠部 裕. 庭園の周辺景観の保全施策に関する一考察-5 日本庭園を事例として-. *公益社団法人日本都市計画学会 都市計画論文集* **47**, 625–630 (2012).
37. 國井 洋一, 久保 和之, 松本 恵樹, 鈴木 誠. 地上型レーザスキャナによる日本庭園の景観把握への応用. *写真測量とリモートセンシング* **50**, 176–177 (2011).
38. 早瀬 真弓, 今西 純一, 中村 彰宏, 戸田 健太郎, 森本 幸裕. 地上型レーザスキャナを用いた庭園の借景復元に関する景観シミュレーション. *ランドスケープ研究 (オンライン論文集)* **2**, 62–66 (2009).
39. 守村 敦郎, 中村 彰宏. タブレット端末を用いた樹木管理に関する景観シミュレーションシステムの開発. *ランドスケープ研究* **77**, 521–524 (2014).
40. 栗野 隆, 松本 恵樹, 國井 洋一, 土沼 隆雄, 土沼 直亮, 鈴木 誠. 旧齋藤氏別邸庭園を事例とした近代和風庭園の保存のための調査・計画手法. *ランドスケープ研究* **76**, 92–97 (2015).
41. 國井 洋一, 金井 大輔. 個人庭園における平板測量との比較による地上レーザ計測の有用性の検証. *ランドスケープ研究* **76**, 82–85 (2015).
42. 熊崎理仁, 國井洋一. 日本庭園における地上型 3D レーザスキャナによる図化および景観シミュレーションに関する研究. *東京農大農学集報* **60**, 93–102 (2015).
43. Kumazaki, R. & Kunii, Y. Drawing and Landscape Simulation for Japanese Garden By Using Terrestrial Laser Scanner. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.* **40**, 233–238 (2015).
44. 阿部 亮吾. 三次元計測器を用いた船体構造の計測精度と精度管理への適用に関する研究. (2017).
45. 倉内 友己, 長坂 光高. トータルステーションを用いた三次元計測. *株式会社 IHI 検査計測 (IIC) IIC Rev.* **48**, 82–84 (2012).
46. 福江市教育委員会 石田城五島氏庭園調査整備報告書 (1992)
47. 近津 博文, 國井 洋一, 中田 隆司, 大嶽 達哉. 民生用デジタルスチルカメラによるデジタル写真測量システム“3DiVision”の構築. *写真測量とリモートセンシング* **42**, 6–16 (2003).
48. 早川 裕弐, 小花和 宏之, 齋藤 仁, 内山庄一郎. SfM 多視点ステレオ写真測量の地形学的应用. *Trans. Japanese Geomorphol. Union* **37**, 321–343 (2016).
49. 株式会社ビジョンテック Agisoft Metashape メタシェープ -高解像度オルソモザイク画像作成処理ソフトウェア- http://www.vti.co.jp/metashape_top.html (2019年11月11日 確認)

50. 栗屋 善雄, 亀田智恵, 後 藤 誠二郎, 宮坂 聡, 宇野女 草太. 高密度航空レーザーデータと2つの樹冠形パラメータを利用した スギとヒノキの分類. *森林計画誌* **51**, 9–18 (2017).
51. 朱 林, チャタクリ スバス, 島村 秀樹. 航空レーザー計測データによる林相分類手法の研究. *写真測量とリモートセンシング* **55**, 303–313 (2016).
52. Tian, J., et al. A novel tree height extraction approach for individual trees by combining TLS and UAV image-based point cloud integration. *Forests* **10**, 1–17 (2019).
53. 加藤 顕, 石井 弘明, 榎木 勉, 大澤 晃, 小林 達明, 梅木 清, 佐々木 剛, 松英 恵吾. レーザーリモートセンシングの森林生態学への応用. *日本森林学会誌* **96**, 168–181 (2014).
54. Chen, S., Liu, H., Feng, Z., Shen, C. & Chen, P. Applicability of personal laser scanning in forestry inventory. *PLoS One* **14**, 1–22 (2019).
55. Côté, J. F., Fournier, R. A. & Egli, R. An architectural model of trees to estimate forest structural attributes using terrestrial LiDAR. *Environ. Model. Softw.* **26**, 761–777 (2011).
56. 瀧口 純一. 高精度 GPS 移動計測装置 三菱モバイルマッピングシステム. *情報処理学会研究報告* **176**, 1–5.
57. 浅井 樹, 廣永 茂雄, 廣田 義昭, 井久保 昌博. MMS (車載型レーザー計測システム) を活用した街路樹管理台帳の整備-川崎市における街路樹台帳整備の事例紹介-. (2014).
58. Bienert, A., Georgi, L., Kunz, M., Maas, H. G. & von Oheimb, G. Comparison and combination of mobile and terrestrial laser scanning for natural forest inventories. *Forests* **8**, 1–25 (2018).
59. OPTRONICS 光技術コーディネータージャーナル. **11**, 125–131 (2017)
60. 環境省 環境ビジネス株式会社 woofinfo https://www.env.go.jp/policy/keizai_portal/B_industry/frontrunner/companies/article107.html (2019年12月2日 確認)
61. 関 才門, 坪内 孝司, 皿田 滋, 原 祥堯. 平地林での3次元地図生成による立木位置と胸高直径の連続移動計測. *Trans. JSME (in Japanese)* **84**, 1–17 (2018).
62. Liang, X., et al. Possibilities of a personal laser scanning system for forest mapping and ecosystem services. *Sensors (Switzerland)* **14**, 1228–1248 (2014).
63. Rönholm, P., Liang, X., Kukko, A., Jaakkola, A. & Hyypä, J. QUALITY ANALYSIS and CORRECTION of MOBILE BACKPACK LASER SCANNING DATA. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **3**, 41–47 (2016).
64. Karam, S., Vosselman, G., Peter, M., Hosseinyalamdary, S. & Lehtola, V. Design, calibration, and evaluation of a backpack indoor mobile mapping system. *Remote Sens.* **11**, (2019).
65. Huang, H., et al. Automated methods for measuring DBH and tree heights with a commercial

