T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	航空機LiDAR を用いた樹木の三次元情報の計量化と都市熱環境評価への応用
Title(English)	
著者(和文)	押尾晴樹
Author(English)	Haruki Oshio
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9510号, 授与年月日:2014年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:浅輪　貴史,梅干野　晃,田村　哲郎,木内　豪,錦澤　滋雄,小林　秀樹
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9510号, Conferred date:2014/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

航空機 LiDAR を用いた樹木の三次元情報の計量化と都市熱環境評価への応用

環境理工学創造専攻

押尾　晴樹

平成25年度　学位論文

航空機 LiDAR を用いた樹木の三次元情報の計量化と都市熱環境評価への応用

指導教員　浅輪 貴史　准教授

梅干野 晁 連携教授

東京工業大学 大学院総合理工学研究科

環境理工学創造専攻 博士課程 11D29020

押尾 晴樹

目次

第 1 章　序論 1

1.1　研究の背景 2

1.2　既往研究と本研究の位置づけ 5

1.3　研究の目的 9

1.4　論文の構成 10

引用文献 11

第 2 章　樹木の環境調整効果評価のための航空機 LiDAR による
三次元情報の推定手法 13

2.1　はじめに 14

2.2　樹木の環境調整効果の評価に必要な情報 15

2.2.1　日射遮蔽 15

2.2.2　蒸散作用 21

2.2.3　防風 24

2.2.4　CO_2 の固定 25

2.2.5　大気浄化 25

2.2.6　防音 25

2.2.7　眩光防止、紫外線の遮蔽 26

2.2.8　景観の改善 26

2.2.9　本研究で整備する情報 27

2.3　樹木の三次元情報を整備するための観測方法 28

2.3.1　観測方法に求められる要件 28

2.3.2　センサ 28

2.3.3　プラットフォーム 31

2.3.4　本研究で用いる観測方法の原理 32

2.3.5　航空機 LiDAR と樹木の形態の関係 33

2.3.6　都市熱環境情報の整備に対する航空機 LiDAR の有用性 34

2.3.7　航空機 LiDAR を用いた情報整備の実用性 35

2.4　航空機 LiDAR により樹木の三次元情報を推定した既往研究 37

2.4.1　樹高・枝張り・枝下高さ 37

2.4.2　葉面積指数（LAI）..... 37
2.4.3　樹冠形状・葉群の分布..... 38
2.4.4　LAD 分布..... 38
2.5　LAD 分布の推定手法の提案..... 41
2.5.1　既往研究における推定手法の課題..... 41
2.5.2　本研究で提案する手法..... 43
2.6　検証に使用するデータ..... 45
2.6.1　航空機 LiDAR 観測の概要と取得したデータ..... 45
2.6.2　検証対象樹木の選定..... 47
2.7　まとめ..... 50
引用文献..... 51
第 3 章　地上型 LiDAR による精度検証方法..... 55
3.1　はじめに..... 56
3.2　検証のための測定方法の選定..... 57
3.3　地上型 LiDAR により LAD 分布を算出するための課題と本研究での検討方法..... 59
3.3.1　既往研究における LAD 分布の算出方法とその改良点..... 59
3.3.2　検討項目とその確認方法..... 62
3.4　解析に使用したデータ..... 66
3.4.1　地上型 LiDAR による測定..... 66
3.4.2　地上型 LiDAR データの前処理..... 68
3.4.3　葉の方位角と傾斜角の実測..... 68
3.4.4　地上型 LiDAR による LAD 分布の算出..... 68
3.4.5　刈り取りによる葉面積の実測..... 69
3.5　地上型 LiDAR による LAD 分布の算出精度と航空機 LiDAR の検証のための測定条件
..... 70
3.5.1　葉の傾きの設定方法..... 70
3.5.2　統合法と選択法の比較..... 71
3.5.3　選択法による算出誤差に関する考察..... 73
3.5.4　選択法が適用できる風の条件..... 75
3.5.5　測定条件が推定精度に及ぼす影響..... 76
3.6　航空機 LiDAR の推定精度を検証するための地上型 LiDAR による測定..... 79

3.6.1　測定の概要 79
3.6.2　検証に使用可能な voxel の分布 80
3.7　まとめ 81
引用文献 82
第 4 章　航空機 LiDAR による三次元情報の推定と精度検証 84
4.1　はじめに 85
4.2　樹冠の再現に求められる空間スケール 86
4.3　樹冠を構成する航空機 LiDAR 点群の空間精度 88
4.3.1　樹冠外周部のレーザー反射点の抽出 88
4.3.2　樹冠の中心点との距離の精度と点を抽出する空間スケールの関係 89
4.3.3　天頂付近からレーザーが照射された場合の結果 90
4.3.4　レーザーの天頂角とレーザーの入射間隔が精度に与える影響 91
4.4　航空機 LiDAR により得られる情報の空間スケール 92
4.4.1　葉を含む voxel の抽出精度 92
4.4.2　航空機 LiDAR により抽出できない voxel の特徴 95
4.4.3　樹冠の投影面をもとにした樹冠外周部の高分解能化 98
4.5　航空機 LiDAR による LAD 分布の推定精度の検証 101
4.5.1　LAD 分布の推定 101
4.5.2　提案手法による推定精度改善効果 103
4.5.3　推定誤差と航空機からのレーザー入射数の関係 107
4.5.4　レーザーの入射条件の違いが推定精度に及ぼす影響 108
4.5.5　他の樹種への適用性の検討 108
4.5.6　航空機 LiDAR により抽出できなかった voxel の補正 112
4.5.7　推定した LAD 分布の可視化 114
4.6　まとめ 116
引用文献 118
第 5 章　都市空間における樹木の熱環境緩和効果の評価 119
5.1　はじめに 120
5.2　熱環境緩和効果の予測・評価方法 121

5.2.1　熱環境緩和効果の評価項目 121
5.2.2　解析に用いる植生の放射伝達モデル 122
5.2.3　解析に用いる蒸散モデル 124
5.3　熱環境緩和効果の予測方法の精度検証方法 126
5.3.1　精度検証の考え方 126
5.3.2　実測に用いる測定装置 127
5.3.3　検証対象ケヤキの樹冠下における PAR 分布の実測 128
5.4　航空機 LiDAR と植生放射伝達モデルを用いた日射透過率と APAR の予測精度 133
5.4.1　植生放射伝達モデルの入力条件 133
5.4.2　計算値と実測値の比較 134
5.5　樹木の形態や周辺の空間形態が樹木の熱環境緩和効果に及ぼす影響 139
5.5.1　解析条件 139
5.5.2　ケヤキとクスノキの樹冠における PAR の吸収の特徴 141
5.5.3　植栽間隔が異なる街路の日射環境 142
5.5.4　樹木の生育状況の違いが熱環境緩和効果に及ぼす影響 144
5.5.5　周辺の建物の日陰が樹木の蒸散作用に及ぼす影響 148
5.5.6　従来の評価方法との差異 148
5.6　まとめ 152
引用文献 154
第 6 章　結論 156
6.1　本研究の総括 157
6.2　今後の課題 159
謝辞 162
発表論文一覧 164
付録

第１章 序論

1.1　研究の背景

近年、夏季の都市熱環境の悪化が社会問題となっており、その対策として樹木による緑化が注目されている。各地方自治体において緑の基本計画が制定されており、ヒートアイランド対策はその中でも主要な目的となっている。2020 年の東京五輪の招致プランや実行プログラムの中にも新たな街路樹の整備が掲げられており、今後ますます緑化が推進されると考えられる。緑化の計画書の中には、緑化により都市の気温を下げる、ヒートアイランド現象を抑制するなどの記述が見られる。実際には、都市の気温はマクロ気象やフェーン現象のような地球・地域規模の現象によるところが大きく、都市の全面を樹木で覆うなどしない限り、気温自体を変えることはできない。しかしながら、樹木が人体への日射を遮蔽すること、木陰を作り地物の表面温度の上昇を抑制すること、蒸散作用により樹冠の表面温度の上昇を抑制することは、樹冠の下を通行する人や樹冠の下に滞在する人の熱的な不快感を大きく減らしている。建物が乱立する現在の都市を樹木で覆うことは困難であり、樹木を増やすほど管理が届かない樹木も増加する。従って、単に樹木の量を増やすのではなく、樹木の日射遮蔽や蒸散作用などの熱環境緩和効果を活かして、人が利用する空間の熱環境を改善していくという考え方が重要である。

そのような観点で実際の都市の樹木を見ると、剪定により熱環境緩和効果が期待できない樹木も見受けられる（図 1-1 (1)）。剪定は熱環境の観点のみから実施されるものではないが、過度な剪定は、景観だけではなく熱環境の面からも問題である。建物の日陰に存在しており、防風の効果は得られるが、熱環境への影響は小さい樹木も見られる（図 1-1 (2)）。このような樹木であっても、ヒートアイランド緩和に寄与しているとして、自治体からの補助金の対象となる。また、街路樹を有する通りであっても歩道に日陰が形成されていない場合もある（図 1 -1(3)）。さらに、樹種により樹冠の形状や葉の密度が異なるため、熱環境緩和効果にも差が生じると考えられる（図 1 -1(4)）。都市空間において樹木の効果に影響する要因を図 1-2 にまとめる。樹種・剪定・生育状況により樹木の形態が個々の樹木で異なり、樹木の熱環境緩和効果に大きく影響する放射環境も周辺の空間形態によって異なる。以上のような要因を考慮しながら樹木が熱環境に及ぼす影響を評価し、効果的な緑化が実施されているかを確認しなければ、熱環境を改善するという目標が達成されないと考えられる。