- scanning lidar. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* **77**, 219–227 (2011).
66. Bremer, M., Jochem, A. & Rutzinger, M. Comparison of Branch Extraction for Deciduous Single Trees in Leaf-on and Leaf-Off Conditions – an Eigenvector Based. *EARSeL eProceedings* **11**, 33–43 (2012).
 67. 熊崎 理仁, 國井 洋一. レーザ計測による樹木の3Dモデリングへの応用に関する研究. *ランドスケープ研究* vol. 80 465–468 (2017).
 68. Kumazaki, R. & Kunii, Y. 3D modeling of components of a garden by using point cloud data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.* **41**, 305–309 (2016).
 69. 戸田 健太郎, 中村 彰宏, 大藪 崇司, 前中 久行. 地上型レーザスキャナを用いた3次元環境計測における樹高の推定. *日緑工誌* **35**, 69–74 (2009).
 70. 本田 友里香, 浅輪 貴史, 梅干 野晃, 押尾 晴樹. 地上型近赤外レーザースキャナによる樹木の三次元形態情報の取得と分析. 第21回(平成23年度)日本赤外線学会研究発表会 (2011).
 71. 北村 信正 清澄庭園 東京都公園協会監修・東京公園文庫 18 郷学舎 (1981)
 72. 小林 章 石と造園 100 話 61-66 東京農業大学出版会
 73. RIEGL 社 RiSCAN PRO 取扱説明書 Ver.2.7.1(2018)
 74. Gonzalez de Tanago, J., et al. Estimation of above-ground biomass of large tropical trees with terrestrial LiDAR. *Methods Ecol. Evol.* **9**, 223–234 (2018).
 75. Disney, M. I., et al. Weighing trees with lasers: Advances, challenges and opportunities. *Interface Focus* **8**, (2018).
 76. InverseTampere TreeQSM <https://github.com/InverseTampere/TreeQSM> (2019年1月8日 確認)
 77. Raunonen, P. *TreeQSM Quantitative Structure Models of Single Trees from Laser Scanner Data.* (2017).
 78. Åkerblom, M., Raunonen, P., Kaasalainen, M. & Casella, E. Analysis of geometric primitives in quantitative structure models of tree stems. *Remote Sens.* **7**, 4581–4603 (2015).
 79. Raunonen, P. et al. Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data. *Remote Sens.* **5**, 491–520 (2013).
 80. Åkerblom, M., Raunonen, P., Mäkipää, R. & Kaasalainen, M. Automatic tree species recognition with quantitative structure models. *Remote Sens. Environ.* **191**, 1–12 (2017).
 81. RIEGL Laser Measurement Systems GmbH. LAS Extrabytes Implementation in RIEGL Software. (2017).
 82. 丹治 史哉, 三浦 太佳也, 後藤 光亀. 地上型3次元レーザースキャナにおける被測定物と反射強度の関係. 土木学会東北支部技術研究発表会 (2010).
 83. Calders, K., et al. Evaluation of the range accuracy and the radiometric calibration of multiple terrestrial laser scanning instruments for data interoperability. *IEEE Trans. Geosci.*

- Remote Sens.* **55**, 2716–2724 (2017).
84. 大川 真弥, 滝田 好宏, 伊達 央. LIDAR 受光強度情報のクラスタリングによる 植生内に混在する石質障害物の判定. 日本機械学会論文集 **81**, (2015).
 85. Song, J.-H., Han, S.-H., Yu, K. & Kim, Y.-I. Assessing the possibility of land-cover classification using lidar intensity data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.* **34**, (2002).
 86. Tatoglu, A. & Pochiraju, K. Point Cloud Segmentation with LIDAR Reflection Intensity Behavior. *Inst. Electr. Electron. Eng.* 786–790 (2012).
 87. 齋藤 和人, 丹羽 健, 増田 宏. 三次元大規模点群に基づく樹木の形状再構成 第2報. 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 771–772 (2016).
 88. 齋藤 和人, 増田 宏, 平岡 裕一郎, 松下 通也, 高橋 誠. 三次元大規模点群に基づく樹木の形状再構成 第3報. 2016 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 489–490 (2016).
 89. Errington, A. F. C., Daku, B. L. F. & Prugger, A. F. Reflectance modelling using terrestrial LiDAR intensity data. *IST 2015 - 2015 IEEE Int. Conf. Imaging Syst. Tech. Proc.* (2015) doi:10.1109/IST.2015.7294464.
 90. Ayrey, E., et al. Layer Stacking: A Novel Algorithm for Individual Forest Tree Segmentation from LiDAR Point Clouds. *Can. J. Remote Sens.* **43**, 16–27 (2017).
 91. Weinmann, M., Weinmann, M., Mallet, C. & Brédif, M. A classification-segmentation framework for the detection of individual trees in dense MMS point cloud data acquired in urban areas. *Remote Sens.* **9**, (2017).
 92. Itakura, K. & Hosoi, F. Automatic individual tree detection and canopy segmentation from three-dimensional point cloud images obtained from ground-based lidar. *J. Agric. Meteorol.* **74**, 109–113 (2018).
 93. Xu, S., Ye, N., Xu, S. & Zhu, F. A supervoxel approach to the segmentation of individual trees from LiDAR point clouds. *Remote Sens. Lett.* **9**, 515–523 (2018).
 94. Hackenberg, J., Spiecker, H., Calders, K., Disney, M. & Raunonen, P. SimpleTree - An efficient open source tool to build tree models from TLS clouds. *Forests* **6**, 4245–4294 (2015).
 95. Hackenberg, J. SimpleTree an efficient Open Source tool to estimate Quantitative Structural Tree Models and its Statistical Relevance (2017).
 96. Stovall, A. E. L., Shugart, H. H., Stovall, A. E. L., Anderson-Teixeira, K. J. & Anderson-Teixeira, K. J. Assessing terrestrial laser scanning for developing non-destructive biomass allometry. *For. Ecol. Manage.* **427**, 217–229 (2018).
 97. Computree Forest inventory with Lidar (ONF) <http://computree.onf.fr/?lang=en> (2018 年 11 月 7 日 確認)

98. PCL Documentation Removing outliers using a StatisticalOutlierRemoval filter
http://pointclouds.org/documentation/tutorials/statistical_outlier.php#statistical-outlier-removal (2017年5月20日 確認)
99. Khawaldeh, S., Aleef, T. A., Pervaiz, U., Minh, V. H. & Hagos, Y. B. Complete End-to-End Low Cost Solution to a 3D Scanning System with Integrated Turntable. *Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol.* **9**, 39–55 (2017).
100. 和田 俊和. 最近傍探索の理論とアルゴリズム. 情報処理学会研究報告 **13**, 1–12 (2009).
101. PCL Documentation Smoothing and normal estimation based on polynomial reconstruction
<http://pointclouds.org/documentation/tutorials/resampling.php> (2019年9月18日 確認)
102. Ikeuchi, K., Hasegawa, K. & Nakazawa, A. Bayon Digital Archival Project. *Measurement* (2004).
103. Lluís i Ginovart, J., Costa, A., Puche, J. M. & Coll, S. Assessment of the construction process of the Cathedral of Tortosa. *J. Archit. Conserv.* **20**, 156–169 (2014).
104. RIEGL. Data Sheet RIEGL LMS-Z390i. p.3 (2010).
105. RIEGL. Data Sheet RIEGL VZ-400i. p.10 (2016).
106. 西村 正三, 原 健司, 木本 啓介, 松田 浩. 3D レーザ・デジタル画像を用いた軍艦島計測と損傷図作成 – 3D 点群のレンダリング・ひび割れ描画支援システム–. 写真測量とリモートセンシング **51**, 46–53 (2012).
107. English Heritage. *3D Laser Scanning for Heritage: Advice and Guidance on the Use of Laser Scanning in Archaeology and Architecture. Historic England* (2018).
108. 黒田 壮吉原爆の生き証人「被爆樹木」の保存支援へ 国が初の予算
朝日新聞 デジタル, 2018年8月6日,
<https://www.asahi.com/articles/ASL8165DSL81ULBJ00S.html> (年1月19日 確認)
109. 大野 琢己, 國井 洋一, 鈴木 雅和. 被爆樹木の3次元測量およびマッピングへの応用 -長崎市を事例として-. 日本造園学会 平成29年度日本造園学会関東支部大会 関東支部大会／事例・研究報告集. pp.64-65(2017)
110. 大脇 なぎさ, 鈴木 雅和, 堀口 力. 広島市における被爆樹木が爆心地との位置関係において示す樹形異常. 日本造園学会 ランドスケープ研究 **77** (5), 627-632(2014)
111. RIEGL 社 RiSCAN PRO 取扱説明書 Ver.1.5.3(2008)
112. CloudCompare Software. CloudCompare User's Manual v.2.10
https://www.danielgm.net/cc/doc/qCC/Documentation_CloudCompare_version_2_1_eng.pdf (2019年10月27日 確認) .
113. Spyglass and Commander Compass User Guide