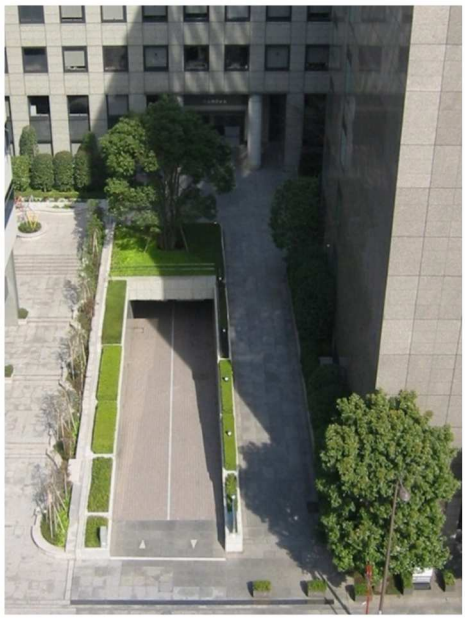
各地方自治体が緑化を推進していくプロセスにおいては、PDCA サイクルが導入されているように、緑化の成果の確認が重要視されている。しかしながら、緑化の評価は樹木の本数や緑被率など緑の「量」に基づいて行われており（図 1-3）、樹木により緑化した空間の熱環境が改善されたかについては評価されていない。近年では建築分野でも樹木の価値が見

直されており、建築環境総合性能評価システム CASBEE においても、各ツールの中で樹木の効果を評価に含めている。しかしながら、日射遮蔽や蒸散作用の効果の評価は樹木の水平投影面積がベースになっている（図 1-4）。環境の評価を緑化計画の中に組み込むためには簡易さは重要であるが、図 1-1 のような現状を改善してゆくためには、図 1-2 に示すような、実際の都市空間における樹種・剪定・生育状況などに応じた樹形や葉の密度分布など樹木の「質」や周辺の建物による放射環境を考慮した評価が必要である。

(1) 剪定により効果が期待できない樹木



(2) 建物の日陰に存在する樹木



(3) 樹種による樹冠の形態の違い



(4) 歩道に日陰を作っていない樹木



図 1-1　都市緑化樹木の現状

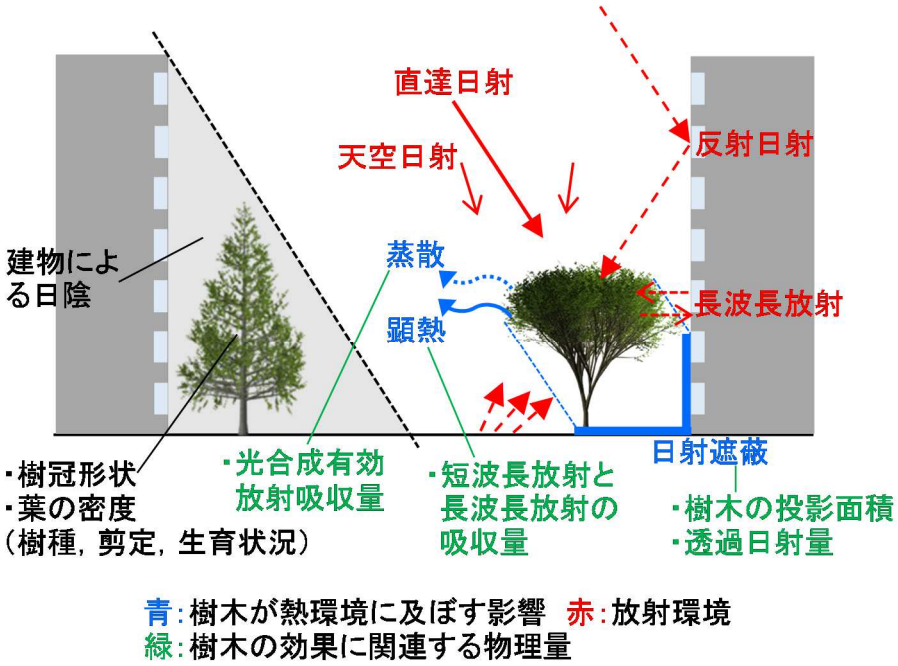


図 1-2　樹木を取り巻く放射環境と樹木の効果への影響要因

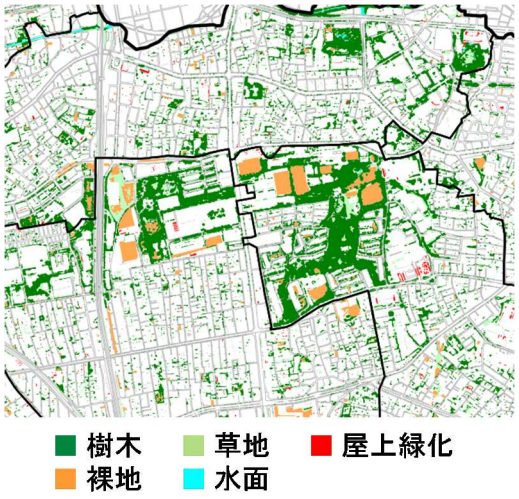


図 1-3　新宿区による緑被分布図 [1-1)]
（空中写真判読と現地調査によって作成された）

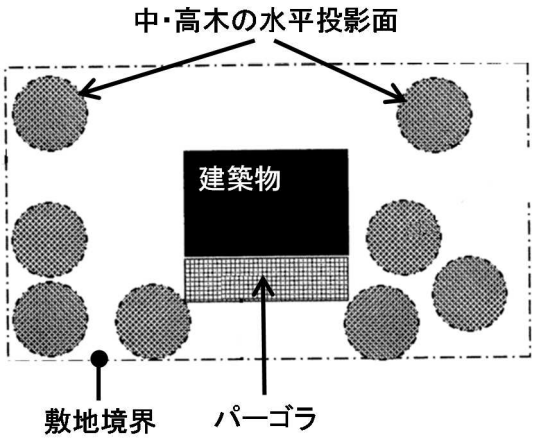


図 1-4　CASBEE における中・高木の評価基準 [1-2)]

1.2　既往研究と本研究の位置づけ

①樹木の熱環境緩和効果の評価方法

樹木の熱環境緩和効果を評価する方法として、まずは実測に基づく評価が挙げられる。日射遮蔽効果については、日射計を用いて樹冠下において日射量の実測を行った研究や[1-3) 1-4)]やデジタルカメラにより樹冠の空隙率を求める方法[1-5)]などが挙げられる。蒸散作用についても多くの実測研究が行われているが、建築分野では、佐藤ら[1-6)]による集合住宅住棟間における樹木の葉面積・蒸散量、気温分布などの実測が挙げられる。実測結果は計画の際の参考となるが、樹木の形態の違いや気象条件、周辺の空間形態で変化する放射環境を考慮することは難しい。

様々な要因を考慮して評価を行うという面からは、数値シミュレーションが有効である。吉田ら[1-7)]は、放射計算と CFD 解析を連成した屋外熱環境評価手法に樹冠における放射減衰、潜熱放散などの効果を組みこむ樹木モデルを提案している。Asawa et al.[1-8)]は、3D-CAD をベースとして 0.2～0.4 m スケールで建物や樹木の形状を再現し放射収支や表面温度分布を解析する手法を提案している。吉田ら[1-7)]は球体或いは直方体の樹冠にある葉面積密度(leaf area density (LAD))を与え、樹冠を通過する距離に応じて放射を減衰させている。Asawa et al.[1-8)]は各メッシュに一定の日射透過率を与えている。1.1 で述べた個々の樹木の形態的な特徴や放射環境を考慮して評価を行うためには、個々の樹木の形態情報とそれを考慮した数値シミュレーション手法が必要である。

日射遮蔽効果の評価には、木陰で覆われる範囲が重要であり、そのためには樹冠形状の情報が必要である。また、日射遮蔽効果に影響する樹冠を透過する日射量や蒸散作用に影響する樹冠による光合成有効放射（photosynthetically active radiation (PAR)）の吸収量（absorbed photosynthetically active radiation (APAR)）を推定するためには、葉の密度の情報が必要である。Iio et al.[1-9)]はポイントコドラート法により取得したブナの樹冠の 0.2 m × 0.2 m × 0.25 m voxel の LAD 分布に基づき、樹冠内の光合成有効光量子束密度の分布を予測するモデルを提案している。Kobayashi et al.[1-10)]は、各 voxel に任意の LAD を入力することで APAR の分布を推定するモデルを開発している。樹冠内には葉が一様に分布していないことや，樹種・剪定・生育状況により葉の密度や樹冠構造が異なることを考慮して樹木の効果を評価するためには，　Iio et al.[1-9)]や Kobayashi et al.[1-10)]の研究のように葉群の空間スケールの LAD 分布を用いることが有効である。また、LAD 分布は voxel ベースで表現することで、都市空間の熱収支シミュレーション[1-8)]や数値流体力学（computational fluid dynamics (CFD)）シミュレーション[1-11)]の樹木領域にも適用できる。浅輪らは単木の