- <http://happymagenta.com/spyglass/guides/Spyglass%20User%20Guide.en.pdf> (2019年11月10日確認)
114. 熊崎 理仁, 國井 洋一, 鈴木 雅和. TLSによる原爆被爆樹木に対する3Dモデルの構築手法の提案 **30**, 129-140(2019)
115. 岩村 雅一. 高速・高精度な近似最近傍探索の実現. *技術情報誌 TELECOM Front.* **80**, 1-8 (2013).
116. 国土交通省国土地理院. 地上レーザスキャナを用いた公共測量作業規程(案) .p.52 (2018).
117. 鈴木 誠. 旧伏見宮家別邸銚子瑞鶴荘の庭について. *造園雑誌* **48**, 61-66 (1985).
118. 中島 宏. 浜離宮恩賜庭園の植栽管理に関する考察. *日本庭園学会誌* **19**, 1-25 (2008).
119. 東京都における文化財庭園の保存活用計画(共通編). 東京都建設局公園緑地部. (2017).
120. 村岡 正. 渉成園の古絵図と「枳殻邸安政度総図」について. *造園雑誌* **21**, 1-5 (1957).
121. Hu, S., Li, Z., Zhang, Z., He, D. & Wimmer, M. Efficient tree modeling from airborne LiDAR point clouds. *Comput. Graph.* **67**, 1-13 (2017).
122. Landes, T., et al. 3D tree architecture modeling from laser scanning for urban microclimate study. 9th Int. Conf. Urban Clim. 12th Symp. Urban Environ. (2015).
123. 山岸 陽介, グオ タオ, 遠藤 貴宏, 安岡 善文. リモートセンシングデータを用いた都市樹木の3次元モデルの構築. *生産研究* **57**, 394-397 (2005).
124. Bournez, E., Landes, T., Saudreau, M., Kastendeuch, P. & Najjar, G. From TLS point clouds to 3D models of trees: A comparison of existing algorithms for 3D tree reconstruction. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.* **42**, 113-120 (2017).
125. 櫻井 淳, 田中 成典, 中村 健二, 窪田 諭, 中原 匡哉, 平 謙二. レーザスキャナを用いた施工現場の常時観測における地表面生成技術の開発. *土木学会論文集 F3 (土木情報学)* **72**, 219-230 (2016).
126. 櫻井 淳, 田中 成典, 中村 健二, 今井 龍一, 窪田 諭, 重高 浩一. レーザスキャナを用いた多地点計測における高精度な点群データの選択技術の開発. *土木学会論文集 F3 (土木情報学)* **72**, 209-218 (2016).
127. 神崎 恵三. 建設生産システムへの3次元モデルの活用 計画・施工・維持管理への活用事例. *土木学会論文集 F4 (建設マネジメント)* **73**, 55-63 (2017).
128. 常山 修治, 竹下 正一, 堤 英彰, 城澤 道正. i-Construction (建設現場の生産性革命)の推進と建設現場の安全性の向上に向けて. *土木学会論文集 F6 (安全問題)* **73**, 2-7 (2017).
129. 多葉井 宏. 特集 BIM を活用した建築生産システム. *竹中技術研究報告* 1-20 (2016).

130. Fridrich, J. & Kubečka, K. BIM – The Process of Modern Civil Engineering in Higher Education. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 141, 763–767 (2014).
131. 山岡 大亮 , 青山 憲明 , 谷口 寿俊, 藤田 玲, 重高 浩一. 維持管理での利用を想定した橋梁の 3 次元データモデル標準の策定. *土木学会論文集 F3 (土木情報学)* 71, 204–211 (2015).
132. 藤澤 泰雄, 矢吹 信喜, 吉野 博之. 三次元設計モデルの積算への利用方法の検討. *土木学会論文集 F3 (土木情報学)* 69, 63–70 (2013).
133. 高橋 暁. 建築ストック活用に向けた建築物の情報マネジメント 技術に関する研究と課題. 21–28 (2016).
134. 須田 優作, 三浦 之裕, 西山 和輝. 桜田大橋における BIM/CIM の取り組み—鋼橋 CIM を活用した施工の見える化—. (2018).
135. Gleason, D. Laser Scanning for an Integrated BIM. *Lake Constance 5-D Conf.* 7 (2013).
136. Barazzetti, L., et al. Bim from laser clouds and finite element analysis: Combining structural analysis and geometric complexity. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.* 40, 345–350 (2015).
137. Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Previtali, M. & Roncoroni, F. BIM from LASER SCANS... NOT JUST for BUILDINGS: NURBS-BASED PARAMETRIC MODELING of A MEDIEVAL BRIDGE. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 3, 51–56 (2016).
138. 山本 福壽. 樹木と環境 第 6 回 : 水と樹木. *樹木医学研究* 20, 40–46 (2016).
139. 上田 正文, 城向 光弥, 水野 沙保里. 丹沢山地の衰退ブナ林に適した水ストレス診断手法の開発. *神奈川県自然環境保全センター報告* 14, 41–48 (2016).
140. 石井弘 明, 東 若菜, 新良 貴歩美, 黒田 慶 子. 高木の通水構造と機能. *日本森林学会誌* 99, 74–83 (2017).
141. Prousinkiewics, P. & Lindenmayer, A. *The algorithmic beauty of plants (The Virtual Laboratory)*. Springer; Softcover reprint of the original 1st ed. (1996).
142. Malheiros, M. D. G. & Walter, M. A hybrid geometry and billboard-based model for trees. *Brazilian Symp. Games Digit. Entertain. SBGAMES* 2, 17–25 (2011).
143. Fuhrmann, A., Umlauf, E. & Mantler, S. Extreme model simplification for forest rendering. *Nat. Phenom.* 57–66 (2005) doi:10.2312/NPH/NPH05/057-066.