熱・水収支特性の分析に基づき、voxel ベースで熱・水収支のモデル化を行い，熱収支シミュレーション[1-8]に導入する研究も行っている[1-12]。

以上のように、本研究では樹木の形態や周辺の空間形態を考慮して樹木の効果を評価するために、個々の樹木の形態情報と数値シミュレーションを用いた方法に着目し、樹冠形状や LAD 分布といった個々の樹木の 3 次元情報を整備する方法について考える。

②樹木の 3 次元情報の整備方法

樹木の効果を評価することが求められる領域として、各地方自治体がみどりの質を重視して重点的に緑化を行うことを計画している「緑化重点地区」が挙げられる。図 1-5 に緑化重点地区の概念図を示す。まず、直接法（刈り取り）は個々の樹木の情報整備には適していないため間接法を用いる。LAD 分布を測定する間接法としては、細いプローブを樹冠に挿入し、葉とプローブの接触確率を求めるポイントコドラート法[1-14][1-15]が挙げられる。プローブの挿入数を増やすことで高精度な情報を取得することが可能であるが，多大な労力を要する。近年では、地上から天頂角と方位角を変化させながらレーザーを照射し，対象物の 3 次元形状を取得するレーザー計測（light detection and ranging (LiDAR)）が注目されている。装置性能の向上により，高密度・高精度・高速な測定が可能となっている。Hosoi et al.[1-16]は、地上型 LiDAR データを用いてレーザーの軌跡をトレースすることで、レーザーと葉の接触確率を求め、ポイントコドラート法と同様の原理で LAD 分布を推定する手法を提案している。しかしながら、地上型 LiDAR では建物や樹木による死角が生じるため、1 回の測定で情報を得ることができる範囲が限られる。そのため、個々の樹木の情報を得るためには多数の地点から測定を行う必要があり、図 1-5 に示す緑化重点地区のような領域における面的な情報整備には多くの時間と労力を要する。加藤ら[1-17]は、車載型 LiDAR により高速道路沿線の樹木の葉面積指数（leaf area index (LAI)）を推定している。しかしながら、車載型 LiDAR では、車道沿いに存在する樹木のみが対象となる。

そこで本研究では、広域の情報を少ない労力で短時間に取得することができる航空機リモートセンシングに着目し、3 次元の空間情報の取得に有効である航空機からのレーザー計測（航空機 LiDAR）を用いる。近年では、一般的な飛行高度であっても 1 m^2 あたり 20 発以上のレーザーが照射される高密度な観測が可能となっている。このような高密度な 3 次元空間情報は、個々の樹木の形態の特徴を表現することができる空間スケールの樹冠形状や LAD 分布の取得に適している。また、建物の形状など周辺の空間形態も同時に把握することが可能である。以上の特徴から、従来各地方自治体が整備してきた樹木の「量」に関する情報（本数、緑被率など）に加え、環境の評価に必要な樹木の「質」に関する情報（樹冠

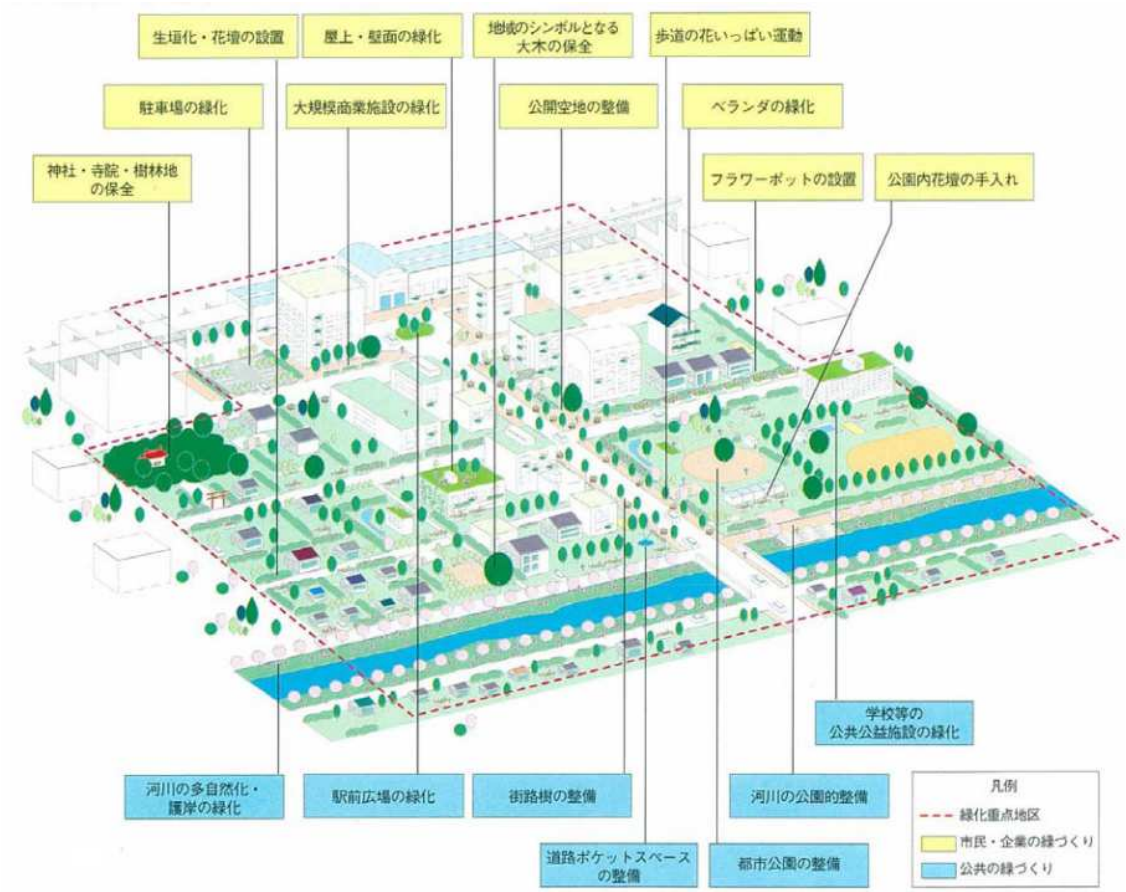


図 1-5　緑化重点地区の概念図（福岡市、新・緑の基本計画 [1-13]）

形状、葉面積密度分布など）を整備するためには、航空機 LiDAR が有効である。

以上のように、本研究では緑化重点地区のような領域において面的に樹木の 3 次元情報を整備するために、樹木の形態を測定する間接法のうち航空機リモートセンシングに着目し、3 次元空間情報の取得に有効な航空機 LiDAR を観測方法として採用する。

③航空機 LiDAR による樹木の 3 次元情報の推定

航空機 LiDAR により森林資源を推定するための研究が多く行われてきた。単木の樹冠の抽出方法 [1-18]、樹高 [1-19]、枝下高さ [1-20]、樹冠のボリューム [1-21]の推定方法が提案されている。また、LAI の推定方法を扱った研究も多い [1-22]。しかしながら、葉群の分布を扱った研究は少ない。Wang et al.[1-23]は、航空機からのレーザーの反射点を含む voxel を抽出することで、0.5 m × 0.5 m × 1 m の voxel により葉群の分布を再現しているが、精度の検証はされていないため、樹冠形状や葉群の分布の再現精度は明らかにされていない。Hosoi et al.[1-24]は地上型 LiDAR による手法 [1-15]と同様の原理で航空機 LiDAR を用いた LAD 分布の推

定を試みている。しかしながら、樹高 12.5 m のケヤキ群落の樹冠上部 1 m を除いては、推定値が刈り取りによる実測値と対応していない。ファーストパルスとシングルパルスのみを用いていることや、レーザーの軌跡の再現方法に課題があると考えられる。Song et al.[1-25]は植物面積密度（plant area density (PAD)の推定を行っているが、精度の検証はされていない。また、ラストパルスや中間パルスを取得しているにも関わらず、それらを含めてレーザーの軌跡を再現することは難しいとして、ファーストパルスとシングルパルスのみを用いている。以上から、航空機 LiDAR による LAD 分布の推定手法を検討する必要がある。航空機 LiDAR による手法では十分な精度で LAD 分布を推定することができていないため、得られた情報の光合成など森林機能の評価への応用も進んでいない。LAD 分布の推定精度を検証するとともに、環境評価への応用性についても検証しなければならない。

都市においては、都市公園の緑量の推定 [1-26) 1-27)]や、航空機 LiDAR により取得した樹高や枝張を基に作成した景観用樹木モデルを配置し、都市モデルを作成する研究が行われている [1-28)]。樹木の環境への影響を評価した研究としては、航空機 LiDAR から得られる樹冠形状を用いた、樹木が PV パネルの日射取得性能に及ぼす影響の解析が挙げられる。しかしながら、樹冠における日射の透過を考慮していない研究 [1-29)]が多く、考慮している研究であっても、一定の LAI を与えている [1-30)] 。

都市では森林に比べて、航空機 LiDAR データから樹木のデータを抽出することが難しくなる。しかしながら、樹木ではファーストパルスや中間パルスが生じるという特徴や、樹木と地表面・屋根面のレーザーの後方散乱特性の差などを利用することで 95 %以上の精度で樹木のメッシュを抽出している [1-31) 1-32)]。Sorin et al.[1-20)]のように点密度の鉛直分布の解析により樹冠下の構造物も除くことができる。以上のように、樹冠の中に入り込んでいる構造物以外は、高精度に樹木と分離することができるため、航空機 LiDAR データからの樹木のデータの抽出は本研究では対象としない。

以上より、航空機 LiDAR を用いて熱環境評価に資する樹木の 3 次元情報を整備するためには、樹冠の内部構造も考慮することができる LAD 分布の推定手法の提案とその精度検証、及びその樹木の熱環境緩和効果の評価への応用性を検証する必要がある。

1.3　研究の目的

本研究は、高分解能航空機 LiDAR により樹木の 3 次元情報を高精度に軽量化する手法を開発し、都市空間における樹木の熱環境緩和効果の評価を通して、その有用性を確認することを目的とする。

このために以下の研究課題を実施する。

1) 樹木の熱環境緩和効果の評価に必要な情報を明らかにした上で、既往研究の調査を行い航空機 LiDAR により樹木の 3 次元情報を推定するための課題を抽出し、新たな推定手法を提案する。

2) 本研究で提案する手法による樹木の 3 次元情報の推定精度を検証する方法について考える。精度検証の方法として、刈り取りによる葉面積の実測が挙げられる。しかしながら、都市緑化に用いられるサイズの樹木に対して、葉群の空間スケールの LAD 分布を航空機 LiDAR データとの位置のずれがないよう測定することは困難である。そこで、本研究では地上型 LiDAR を用いて検証を行う。地上型 LiDAR により LAD 分布を算出するための課題を整理し、地上型 LiDAR を用いた精度検証方法について検討する。

3) 熱環境評価のための樹木の 3 次元情報に求められる空間分解能を検討した上で、本研究で提案する手法により 3 次元情報の推定を行う。地上型 LiDAR を用いた検証方法により、航空機 LiDAR により得られる 3 次元情報の空間分解能や提案手法による推定精度の改善効果を明らかにする。

4) 本研究で提案する手法により推定した樹木の 3 次元情報の熱環境緩和効果の評価への適用性を検証する。樹冠の下において光合成有効放射の面分布を実測することで、3 次元情報と植生放射伝達モデルを用いた熱環境緩和効果の予測精度を明らかにする。また、この方法を実在街区に適用し，樹木の形態や周辺の空間形態の違いが熱環境緩和効果に及ぼす影響を分析し、本研究で整備する樹木の 3 次元情報の有用性を示す。

1.4　論文の構成

本論文は序論と結論を含め全 6 章から構成される。各章の構成は次の通りである。

第 2 章「樹木の環境調整効果評価のための航空機 LiDAR による三次元情報の推定手法」では、樹木の環境調整効果の評価に必要な樹木の情報を整理し、本研究では環境調整効果の中で熱環境緩和効果に着目しそのための樹木の 3 次元情報を整備することの位置づけを示す。また、既往研究における航空機 LiDAR による樹木の 3 次元情報の推定手法を調査することで、本研究において必要な情報を推定するための課題を抽出し、それを改善する手法を提案する。

第 3 章「地上型 LiDAR による精度検証方法」では、第 2 章において提案した手法による樹木の 3 次元情報の推定精度の検証方法について検討を行う。本研究では、検証方法として地上型 LiDAR に着目する。既往研究における地上型 LiDAR による LAD 分布の算出方法の課題を整理し、検証に使用することが可能な LAD 分布の取得方法を検討する。小規模な樹木を対象とし刈り取りによる葉面積の実測結果との比較を行い、測定距離やレーザーの照射密度が地上型 LiDAR による LAD 分布の算出精度に及ぼす影響について検討することで、航空機 LiDAR による 3 次元情報の推定精度を高精度に検証するための方法を示す。

第 4 章「航空機 LiDAR による三次元情報の推定と精度検証」では、第 2 章において提案した手法による樹木の 3 次元情報の推定精度を第 3 章で検討した地上型 LiDAR を用いた方法により検証する。平均的な形態の特徴を有するケヤキを対象に、航空機 LiDAR による 3 次元情報と地上型 LiDAR により取得した検証用データを比較することで、航空機 LiDAR により得られる情報の空間分解能や提案手法による推定精度の改善効果を明らかにする。

第 5 章「都市空間における樹木の熱環境緩和効果の評価」では、第 2 章において提案した手法により推定した樹木の 3 次元情報を用い、日射遮蔽と蒸散作用に着目して、実在街区において樹木の熱環境緩和効果を評価する。まず、単木の樹冠下における光合成有効放射の面分布を実測することで、航空機 LiDAR による 3 次元情報と植生放射伝達モデルによる日射透過率と APAR の予測精度を検証する。次に、3 次元情報と放射伝達モデルを用いた方法を実在街区に適用し、葉の密度や建物の日陰が樹木の効果に及ぼす影響の分析や従来の樹木の効果の評価方法との比較により、本研究で整備する樹木の 3 次元情報の有用性を示す。

引用文献

1-1) 新宿区みどりの実態調査報告書（第 7 次）, 新宿区, 2011.

1-2) JSBC, CASBEE HI（ヒートアイランド）評価マニュアル（2010 年度版）, IBEC, 2010.

1-3) 山田宏之, 丸田頼一：樹木の日射軽減作用に関する研究, 造園雑誌, 51(2), pp.81-94, 1987.

1-4) 吉田伸治, 中井敦, 大岡龍三：樹木の成長, 樹種の違いが樹冠の葉面積密度・光学的深さに及ぼす影響－実測に基づく街路樹の日射遮蔽効果の評価手法に関する研究－, 日本建築学会環境系論文集, (605), pp.103-110, 2006.

1-5) 西川竜二, 宿谷昌則：樹木の日射遮蔽効果の簡易推定法の開発, 日本建築学会計画系論文集, (527), pp.29-35, 2000.

1-6) 佐藤愛, 吉田治典, 伊藤麻美子, 村上大輔：集合住宅の住棟間における樹木の気候緩和効果に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, (587), pp.79-85, 2005.

1-7) 吉田伸治, 大岡龍三, 持田灯, 富永禎秀, 村上周三：樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温熱環境緩和効果の検討, 日本建築学会環境系論文集, (536), pp.87-94, 2000.

1-8) T. Asawa, A. Hoyano and K. Nakaohkubo：Thermal design tool for outdoor spaces based on heat balance simulation using a 3D-CAD system, Building and Environment, 43, pp.2112-2123, 2008.

1-9) A. Iio, Y. Kakubari and H. Mizunaga：A three-dimensional light transfer model based on the vertical point-quadrant method and Monte-Carlo simulation in a Faguscrenata forest canopy on Mount Naeba in Japan, Agricultural and Forest Meteorology, 151(4), pp.461-479, 2011.

1-10) H. Kobayashi and H. Iwabuchi：A coupled 1-D atmosphere and 3-D canopy radiative transfer model for canopy reflectance, light environment, and photosynthesis simulation in a heterogeneous landscape, Remote Sensing of Environment, 112, pp.173-185, 2008.

1-11) 神山健二, 大橋征幹, 成田健一：葉面積密度を代表面積とした樹木の抵抗係数に関する風洞実験, 日本建築学会計画系論文集, (578), pp.71-77, 2004.

1-12) 浅輪貴史, 梅干野, 清水克哉, 久保田光政：大型重量計を用いた単木樹木の蒸散量の計測法とその精度確認, 日本緑化工学会誌, 38(1), pp.67-72, 2012.

1-13) 福岡市 新・緑の基本計画, 福岡市, 2009.

1-14) J. W. Wilson：Inclined point quadrats, New Phytologist, 59(1), pp.1-8, 1960.

1-15) J. W. Wilson：Estimation of foliage denseness and foliage angle by inclined point quadrats, Australian Journal of Botany, 11(1), pp.95-105, 1963.

1-16) F. Hosoi and K. Omasa：Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44(12), pp.3610-3618, 2006.

1-17) 加藤顕, 戸倉千明, 小林達明, 野田佳慶, 有村恒夫, 福田聖一：高速道路法面におけるレーザーを用いた葉面積指数の推定, 日本緑化工学会誌, 39(1), pp.194-197, 2013.

1-18) A. Persson, J. Holmgren and U. Soderman：Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 68(9), pp.925-932, 2002.

1-19) K. Omasa, Y. Akiyama, Y. Ishigami and K. Yoshimi：3-D remote sensing of woody canopy heights using a scanning helicopter-borne lidar system with high spatial resolution, Journal of the Remote Sensing Society of Japan, 20(4), pp.394-406, 2000.

1-20) S. Popescu and K. Zhao：A voxel-based lidar method for estimating crown base height for deciduous and pine trees, Remote Sensing of Environment, 112, pp.767-781, 2008.

1-21) A. Kato, L. M. Moskal, P. Schiess, M. E. Swanson, D. Calhoun and W. Stuetzle：Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne lidar data, Remote

Sensing of Environment, 113, pp.1148-1162, 2009.

1-22) J. L. R. Jensen, K. S. Humes, L. A. Vierling, and A. T. Hudak : Discrete return lidar-based prediction of leaf area index in two conifer forests, Remote Sensing of Environment, 112, pp.3947-3957, 2008.

1-23) Y. Wang, H.Weinacker and B. Koch：A LiDAR point cloud based procedure for vertical canopy structure analysis and 3D single tree modeling in forest, Sensors, 8, pp.3938-3951, 2008.