要旨

第1章：序論

(1) 研究背景と目的

庭園樹木の情報の記録の中で、これまでの調査研究で記録されてこなかったものとして、樹形情報の正確な記録である。原始古代から近代に至るまでの庭園植栽について、その復元を試みた既往研究は多く存在するが、図面資料や画像資料、文献調査、絵巻による植栽描写などの考察によるもので、当時の樹形までを記録した資料までは存在しない。このことから、過去の日本庭園の植栽による景観への復元は、客観性を一部欠いた考察となっている。

日本庭園での測量による記録は、1919（大正8）年に史蹟名勝天然記念物保存法が施行されたことをきっかけに、原熙によって1923（大正12）年8月に平板測量および、製図がおこなわれた鹿苑寺庭園平面図を含む、およそ60庭園の調査をおこなったことが発端となっている。以後、庭園の図化を目的とした測量手法として平板測量が長らく用いられ、庭園での実測による記録は日本庭園の文化的価値の重要性から、その必要性は高いと言える。しかし、平板測量では樹木情報の記録は極めて限定的なものであり、3次元的な測量手法で樹木情報を得ることができれば、記録として残せる樹木情報は各段に多くなると考えられる。そこで、樹形に対して正確な情報を残す手段として、情報通信技術(ICT : Information and Communication Technology)の利用による有効性を検証する。また本研究では、ICTの中でも地上型3Dレーザスキャナ (Terrestrial Laser Scanner 以下、TLS) による計測を日本庭園で実施し、庭園樹木の樹形情報を取得するための有効性を考察することとした。

さらに、広島市・長崎市に存在する原爆被爆樹木に対しても、本手法による詳細な樹形情報を取得するための手段として TLS を用いた応用をおこなった。原爆被爆樹木は、広義には原爆にさらされたすべての樹木であり、「生きた」被爆遺産として、庭園樹木と同様に文化的価値を有する樹木としての保存への意識が高まっている。しかしながら、被爆樹木が存在する広島市・長崎市の両都市では、老木化や病気による枯死の恐れが出ているため、早急に現在の被爆樹木の姿形を TLS による計測によって正確に記録する必要性が高い。

以上のことから、庭園樹木および原爆被爆樹木の調査の中で、TLS を用いた計測で取得されるデータの中でも、樹木の3次元点群データ (以下、樹木点群) から、樹形情報の記録と保存に向けた検討をおこなう。

(2) 研究手法

既往研究にて、樹木に対してレーザ計測技術を用いた解析事例は少なく、その中でも、単木の樹形までを詳細に把握する手段を考察した研究事例はさらに少ない。その理由として、樹木は幾何学的形状の複雑さを有しており、データ上にて解析処理の対象とする上で障害が大きいことが挙げられる。そのため、樹木点群から幹・枝などの特定部位の抽出による樹形を把握するための処理および可視化など、必要とされる樹木情報の取得が非常に困難と

なっていた。

以上のことから、本研究では樹木点群の解析手法を検討する中でも、樹木点群から高精度に樹形の再現性を持つ 3D 樹木モデルを構築する手法を提案する。さらに、3D 樹木モデルの構築には、樹種の特徴と自然な多様性を兼ね備えた樹形の生成を、日本庭園などの多数の樹木を用いる場では必要とされることから、樹木が持つ固有の樹形までを復元することに焦点を当て、日本庭園における庭園樹木および被爆樹木の 3D 樹木モデルの重要性を考察した。

(3) 研究の特色と論文構成

本論文は、第 1 章から第 6 章までの章立てで構成される。第 1 章では、日本庭園にて実施されてきた測量による記録を背景に、TLS を利用した樹形の記録の有効性の検証が求められることを述べた。さらに、「生きた」被爆遺産としての文化的価値を持つ被爆樹木の枯死への危機感から、早急に TLS による 3 次元情報として記録する重要性が高まっていることを述べた。以上のことから、TLS を用いた樹形情報の調査研究を進めることは、日本庭園の樹木によって現出される現代の庭園の姿形と、損失の危険性が高く、生態学的にも重要な被爆樹木の保存に向けた、画期的な研究となるのではないかと期待される。

第 2 章 樹木に対する 3 次元計測手法の整理

数ある 3 次元計測技術の中でも、本研究で用いる TLS での計測が、樹木の 3 次元情報を得る最も適した手段であることを考察する。そのために、樹木に対する 3 次元情報を取得することが可能な計測方法を整理することで、これらの手法を用いた樹木計測から見えてくる欠点を把握し、TLS の樹木計測の適正を明らかにする。

第 3 章 日本庭園を対象とした 3D 樹木モデルの構築

本論文の研究内容と考察内容の中心的な位置づけの章であり、清澄庭園（東京都江東区）を対象とした TLS での取得データを用い、庭園樹木の詳細な 3D 樹木モデルの構築を試みる。特に、本研究では計測から得られる樹木点群の反射率(Reflectance)および偏差(Deviation)の情報を利用することで、TLS-QSM 法を主軸とした 3D モデリングを実施する。

第 4 章 原爆被爆樹木の 3D 樹木モデルの構築への応用

第 3 章で示した TLS-QSM 法を主軸とした 3D 樹木モデルの構築手法を被爆樹木に対して応用をおこなう。特に、被爆樹木にみられる特有の樹形の再現のために、第 3 章とは異なる 3D 樹木モデルの構築手法を提案し、さらに、3D 樹木モデルより被爆樹木の爆心地への傾斜角度、傾斜方位を効率的に算出するための応用をおこなう。

第5章 樹木点群および3D樹木モデルの精度検証

TLSを用いた樹木計測にて、対象樹木と取得される樹木点群の樹形の精度検証をおこなう。また、TLSによる樹木計測にて取得された樹木点群を、TLS-QSM法へ適用する場合に、処理が可能な範囲の樹高を検証する。さらに、TLS-QSM法にて構築した3D樹木モデルに対しても、構築の基となった樹木点群との精度検証をおこなうことで、精度面においても3D樹木モデルの樹形の再現性が保証されていることを明らかにする。

第6章 本研究の成果

本研究による3D樹木モデルの構築手法による成果を述べるにあたって、「日本庭園の保存と復元に向けた保存手法としての重要性」と「被爆樹木の3D樹木モデルの意義」について考察する。さらに、建築・土木業界での「i-Construction」による生産改革が、造園業界では3D樹木モデルの活用によって大きな貢献が可能となることを考察する。

第2章 樹木に対する3次元計測手法の整理

本研究では、樹木点群から3D樹木モデルの作成をおこなう上で、幹・枝の樹形情報が最も重要であり、葉などの情報は不要なものとして扱う。そこで、樹冠の内部にあたる幹および枝を取得するための最も適した3次元計測手法の検討をおこなった。

(2) トータルステーション (TS)

TSを利用した計測では、対象物に対して3次元座標として情報を得ることが可能である。しかしながら、TSは一度の視準にて一点のみの計測となるため、樹木の詳細な形状を得るためには、測点が膨大になり長時間の測量が必要となる。

(3) 写真測量

写真測量とは、写真画像から対象物の幾何学情報を3次元的に推定し、レーザ計測と同様に対象物に対して非接触で3次元情報を得ることができる。これまで、樹木に対して写真測量の有効性を示すための計測を、地上からの写真撮影にて取得した画像データからおこなった。しかしながら、樹冠内部の幹・枝の樹形情報を得ることは不可能であった。