1-24) F. Hosoi, Y. Nakai, and K. Omasa：Estimation and error analysis of woody canopy leaf area density profiles using 3-D airborne and ground-based scanning lidar remote sensing techniques, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48(5), pp.2215-2223, 2010.

1-25) Y. Song, M. Maki, J. Imanishi and Y. Morimoto：Voxel-based estimation of plant area density from airborne laser scanner data, ISPRS Workshop Laser Scanning 2011, XXXVIII-5/W12, pp.209-212, 2011.

1-26) 瀬戸島政博 ： 高分解能衛星と航空機搭載型レーザスキャナを用いた都市の緑地総量の計量, 生産研究, Vol.56, No.3, 2004.

1-27) R. Hecht, G. Meinel and M. F. Buchroithner：Estimation of urban green volume based on single-pulse lidar data, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 46(11), pp.3832-3840, 2008.

1-28) 山岸陽介, 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, Vol.57, No.4, pp.206-209, 2005.

1-29) T. R. Tooke, N. C. Coops, J. A. Voogt and M. J. Meitner：Tree structure influences on rooftop-received solar radiation, Landscape and Urban Planning, 102, pp.73-81, 2011.

1-30) N. Lukac, D. Zlaus, S. Seme, B. Zalic and G. Stumberger：Rating of roof's surfaces regarding their solar potential and suitability for PV systems, based on LiDAR data, Applied Energy, 102, pp.803-812, 2013.

1-31) C. Mallet, F. Bretar, M. Roux, U. Soergel and C. Heipke：Relevance assessment of full-wave lidar data for urban area classification, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66, pp. s71-s84, 2011.

1-32) B. Hofle, M. Hollaus and J. Hagenauer：Urban vegetation detection using radiometrically calibrated small-footprint full-waveform airborne LiDAR data, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 67, pp.134-147, 2012.

第 2 章

樹木の環境調整効果評価のための

航空機 LiDAR による三次元情報の推定手法

2.1 はじめに

都市緑化樹木には、日射遮蔽、蒸散作用、防風、紫外線の遮蔽、CO_2の固定、景観の改善など多くの環境調整効果が期待されている。本研究では、この中でも日射遮蔽や蒸散作用といった熱環境緩和効果に着目し、熱環境評価のための樹木の形態情報を整備する方法について論じてゆくが、樹木の形態情報は他の環境調整効果を評価する上でも重要な情報となる。そこで、本章では樹木の環境調整効果の評価に必要な情報を整理することで、熱環境緩和効果の評価に必要な 3 次元情報を整備することの位置づけを明確にする。

各地方自治体の緑化計画においては、市町村内の全域または特定の地域を対象として緑化の目標が定められている。そのため、緑化のプロセスの中に熱環境の評価を取り入れるためには、個々の樹木の 3 次元情報を面的に整備することが求められる。そこで樹木の 3 次元情報の整備方法として、地上の固定点からの測定ではなく、移動するプラットフォームにセンサを搭載して観測する方法に着目する。センサには、対象物からの日射の反射や対象物自身の放射を観測する受動型のセンサと、レーダやレーザーのように電磁波を照射し対象物からの反射を観測する能動型のセンサがある。また、センサを搭載するプラットフォームも衛星、航空機、自動車など様々である。そこで、本章ではセンサやプラットフォームの特徴を整理し、熱環境緩和効果の評価のため樹木の 3 次元情報の整備方法として航空機 LiDAR を用いることの位置づけを示す。

航空機 LiDAR による 3 次元リモートセンシングは、主に森林資源の把握を目的として多くの研究が行われてきた。そこで、既往研究における樹木の 3 次元情報の推定手法の調査を行い、熱環境緩和効果の評価に必要な樹木の 3 次元情報を推定するための課題の抽出と新たな手法の提案を行う。

2.2　樹木の環境調整効果の評価に必要な情報

樹木の環境調整効果として、日射遮蔽、蒸散作用、防風、大気浄化、防音、眩光防止、紫外線の遮蔽、CO_2の固定、景観の改善などが挙げられる。本節では、環境調整効果の評価に必要な樹木の情報を整理し、本研究において日射遮蔽や蒸散作用といった熱環境緩和効果を評価するための樹木の形態情報を整備することの位置づけを明確にする。以下にそれぞれの効果の評価に必要な情報を示す。

2.2.1　日射遮蔽

樹木の日射遮蔽効果を評価するためには、木陰ができる範囲と樹冠を透過する日射の量を考える必要がある。

樹冠形状

木陰ができる場所と時間を知るためには、CASBEE や自治体による緑量の調査で用いられる樹冠の水平投影面積ではなく、3 次元的な樹冠の形状が必要である（図 2-1）。樹木が PV パネルの日射取得性能に及ぼす影響を評価した研究では、1 m 程度の空間分解能の樹冠形状の情報が用いられている場合もある[2-1)~2-3)]。しかしながら、約 10 m の空間スケールを有する都市の樹木に対して、1 m の空間分解能で樹冠形状を再現した場合、樹冠の投影面積は過大推定されると考えられる。葉の形状を再現可能な空間分解能の樹冠形状を用いることで最も高精度に樹冠の投影面積を算出することができる。樹冠形状を再現する空間分解能を低下させてゆくと算出される樹冠投影面積が大きくなってゆくが、空間分解能が高い範囲においては投影面積の変化は小さいと考えられる。本研究ではこのことを考慮して樹冠を再現する空間分解能を決定する。

日射の透過

次に、樹冠を透過する日射の量の評価について考える。図 2-2 に樹冠を透過する日射の概念図を示す。樹冠に入射する日射には、直達日射、天空日射、反射日射がある。そしてそれぞれについて、樹冠の空隙を通過する成分と葉や枝で散乱される成分がある。太陽放射の波長帯における葉の透過率は 0.3 程度であり、近赤外域においても 0.4 程度である。そのため、数枚の葉を透過するとエネルギー量は大きく減少する。宿谷ら[2-4)]や熊倉ら[2-5)]の実測において指摘されているように、日射遮蔽効果を評価するためには樹冠の空隙を通過する成分を考えることが重要である。また、日射を遮る要素としては葉と枝がある。そこで、葉の空隙を通過する日射（以下の検討項目①②）、枝の空隙を通過する日射（③）、葉や枝で散乱される日射（④）を考えるために必要な情報を以下に整理する。

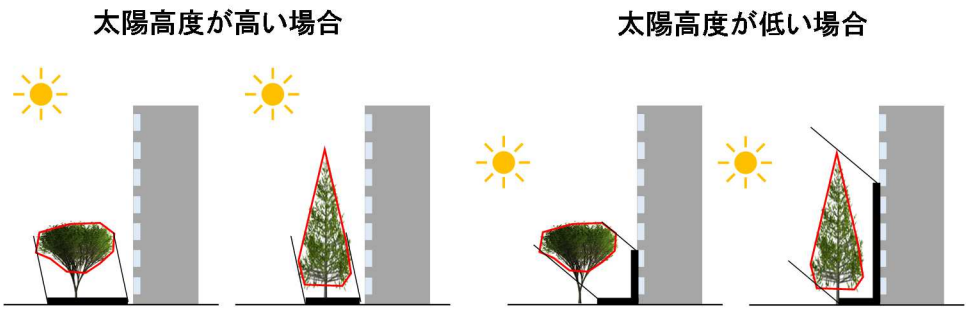


図 2-1　樹冠形状と太陽高度による木陰のできる位置の違い

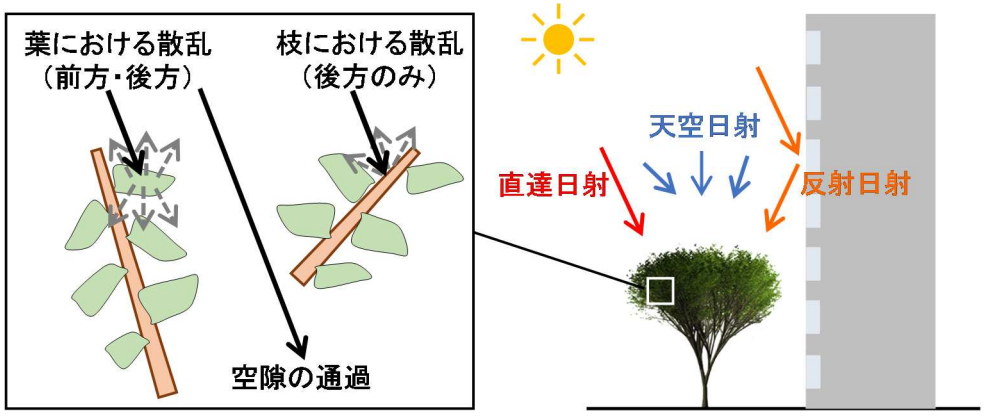


図 2-2　樹冠を透過する日射の概念図

①葉の空隙を通過する日射（葉が一様に分布する場合）

図 2-3 のように葉がある密度で一様に分布する層内における放射の消散を考える。消散とは、葉や枝での散乱により放射の経路（図 2-3 S）からエネルギーが散逸することである（散乱された成分は考えない）。微小距離 ds で消散される量は放射の量に比例しており、式(2-1)のように書ける。

$$dI = -I \cdot k \cdot a \cdot ds \qquad (2-1)$$

dI：微小経路で消散されるエネルギー、I：経路中のエネルギー、k：消散係数、a：層内の LAD、ds：微小経路の長さ

放射が進んだ経路において積分を実行すると、式(2-2)のようになる。

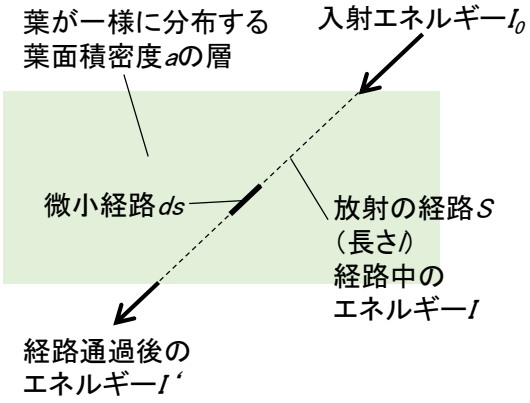


図 2-3　葉が一様に分布する層での消散

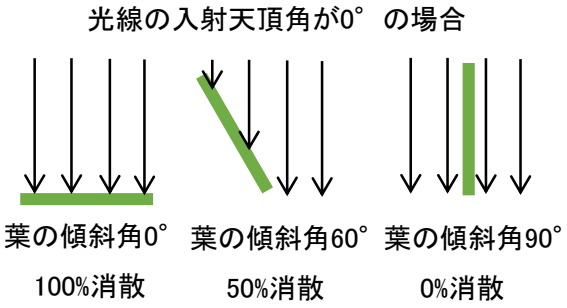


図 2-4　葉の傾きと光線が消散する確率の関係

$$\mathrm{In}\left(\frac{I'}{I_0}\right) = -k \cdot a \cdot l \qquad (2-2)$$

I':　経路を抜けたときのエネルギー、I_0 : 経路に入射したエネルギー、l : 経路の長さ

すなわち経路の透過率 τ ($= I'/I_0$) は式(2-3)で表される。

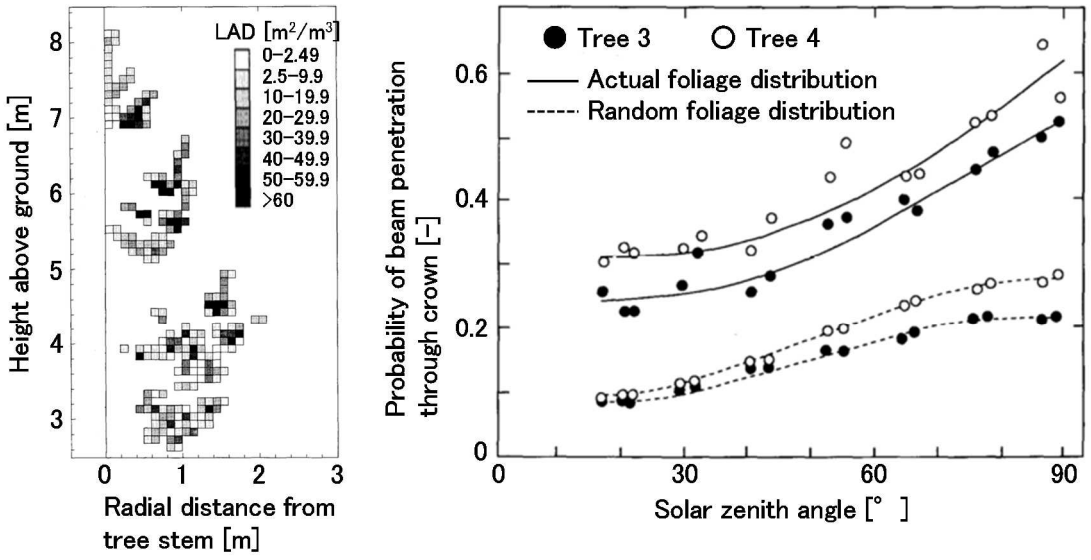
$$\tau = \mathrm{e}^{-k \cdot a \cdot l} \qquad (2-3)$$

このように lambert-beer 則の形で、森林キャノピーでの放射の消散をよく表現することができることは古くから指摘されている [2-6]。葉が一様に分布するという仮定を考えると、葉の大きさや厚さを無視した場合、消散係数 k は単位葉面積の光線に垂直な平面への投影面積となる（図 2-4 に示すように放射の向きと葉の向きにより、消散されずに通過する割合が異なる）。これは G 関数と呼ばれ、光線方向の単位ベクトルと葉面の単位法線ベクトルの内積で表される。対象の植生の葉の向きは決まっているため、G 関数は光線の方向（天頂角 θ、方位角 φ）の関数となる。以上から、葉が一様に分布する層内で光線が葉の空隙を通過する確率は式 2-4 で与えられる。

$$\tau = \mathrm{e}^{-G(\theta,\varphi) \cdot a \cdot l} \qquad (2-4)$$

②葉の空隙を通過する日射（葉の分布が一様ではない場合）

実際の樹木では、葉は枝の周囲に分布しており樹冠内において一様分布ではないため、式(2-4)には従わないことが多い。Whitehead et al.[2-7]は刈り取りに基づき樹高 8～9 m の針葉樹の LAD 分布を 0.1 m × 0.1 m × 0.1 m の voxel の分布で再現し（図 2-5(1)）、空隙を通過する放射量を計算している。各 voxel 内での消散は式(2-4)に従うとしている。そして比較用



(1) 刈り取りを基にしたLAD分布　(2) (1)のLAD分布を与えた場合と葉をランダムに分布させた場合の光線が消散されずに樹冠を通過する確率の違い

図 2-5　松の LAD 分布と葉をランダム分布と考えることによる誤差（Whitehead et al.[2-7]）

に、LAD の分布を考えずに全ての voxel に等しい LAD を与えた場合（一様分布）についても計算している。その結果、一様分布とすると分布を考慮した場合に比べて透過率が 0.15～0.3（放射の入射角により変化する、相対誤差では約 60％）過小推定された（図 2-5(2)）。これは針葉樹に対する結果であるが、広葉樹においても、樹冠下の地表面における木漏れ日の大きさの分布の解析から同様の傾向があることが指摘されている。このように葉が一様には分布せず偏在していることをクランピングという。クランピングの影響を補正するために式(2-4)の指数部分に補正係数が与えられることが多い（式(2-5)）。

$$\tau = \mathrm{e}^{-\mu \cdot G(\theta,\varphi) \cdot a \cdot s} \qquad (2-5)$$

μ はクランピング係数（Clumping index）と呼ばれ、Nilson[2-8]が葉の分布と空隙透過の確率を Markov-chain モデルにより理論的にモデル化した研究において提案された。植物の光の獲得や樹冠の gap（空隙）率を表現するモデルに広く導入されている[2-9]。また、樹冠の gap の大きさの分布からクランピング係数を推定する手法も提案されている[2-10]。しかしながら、クランピング係数には物理的な意味がなく、樹種・剪定・生育状況などにより様々な樹冠構造をもつ樹木に対して一般化することは困難である。また、クランピング係数は樹冠を見る角度にも依存する[2-11]ため、個々の樹木に対して、天空日射や周辺の建物からの反射日射に対応することが可能な情報を得ることは難しい。

これに対し、葉の分布を把握することによりクランピングの影響をなくすことができる。そこで次に葉の分布を表現するために必要な空間分解能について考える。Iio et al.[2-12]は、



葉群の全葉面積S



任意の方向から見たときの見かけの（シルエット）面積S'

シュート投影面積比 = S'/S

図 2-6　シュート投影面積比の概念

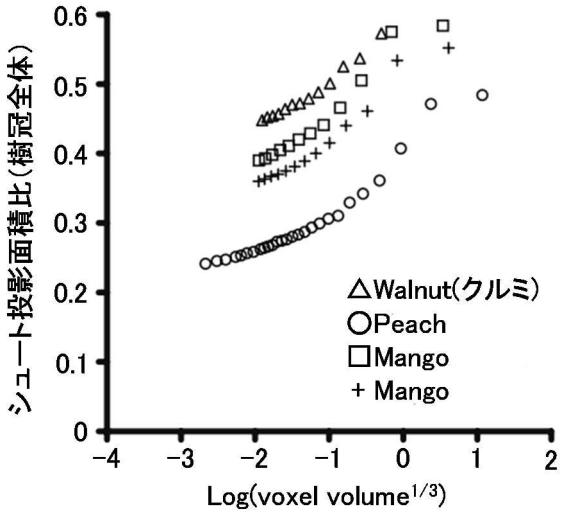


図 2-7　voxel サイズと推定されるシュート投影面積比の関係（Sinoquet et al.[2-13]）（voxel 内は Beer 則で計算、voxel サイズが大きくなるとシルエットを過大推定、つまり空隙を過小推定している。図 2-5(2)と同様）