(4) レーザ計測

レーザ計測技術には多様な機種が存在しており、本研究で使用した地上型3Dレーザスキャナ(TLS)の他に、車両に搭載するタイプの機種や航空機に搭載する機種なども存在する。そこで、以下に機種ごとの取得データの特徴を述べた上、樹木計測に適したものかを整理する。

(a) 航空レーザ測量 (ALS : Airborne Laser Scanner)

航空レーザ測量は近年、森林への計測事例が多数報告されているが、航空レーザ測量では、単木樹形までの把握は、取得される樹木点群が十分でないことから、地上型レーザ計測機器と比較すると、ALS による単木の形状データを詳細に把握することは適さないと考えられる。

(b) 車載写真レーザ測量 (MMS : Mobile Mapping System)

MMS とは、車両にレーザ計測器を搭載することで、動体的に 3 次元情報を得る計測技術であり、主に計測の対象は都市空間や舗装路面調査である。そのため近年、街路樹に対する解析事例が存在するが、日本庭園内での計測は、車両による搬入の利便性の悪さから、樹形情報を多数の視点場からの計測で取得することは困難と考えられる。

(c) バックパック型レーザスキャナ

バックパック型レーザスキャナは、レーザスキャナ装置を背負う形で移動計測をおこなう機器である。航空レーザ測量とは異なり、森林内部からより詳細な情報を得るための手段として利用されている。しかし、樹形情報を単木ごとに詳細に把握する手段として、有効的な計測であるかは明らかとなっていない。

(d) 地上型 3D レーザスキャナ (TLS)

TLS は単木計測において、樹冠構造(Canopy Structure)や葉面積指数(Leaf Area Index)、細部の樹枝構造までを把握可能な、高密度の樹木点群が取得できることが明らかになっている。このことから、樹木の詳細な形状情報を得るための手段として、TLS を用いた計測は最も適切であると考えられる。

第 3 章 清澄庭園を対象とした 3D 樹木モデルの構築

(1) TLS による計測可能な樹高の検証

TLS を利用した樹木計測が、樹形情報の取得の観点からその有効性を示したが、本研究で使用したレーザ計測器機 (VZ-400i) の樹高に対する有効な計測範囲を検証する必要がある。そこで、東京農業大学世田谷キャンパス内にて多様な樹高が存在する正門前の広場にて計測をおこない、その有効範囲を検証した。その結果、樹高が 17m 程度までの樹木に対して十分な樹形情報が得られることが確認された。

(2) 清澄庭園における計測

清澄庭園にて、VZ-400i を使用した計測調査を 2019 年 5 月 29 日 - 31 日、6 月 1 日、2 日、4 日の計 6 日をかけて実施した。園内において、3D 樹木モデルの構築をおこなうエリアを、

清澄庭園の主要な建造物である大正記念館周りを対象とした。その理由として、対象エリアでは樹木全体を捉えた詳細な樹形情報を取得できることと、過去の計測調査にて樹高が 17m 以上の樹木がほとんど存在していないことも確認できているためである。

(3) TLS-QSM 法による 3D 樹木モデルの構築

本手法で用いた TLS-QSM 法は、TLS によって取得された樹木点群を各セグメントに分割し、各セグメントの半径および方向を局所的に近似していくことで、連続した円筒状モデルによって再構築するものである。この手法を用いることで、これまで生成が困難であった小枝の細部まで自動的に 3D 樹木モデルの構築が可能となる。しかしながら、今回使用する TLS-QSM 法を実施するためのオープンソースである「TreeQSM」では、樹木点群の構成が幹・枝であることを想定した処理であるため、樹木が落葉した状況での計測を推奨している。しかしながら、日本庭園では多様な樹種が存在していることもあり、樹種を限定することなく、葉となる点群と幹・枝となる点群を分類する手法を提案する必要がある。そこで本手法では、レーザ計測で取得可能な対象物の付属情報である、偏差 (Deviation) および反射率 (Reflectance) に閾値を適用することを主体とした効率的な分離手法を提案した。これにより、限られた樹種 (主に落葉広葉樹) にのみ対応した処理であった TreeQSM に、多様な樹種の適用が可能となり、日本庭園にて早急かつ効率的な 3D 樹木モデルの構築を可能とした。

第 4 章 原爆被爆樹木を対象とした TLS-QSM 法の応用

(1) 原爆被爆樹木の 3D 樹木モデルの構築

原爆被爆樹木とは広義には原爆にさらされたすべての樹木であり、原爆の記憶を今に伝えるものの中で、「生きた」被爆遺産として、その生命力を尊びつつ、原爆の悲惨さを世界や後世に伝える役割を期待されている。被爆樹木には原爆の熱線や爆風による被害を受け、特有の樹形が確認されている。中でも、根元から主幹にかけては、被爆樹木の特徴 (火傷跡、亀裂、根の肥大成長、傾斜など) が顕著に現れ、さらに、原爆被爆樹木は爆心地に向かって傾斜 (湾曲) している傾向があることが明らかされている

そこで、原爆被爆樹木に対し、本研究で提案した TLS-QSM 法を主軸とした手法を応用することで、原爆被爆樹木が持つ、特有の樹形を捉えた 3D 樹木モデルの構築手法を考案した。さらに、構築された 3D 樹木モデルを 3D プリンタによって出力し、模型としての提供をおこなうことで、爆心地への傾斜という、現地での認識が困難な樹形異常に対し、その視認を可能とすることができた。

(2) 原爆被爆樹木の傾斜算出への応用

既往研究による傾斜算出では、スマートフォンに内蔵されている姿勢センサによって、被爆樹木の傾斜を算出し、根元から主幹が最も傾いている方向を目視によって決定すること

で、傾斜方位角を GNSS の位置座標と方位から算出をおこなっていた。しかしながら、この手法は計測を早急に完了できるというメリットがあるが、目視という主観的な要素が計測精度に影響する懸念が存在した。そこで、TreeQSM によって構築される円筒状モデルから、円筒ごとの中心座標を抽出し、この中心座標を利用した傾斜と傾斜方位角の算出をおこなうことで、正確かつ効率的な算出を可能とした。