ポイントコドラート法により樹高 12 m のブナの LAD 分布を 0.2 m × 0.2 m × 0.25 m の voxel で再現し、樹冠内の光合成有効光量子束密度（photosynthetic photon flux density (PPFD)）を予測するモデルを提案している。シュート（葉の集まり）を光線に垂直な平面に投影したときの葉の投影面積のシュートの総葉面積に対する割合（シュート投影面積比（図 2-6））をモデルに組み込むことで、voxel 内での葉の非一様性を考慮している。このモデルにより、voxel 単位の PPFD を 30 分の時間スケールで予測した結果、R^2 = 0.89 と実測値に対して高い相関を得ている。また、voxel 内の葉を一様分布と仮定すると葉面の PPFD が過大推定され、小さな voxel の中でも葉を一様分布と仮定できないと指摘している。Sinoquet et al.[2-13]は樹高 2～4 m の果樹を詳細に再現した 3 次元モデルを作成し、voxel 内での光線の消散は lambert-beer 則に従うとして、全ての葉を光線方向に垂直な面に投影したときの投影面積の総葉面積に対する割合を算出している。樹冠全体を 1 つの voxel で再現した場合に最も誤差が大きく、voxel サイズを小さくしていくと誤差が小さくなる（図 2-7）。voxel サイズが最も小さい（葉の大きさと同程度）のときに実測値と高精度に一致する結果を得ている。

以上から、樹冠における放射の消散を精緻に解くためには、葉と同程度の空間スケールの LAD 分布が必要である。実用的に植生の放射伝達計算を行うためには、葉を 1 枚 1 枚再現することは困難であることを考えると、Iio et al.[2-12]の研究のように 3 次元的に分布する voxel で LAD の分布を再現し、その上で voxel 内の葉の非一様性をモデル化する方法が有

効である。Iio et al. [2-12]は voxel 内の葉の非一様性を考慮するために、刈り取りなど対象樹木の詳細な実測を行っている。しかしながら、個々の樹木に対してそのような詳細な実測を行ったり、樹種・剪定・生育状況により樹冠構造が異なる都市の樹木に対し非一様性を一般化したりすることは困難である。Sinoquet et al.[2-13] の結果のように voxel サイズが大きくなるに従って誤差が増加することを考えると、まずは樹冠内において葉群の空間スケールの LAD 分布を考慮することが重要である。この場合、voxel 内での消散確率は式(2-4)に従うと扱うため、G 関数を求めるための葉の傾きの情報も必要である。

③枝の空隙を通過する日射

葉と同様に、枝の太さと同程度の voxel サイズで枝の分布を表現することは現実的ではない。Chen et al.[2-14]や Talbot et al.[2-15]は式(2-3)に wood area density (WAD)を含めたモデルを用いている。②で述べたように、葉については多くの研究において扱われてきたが、枝の影響を扱っている研究は少なく、枝の傾きの与え方や葉群のスケールの voxel を考えたときの voxel 内での枝の分布は明らかではない。従って現状では、ある領域に WAD を与えて、領域内では枝が一様に分布し、枝の角度も葉の傾斜角分布によく用いられる spherical 分布（極座標の半球上に一様に分布する確率密度）などと仮定することが妥当である。

④樹冠内で散乱される日射

樹冠内で散乱されて地表面に到達する日射量は葉や枝の分布と葉や枝の散乱特性により決定される。葉や枝の散乱特性とは、光線が入射した角度に応じた透過率、反射率とそれらの指向特性である。葉面からの反射には鏡面成分と拡散成分がともに含まれると言われている [2-16]が、lambert 面として扱うことができると近似すると、ある方向へ散乱される確率は、葉の反射率、透過率、光線の入射方向、散乱方向、葉の角度の確率分布で表される。Kobayashi et al.[2-17]の大気・植生放射伝達モデルでは、散乱が起こるまでに光線が樹冠中を進む距離は式(2-4)に従うとし、上記の散乱の計算を行っている。Kobayashi et al.[2-17]のモデルでは LAD の分布は考慮されていないが、voxel により LAD 分布を与えた場合も同様の計算を行うことで、樹冠内での散乱を考慮することができる。

図 2-8 に樹冠を透過する日射量を推定するために必要な情報をまとめる。葉群の空間スケールの voxel の LAD 分布と WAD 分布、voxel 内の葉や枝の総面積と投影面積の比、葉と枝の反射率と透過率が必要である。投影面積比は既往研究 [2-12]においても刈り取りなどの実測を通してモデル化を行っており、樹種・剪定・生育状況により樹冠構造が異なる都市の樹木に対しそのようなモデル化を行うことは難しい。voxel 内での消散は lambert-beer 則に従うとすると、式(2-4)の G を求めるための葉や枝の傾きの情報が必要である。

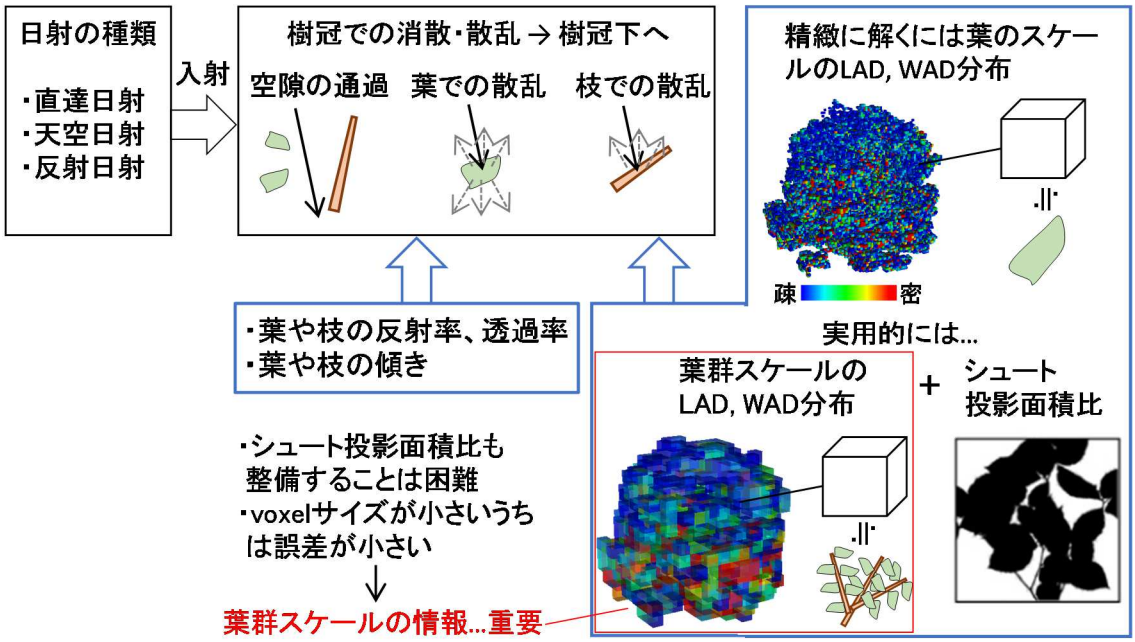


図 2-8　樹冠を透過して地表面に達する日射量の評価に必要な情報

2.2.2　蒸散作用

蒸散は、植物が光合成のために気孔から CO_2 を取り入れるときに、同時に水蒸気が大気へ放散される現象である。CO_2 の取り込みは能動的に行われるものではなく、大気と葉内の CO_2 の濃度勾配による。光合成の反応は $H_2O + CO_2 +$ 光 → 糖 $+ O_2$ のように表される。光とは 0.38～0.71 μm の光合成有効放射である。大気と葉内の CO_2 の濃度勾配を駆動力と考えると、個葉の光合成速度は式(2-6)のように表される。

$$A = \frac{g_{bc} g_{sc}}{g_{bc} + g_{sc}} (C_a - C_i) \qquad (2-6)$$

A : 光合成速度[μmol/m²･s]、g_{bc} : CO_2 拡散に関する葉面境界層コンダクタンス[mol/m²･s]、g_{sc} : CO_2 拡散に関する気孔コンダクタンス[mol/m²･s]、C_a : 大気 CO_2 濃度[μmol/mol]、C_i : 細胞間隙二酸化炭素濃度[μmol/mol]

コンダクタンス g_{bc}, g_{sc} は抵抗の逆数であり、濃度勾配にかかっているのは $1/g_{bc}$, $1/g_{sc}$ という直列の抵抗体のコンダクタンスである。同様に蒸散速度は水蒸気の濃度勾配を用いて式(2-7)のように表される。

$$E = \frac{g_{bw} g_{sw}}{g_{bw} + g_{sw}} (W_i - W_a) \qquad (2-7)$$

E：蒸散速度[mol/m²･s]、g_{bw}：水蒸気拡散に関する葉面境界層コンダクタンス[mol/m²･s]、g_{sw}:水蒸気拡散に関する気孔コンダクタンス[mol/m²･s]、W_i:細胞間隙水蒸気濃度[mol/mol]、W_a：大気水蒸気濃度[mol/mol]

W_iは葉温から、W_aは気温と湿度から求めることができる。水蒸気に対する気孔コンダクタンス g_{sw}と CO_2に対する気孔コンダクタンス g_{sc}の関係は、分子量の違いから g_{sw}=1.6 g_{sc}となる。境界層コンダクタスは風速により求められる。樹冠内での風速の分布を得るためには、神山ら[2-18]の研究のように LAD 分布と LAD を代表面積とした抗力係数が必要である。樹木の流体に対する抵抗については 2.2.3 において詳しく述べる。