第 5 章 樹木点群および 3D 樹木モデルの精度検証

(1) TLS にて取得される樹木点群の精度検証

TLS を用いた樹木計測の有効性を実証するためには、取得された樹木点群の形状と、計測対象となった樹木との形状を比較する精度検証をおこなう必要があった。そこで、TS を用いた精度検証をおこなうことで、使用した TLS2 機種 (VZ-400i、LMS-390i) の取得可能な樹形精度を明らかにした。手法として、対象樹木にターゲットを 20 箇所ほど設け、TS によって算出した座標を基準とし、TLS2 機種によって算出した座標を照合することで精度を得た。結果として、最大風速 2.8m/s、平均風速 1.4m/s の環境下、標準偏差 70mm 以内の誤差にて計測が可能であることが明らかとなった。TLS にて取得される樹木点群の精度検証にて、標準偏差 70 mm 以内という数値を、TLS を用いた公共測量作業規程に当てはめると、規程では観測点間隔を 0.5m とし、25m 先の標高に対して較差精度 5mm (標準偏差) とされている。このことから、標準偏差 70mm という精度は公共測量の規程では、十分な精度とは言えない。しかしながら、計測時の風速が小さい場合は、規程を満たす精度で計測が可能であり、風速が大きい場合は、規程を満たすのは困難である。TLS を用いた公共測量作業規程には当然ながら、風速に関する規程は存在せず、樹木は切土・盛土とは異なり、常に風などの環境条件で動きを伴う動体的な対象物であり、計測で常に誤差が生じてしまうことを念頭に入れなければならない。このことから、樹木に対する特有の規程が望まれる。

(2) TLS-QSM 法にて構築される 3D 樹木モデルの精度検証

TLS-QSM 法は樹木点群から細枝までを詳細かつ効率的に 3D モデル化することが可能であるが、基となった樹木点群からどれほどの精度で 3D 樹木モデルの構築がおこなわれているか明らかにしていなかった。そこで、本研究で用いた手法として、構築された 3D 樹木モデルの位置座標を抽出し、その座標と樹木点群の座標を照合することで、樹木点群からどれほどの範囲でモデルが構築されているか明らかにすることで精度検証をおこなった。結果として、樹木点群から標準偏差 0.016m 以内の範囲にて、3D 樹木モデルが構築されることが明らかとなった。これにより、TreeQSM 法による樹形の再現性において、精度面からも有効性を示すことができた。

終章 本研究の成果

(1) 日本庭園の保存と復元に向けた保存手法としての重要性

日本庭園は、成長変化する植物を主たる構成要素としている空間であり、日本庭園の特質を決定づける重要な景観構成要素でありながら、庭園内の植物要素の保存が最も困難であり、日本庭園の文化的価値としての側面を樹木管理の不備によって喪失される問題があった。特に、庭園樹木の景観木となるものには、たとえばマツの緑摘みのように一枝一葉のレベルで手入れの精度や樹形の保存が工夫される必要性が求められている。このことを踏まえると、本研究で提案した 3D 樹木モデルは、精度検証の結果からも十分に主幹から幹・枝に至る樹形の再現性を満たしていることから、現存の樹木をそのままの形で記録し、樹形を維持していくことへの重要な資料としての役割に十分期待することができる。さらに、歴史的庭園や近代庭園において、失われた本来の日本庭園の姿形を復元する取り組みがおこなわれているが、植栽の復元においては、これまで日本庭園の創始期の樹形を詳細に記録した資料というものは少なく、古写真や絵図などから当時の植栽のありかたを考察していた。このことから、本手法で提案した 3D 樹木モデルは、その時代に存在した日本庭園の姿形を、特に庭園樹木によって現出された空間の記録として保存していくことにも貢献できる。

以上のことより、樹形情報の取得を TLS による 3 次元形状として記録し、詳細な 3D 樹木モデルとして記録する重要性は高く、今後の保存や復元に向けた取り組みの中でも重要な資料と成りえると考える。

(2) 原爆被爆樹木 3D 樹木モデルの意義

TLS を利用した、原爆被爆樹木の 3D 樹木モデル構築の意義は以下の 4 点が考えられる。

- ① 測定時点の正確な樹形を保存でき、その後の各種要因による変化を知る基準となる。
- ② 樹木全体の樹形を一望しテクスチャに触れることで、個体ごとの特徴と被害状況などを体感できる。
- ③ 被爆樹木のテクスチャを模型として写像することで、ハンズオン展示など多くの観察者に対応できる。
- ④ 多くの被爆樹木モデルを併置して一望することで、各樹木の個性を認識できる。

①については、広島市では被爆樹木を 1996 年度にリスト化し、平和行政の一環として保全のための治療や土壌改良の経費を予算計上してきたが、多くが老木化や病気による枯死の不安を抱えている。このことから、被爆樹木の形状の変化を 3D モデルによって蓄積していくことで、樹木医等の専門家による健康状態の判断に貢献することができる。②、③、④については、3D プリンタによって出力された模型は手で触れることができ、被爆樹木の理解を一層深めることができる。そのため、平和教育への活用が考えられ、樹形異常等の実態

を把握することに役立つと考えられる。

(3) 3D 樹木モデルがもたらす造園業界への生産性の向上

3D 樹木モデルが造園業界でもたらす貢献として、建築・土木業界にて取り組まれている「i-Construction」によって普及した、「BIM (Building Information Modeling)」と同様の役割をもたらすと考えられる。BIM とは 3DCAD によって作成される建築モデルに、建物に関する情報(客室名称・面積、材料・部材の使用、仕上げ等)を建築モデルに付属させ、建築情報モデルを構築するモデリング技術である。BIM によって構築された建築モデルは、「形状の見える化」によって専門知識を持たない者に対しても、分かりやすい構造情報を提供することができる。

TLS-QSM 法にて構築される 3D 樹木モデルは、本来、樹木の地上バイオマス量などのパラメータの算出を目的としており、樹形の他に、樹木の全体積・主幹体積・枝体積、樹高、主幹の長さ・枝の長さなどの情報を正確に取得することが可能である。さらに、反射率という付属情報を使用することで、水の欠乏によっておこる樹枝の枯れ枝検出も可能になるのではないかと考える。以上のことを踏まえると、建築・土木業界での i-Construction による BIM の活用による生産改革が、造園業界では 3D 樹木モデルの活用によって可能となる。さらに 3D 樹木モデルの付属情報は、日本庭園の樹木管理にとどまらず、庭園の補修から計画、そして定期的な計測による樹木成長のパラメータまで算出が可能と考えられ、造園業界でのあらゆる施工プロセスのシームレス化に貢献することができる。

SUMMARY

1. Introduction

1.1 Background and Purpose

Studies that accurately records the shape information of garden trees are insufficient even considering previous case studies of garden trees. There have been many studies that attempted to restore past garden plantings, but these are based on drawings, photographs, literature surveys, and drawing descriptions using picture scrolls, and there is no material that records the tree shape of that era in detail. From this, restoring the landscape of a Japanese garden by past planting has been a speculative attempt.

Surveying Japanese gardens began in 1919 when laws to preserve historic sites, scenic spots, and natural monuments were enacted. In August 1923, as a representative initiative, Hiroshi Hara conducted flat plate surveying and drafting and surveyed about 60 gardens including Kinkaku-ji temple. Since then, flat plane surveying has long been used as a surveying method for plotting Japanese gardens, and the need to record actual measurements is high due to the importance of cultural value of Japanese gardens. However, recording tree shape information using flat plate surveying is very limited. Therefore, we will use information and communication technology (ICT) as a means to record accurate information on tree shapes and verify its practical effectiveness. In this study, we conducted measurements using a terrestrial laser scanner (TLS) and examined the validity of acquiring shape information of garden trees.

Furthermore, we used this method to measure trees that survived the atomic bomb blasts (A-bombed trees) in Hiroshima and Nagasaki as an effective means of recording detailed tree shape information. As A-bombed trees were exposed in a broad sense, there is a growing awareness of conserving this "living A-bombed heritage" in both cities. However, many A-bombed trees are at risk of aging and withering due to illness, so the current shape of A-bombed trees need to be recorded by TLS measurement urgently and accurately. On the basis of the above, in this study, we examine the recording and preservation of tree shape information from 3D point cloud data of trees (hereinafter referred to as tree point cloud data) obtained by TLS measurement.

1.2 Method

In previous studies, there have been few analytical studies using laser measurement technology for trees, and among them, even fewer studies that considered the means to grasp the shape of individual trees in detail. The reason is that trees have a complicated geometrical shape, which presents significant obstacles in data analysis. For this reason, it has been extremely difficult to process tree point cloud data, extract specific parts such as trunks and branches, and visualize tree shapes. In view of the above, this study proposes a method for constructing a 3D tree model with highly-accurate tree shape reproducibility from tree point cloud data. Furthermore, constructing 3D models for trees such

as those found in Japanese gardens, in which many species exist, requires the generation of tree shapes that combine the characteristics of the tree's species and natural diversity. Therefore, we focused on reconstructing tree shape characteristics, and considered the importance of 3D tree models of garden trees and A-bombed trees in Japanese gardens.

1.3 Thesis composition

This paper consists of Chapters 1 through 6. Chapter 1 states the need to verify the effectiveness of TLS measurements in recording garden trees in Japanese gardens. In addition, it states that the importance of recording 3D information is rapidly increasing due to the withering risk of A-bombed trees that have cultural value as “living A-bombed heritage.” From the above, it is expected that research on tree shape information using a TLS will be an effective means of landscape recording revealed by trees in Japanese gardens. It is also expected to be an effective tool for preserving ecologically important A-bombed trees that are at risk of withering.

Chapter 2 Comparison of 3D measurement methods

Among the many 3D measurement technologies, we will verify that the TLS measurement used in this study is the most suitable means to acquire 3D information of trees. Therefore, we will clarify the suitability of TLS tree measurement by arranging 3D measurement method other than that using a TLS and grasping defect that can be seen from tree measurement using these methods.

Chapter 3 Construction of Japanese garden 3D tree model

This chapter focuses mainly on the research and consideration of this paper, and outlines our attempts to construct detail 3D tree models of garden trees from the Kiyosumi Garden (Koto-ku, Tokyo) using information acquired by TLS measurement. In particular, in this study, 3D modeling with the TLS quantitative structure models (TLS-QSM) method as the main axis is performed using reflectance and deviation information of the tree point cloud data acquired from the measurement.

Chapter 4 Application of 3D tree models construction method for A-bombed trees

The 3D tree model construction method based on the TLS-QSM method shown in Chapter 3 is applied to A-bombed trees. In particular, we propose a method for constructing 3D tree model different from that shown in Chapter 3 to reproduce the peculiar shape of A-bombed trees. In addition, we propose method to efficiently calculate the inclination angle and direction to ground zero by using the model.

Chapter 5 Accuracy verification of tree point cloud data and 3D tree model

In this chapter, we perform accuracy comparison using total station (TS) to verify the shape accuracy

of the tree point cloud data acquired by TLS measurement. In addition, we will verify the accuracy of the tree point cloud data for the constructed 3D tree model. These accuracy tests will clarify that reproducing the shape of the 3D tree model is guaranteed in terms of accuracy.

Chapter 6 Results

In describing the results of the method to construct a 3D tree model in this research, the importance of a technique for preserving and restoring Japanese gardens and that of 3D tree models of A-bombed trees are considered. Furthermore, we consider the potential for expansion from the results of this study.

2. Comparison of 3D measurement methods

Among the many 3D measurement technologies, we will verify that the TLS measurement used in this study is the most suitable means to acquire 3D information of trees. Therefore, multiple 3D measurement methods are summarized below, and the most suitable means for obtaining tree shape information is considered.

2.1 Total station (TS)

In TS measurement, it is possible to acquire information of an object as 3D coordinates. However, since a TS measures only one point in one collimation, the number of measuring points becomes enormous, and a long-time survey is required to acquire the detailed shape of a tree.

2.2 Photogrammetry

In photogrammetry, geometric information of a target object is three-dimensionally estimated from a photographic image, and 3D information can be acquired without physical contact to the target object similarly to laser measurement. In this study, measurements to show the effectiveness of photogrammetry for trees were performed from image data acquired by photographs taken from the ground. However, it was impossible to acquire tree shape information of trunks and branches inside trees.

2.3 Airborne laser scanner (ALS)

In recent years, there has been many reported cases of ALS measurements in forests. However, an ALS cannot acquire sufficient tree point cloud data to acquire an individual tree shape, and therefore, is unsuitable to grasp the shape data of a single tree.

2.4 Mobile mapping system (MMS)

A MMS is a measurement technology that dynamically acquires 3D information by mounting a laser

measuring device on a vehicle, and mainly surveys urban spaces and pavement surfaces. In recent years, there have been a number of reported analyses of street trees, but it is difficult to transport measurement vehicles into Japanese gardens. Therefore, it is difficult to acquire detailed shape information of garden trees using a MMS in Japanese gardens.

2.5 Terrestrial laser scanner (TLS)

It has been demonstrated that a TLS can acquire high-density tree point cloud data that includes canopy structure, leaf area index, and detailed tree structure in single tree measurement. Therefore, measuring using a TLS is the most appropriate method for acquiring detailed tree shape information.

3. Construction of Japanese garden 3D tree mode

3.1 Verification of measurable tree height by TLS measurement

In Chapter 2, we determined that tree measurement using a TLS is the most appropriate means to acquire tree shape information. However, it was necessary to determine the effective tree height measurement range of the TLS (VZ-400i) used in this study. Measurements were taken from trees of varying heights planted in front of the main gate of Tokyo University of Agriculture (Setagaya-ku, Tokyo). We confirmed that sufficient tree shape information could be acquired for trees up to 17 m in height.

3.2 Measurement in Japanese garden

A measurement survey using the VZ-400i was conducted at Kiyosumi Garden from May 29–31, 2019 and June 1, 2, and 4, 2019, for a total of six days. The appointed place for constructing 3D tree models in the garden was around the Taisho Memorial Hall, which is a major building in Kiyosumi Garden. This is because detailed tree shape information of entire trees can be acquired, and past measurement surveys have confirmed that there are almost no trees over 17 m.

3.3 Construction of 3D tree model by TLS-QSM method

The TLS-QSM method used in this study is a method in which a tree point cloud obtained by a TLS is divided into segments, with the radius and direction of each segment locally approximated and reconstructed as a continuous cylindrical model. By using this method, it is possible to construct a 3D tree model with small branch details that are difficult to generate automatically. In this study, we attempted to construct a 3D tree model using the open-source method “TreeQSM”. However, in TreeQSM, since processing is based on the assumption that the tree point cloud consists of data related to trunks and branches, measuring trees in which leaves have fallen is recommended. However, there are various tree species in Japanese gardens, and it is necessary to propose a method to classify point clouds consisting of leaves and those consisting of trunks and branches when applying TreeQSM

without restricting tree species. To solve this problem, we proposed an efficient classification process that mainly uses thresholds for deviation and reflectance, which are the adjunct data of the object that can be acquired by laser measurement. As TreeQSM only supported only a limited number of tree species (mainly deciduous trees), the proposed classification method could be adapted to various tree species and quickly and efficiently construct 3D tree models in Japanese gardens.

4. Application of 3D tree models construction method for A-bombed tree

4.1 Construction of 3D tree model of A-bombed trees

A-bombed trees are those that have been exposed to the atomic bomb in a broad sense. Among those that convey the memory of the atomic bombs, it should play a role in conveying the misery of the atomic bomb to the world and future generations as a “living A-bombed heritage”. A-bombed trees have been damaged by the heat rays and blasts of the atomic bombs, and unique tree shapes have been identified. Overall, from the root to the main trunk, the characteristics of A-bombed trees (burn marks, cracks, enlarged root growth, inclination, etc.) are prominent. Furthermore, it has been confirmed that A-bombed trees tend to be inclined (curved) toward ground zero. Therefore, by applying the method based on the TLS-QSM method proposed in this study | proposed method to A-bombed trees, we devised a method for constructing 3D tree models with the tree shape characteristics of A-bombed trees. In addition, by 3D-printing the constructed 3D tree model, it was possible to identify tree shape abnormalities from the model such as inclination to ground zero that is difficult to see on site.

4.2 Application to calculate the inclination of A-bombed trees

The conventional method to calculate the inclination of A-bombed trees uses an altitude sensor built into smartphones. In this method, the direction in which the main trunk is most inclined from the root is visually determined, and the inclination azimuth of the tree is calculated from global navigation satellite system (GNSS) position coordinates and azimuth. Although measurement can be completed quickly, there is concern that subjective factors of visual observation affect measurement accuracy. Therefore, we extract and use the center coordinates of each cylinder from the cylinder model constructed by TreeQSM, and by calculating the inclination angle and azimuth using the center coordinates, an accurate and efficient calculation is possible.

5. Accuracy verification of tree point cloud data and 3D tree model

5.1 Accuracy verification of tree point cloud data acquired by TLS measurement

To demonstrate the effectiveness of the TLS measurement, it was necessary to verify the accuracy by comparing the shape of an acquired tree point cloud with that of a real world tree. Therefore, we clarified the tree shape accuracy acquired by using a TLS (VZ-400i, LMS-390i) by comparing it with that acquired using a TS. Around 20 targets were set on the target tree and their coordinates were

calculated by using a TS and TLS. As a result, we clarified that measurement was possible with an error within the standard deviation of 70 mm in environment with a maximum and average wind speed of 2.8 and 1.4 m/s, respectively. Although the accuracy of the 70-mm standard deviation is insufficient when applied to public survey work regulations, however, it is necessary to keep in mind that trees are dynamic objects under environmental conditions, such as wind, unlike cuttings and embankments, and errors will always occur.

5.2 Accuracy verification of 3D tree model constructed by TLS-QSM method

The TLS-QSM method enables detailed and efficient 3D modeling from tree point cloud data. However, it is not clear how accurate the 3D tree model constructed from the tree point cloud will be. Therefore, to verify accuracy of the model, position coordinates from the constructed 3D tree model were extracted. The extracted coordinates were compared with the those of the tree point cloud data to clarify the extent to which the 3D tree model was constructed from the tree point cloud data. As a result, the 3D tree model was constructed within the standard deviation of 0.016 m from the tree point cloud data. Therefore, the reproducibility of the tree shape by the TreeQSM method was also effective in terms of accuracy.

6. Result

6.1 Importance as technique for preservation and restoration of Japanese garden

A Japanese garden is a space composed mainly of plants that transition and change, and the garden trees are important landscape components that determine the characteristics of Japanese gardens. However, the preservation of garden trees is an important and difficult problem, and the cultural value of Japanese gardens might be lost due to inadequate tree management. In particular, garden trees that have a significant effect on landscape composition need to have the precision of their tree shape management improved. From this, we clarified that the 3D tree model proposed in this study sufficiently reproduces the tree shape from the main trunk to the trunk/branch on the basis of the results of the accuracy verification, which is important for accurately recording the shape of existing trees and maintaining their shape.

In addition, efforts to restore the lost form of historical Japanese gardens are being actively conducted. However, when restoring the planting, there were few materials that recorded tree shapes of Japanese gardens in their early days in detail, so the planting form were based on old photographs and ezu. Therefore, the 3D tree model generated by our proposed method can also contribute to preserving the landscape of Japanese gardens that existed in that era, especially as a record of the landscape created by the garden trees.

6.2 Importance of 3D tree model of A-bombed trees

The following four points show the significance of constructing 3D tree models of A-bombed trees using a TLS.

- (a) Accurate tree shape at the time of measurement can be saved, and it becomes standard for recognize changes due to various factors thereafter.
- (b) By seeing the tree shape of the whole tree and touching the texture, you can experience the characteristics of each individual tree, its damage situation, etc.
- (c) By providing the A-bombed trees as models, such as hands-on exhibits, it is possible for many observers to experience them more intimately.
- (d) By juxtaposing many A-bombed trees and overlooking them, the individuality of each tree can be recognized.

Regarding (a), Hiroshima City listed the A-bombed trees in 1996 and has budgeted the treatment and soil improvement costs for conservation as part of the peace administration. However, many of the A-bombed trees are at risk of aging and withering. Therefore, by accumulating the changes in the shape of the A-bombed tree using the 3D models, it is possible to contribute to the judgment of their health condition by experts such as tree doctors. Regarding (b), (c), and (d), the 3D-printed models can be touched by hand, further enhancing the understanding of the A-bombed trees. Therefore, they can be used for peace education, and to help understand the conditions of the abnormal tree shapes of A-bombed trees.

6.3 Potential for expansion

The TLS-QSM method used in this study was originally intended to calculate parameters such as the amount of above-ground biomass (AGB) of trees with high accuracy. Therefore, in addition to the accurate reconstruction of the tree shape disclosed in this study, it is possible to accurately acquire information such as the total volume, trunk volume, branch volume, height, trunk length, and branch length of a tree. Furthermore, the use of the reflectance of the adjunct information may enable detection of withered branches caused by hydopenia. From this, it is possible to acquire parameters to predict the growth of a tree by periodic measurement, to diagnose garden tree activity, and predict changes due to changes in Japanese gardens.

In this study, the importance of a detailed 3D tree model was described mainly from the perspective of landscape architecture. However, detailed 3D tree models are also applicable in various fields such as botany, silviculture, design studies, and climatology, and are said to be important as analytical research materials. Therefore, the construction, utilization, and analysis of 3D tree models using a TLS is extremely versatile and practical, and directly contribute to society.