気孔コンダクタンスは気孔の開閉に依存しており、気孔の開閉は光合成有効放射、飽差、温度、土壌水分、CO_2濃度などにより変化すると言われている。チャンバー法により光合成速度、蒸散速度、気象条件（大気の CO_2濃度、湿度、気温）、葉温を測定することで気孔コンダクタンスを測定できる。測定によらず一般的に気孔コンダクタンスを予測するために気孔コンダクタンスモデルが提案されてきた。建築分野では Jarvis 型のモデル[2-19]がよく用いられている（式(2-8)）。

$$g_{sw} = g_{swmax} f_1(Q) f_2(D) f_3(T) f_4(C_a) f_5(\varphi) \ldots \qquad (2-8)$$

g_{sw}：気孔コンダクタンス[mol/m²･s]、g_{smaxw}：最大気孔コンダクタンス[mol/m²･s]、Q：光合成有効放射[μmol/ m²･s]、D：飽差[hPa]、T：葉温[C]、Ca：大気 CO_2 濃度[μmol/mol]、φ：土壌水ポテンシャル[Pa]

ストレス関数 f(x)は 0～1 の値をとり、最大気孔開度に対する各環境因子による気孔の閉じ具合を表しており、それぞれ実験的に求められた式が用いられる。このモデルは、気孔が光を主信号として開き、飽差・温度・土壌水分・CO_2濃度などの環境因子がその開度を調整するという植物生理学的な知見に合致する。しかしながら、数多く存在するパラメータを実験データにより同時に最適化することが困難であり、それぞれの環境因子の非独立性を考慮できないという問題がある。

より安定したパラメータの決定を行うことができるモデルとしては、日射・温度・CO_2濃度から光合成速度を推定した上で蒸散量を回帰分析する Ball 型のモデルが挙げられる。これは光合成・蒸散速度が比例するという物理的事実と、葉の内外の CO_2 濃度の比が一定に保たれるという経験的事実に基づいている。Ball 型モデルの一種である Leuning のモデル[2-20]は式(2-9)のように表される。

$$g_{sc} = a_1 \frac{A_n}{(C_i - \Gamma^*)} \frac{1}{(1 + D/D_0)} + g_{scmin} \qquad (2-9)$$

A_n：純同化速度[μmol/ m²･s]、Γ^*：CO_2 補償点[μmol/ mol]、D：飽差[hPa]、a_1, D_0, g_{scmin}：パラメータ

純同化速度は総光合成量から呼吸を引いた値である。総光合成量は Farquhar のモデル[2-21)]のような同化の生化学的モデルで与えることができる。これは光合成の過程、すなわち光エネルギーから NDAPH と ATP を合成する光化学反応過程、NDAPH・ATP を用いて CO_2 と H_2O から糖を合成するカルビン回路過程をモデル化したものである。光化学反応過程を明らかにするためには葉による PAR の吸収量、すなわち葉面に入射する PAR と葉の PAR の吸収率・反射率の情報が必要である。葉面に PAR が入射する現象は樹冠内での放射の消散と散乱であるため、2.2.1 と同様に、精緻な計算には葉の大きさや枝の太さのスケールの形態情報が必要であるが、まずは葉群の空間スケールの LAD と WAD の分布を考えることが重要である。カルビン回路過程における酵素の働きには温度が大きく影響するため、葉温の情報が必要である。葉温には葉面へ入射する日射量と葉を囲む物体との長波長放射の授

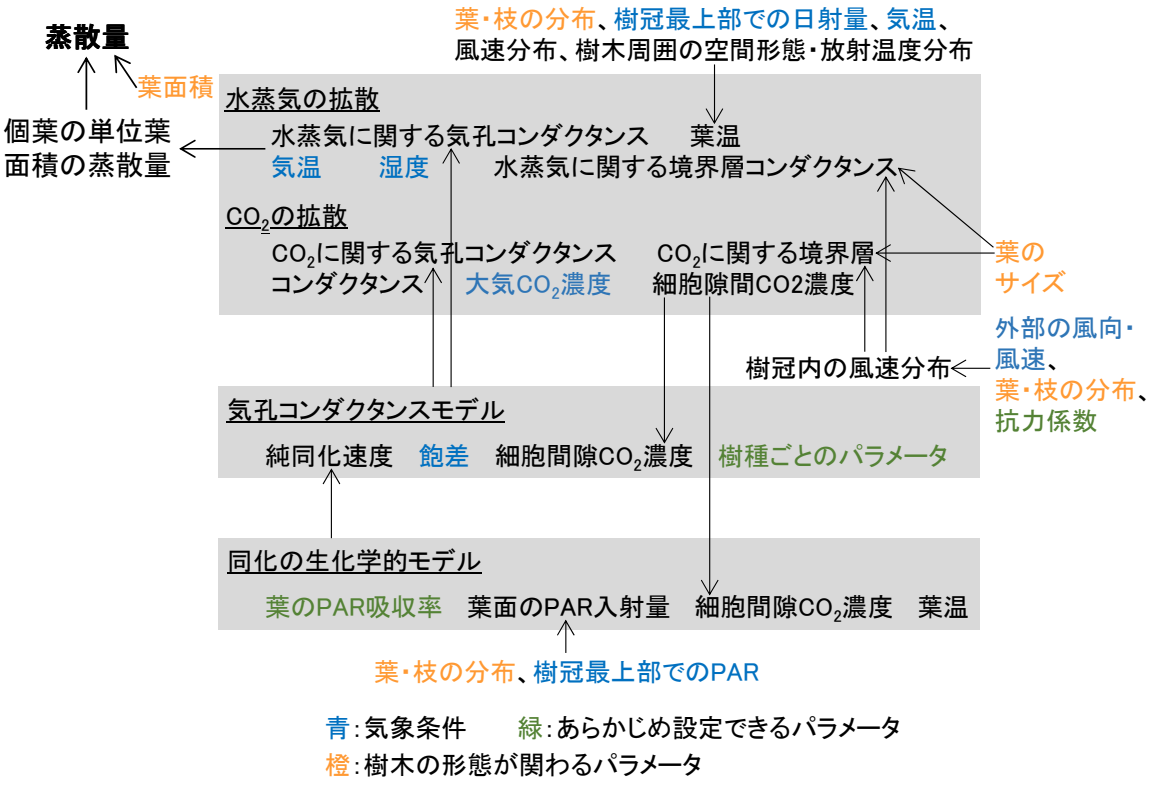


図 2-9　蒸散作用の評価に必要な情報

受、対流による葉と大気の間の熱の移動が関係する。このうち日射と長波長放射の授受は、PAR と同様に葉群の空間スケールの LAD と WAD の分布とそれぞれの波長帯における葉の反射率、透過率、吸収率が必要である。対流には風速が関連するため、境界層コンダクタンスの項で述べたように、LAD 分布と抗力係数が必要となる。

蒸散作用の評価に必要な情報を図 2-9 にまとめる。気象条件、樹木の生理的な特徴、樹木の形態が複雑に影響している。気象条件、土壌の水分状態、葉の内部の CO_2 濃度や水蒸気の濃度に対する気孔の反応は樹種ごとに異なるため、気孔コンダクタンスモデルにおけるパラメータは樹種ごとに整備されなければならない。以上のようなパラメータや気象条件以外の要素には樹木の形態が関係しており、1 章で述べた個々の樹木の形態の違いは蒸散作用に大きく影響している。

2.2.3 防風

樹冠の形状や大きさによって防風効果が及ぶ範囲が異なるため、まずは樹冠形状の情報が必要となる。樹冠での風速の減衰を評価するためには、樹木の流体力学的な抵抗を考える必要がある。流体に働く抗力は式(2-12)で表される。

$$D = \frac{1}{2}\rho S C_D V^2 \qquad (2-12)$$

D: 抗力[N]、ρ: 流体の密度[kg/m^3]、S: 物体の代表面積[m^2]、C_D、抗力係数[-]、V: 物体と流体の相対速度[m/s]

樹木の場合は LAD を代表面積とすることができる [2-22]。吉田ら [2-23]のモデルでは抗力係数を一定としているが、LAD が同様であっても、風により揺れやすい樹種と揺れにくい樹種で抗力は異なる。樹木周辺での気流分布と刈り取りによる LAD 分布の関係を調べた神山ら [2-18]の研究では、抗力係数は樹種によって 0.5 程度幅があることや、風に対して変形しやすい樹種では風速の増加に従い抵抗係数が減少することが示されている。樹種ごとの抗力係数はこのような実験を通して整備されることが望まれる。また、神山ら [2-18]は葉の局所的分布が樹木後方の気流性状に与える影響が大きいことも指摘しており、人が通行・滞在する場所での気流分布を考えるためには、樹冠全体の LAD だけでなく LAD 分布が重要となる。

以上のように防風効果の評価には、簡易的には樹冠形状と樹木全体の LAD、一般的な抗力係数が必要である。より正確に人が通行・滞在する場所への影響を評価するためには、樹種や風速に応じた抗力係数と LAD 分布が求められる。

2.2.4 CO_2の固定

樹木は、気孔から取り入れた CO_2 を用いて光合成により糖を生成し、それにより葉、幹、枝、根などの各組織が作られてゆく。従って、樹木が存在する限りは、樹木が吸収した CO_2 の量と呼吸により放出した CO_2 の量の差は樹木内に固定されることになる。木質部の C の含有量は樹種によらず乾燥重量の 50%程度であることから、CO_2 固定量の評価には木質部の乾燥重量が用いられる。乾燥重量を直接測定することは困難であるため、樹高や胸高直径と乾燥重量の相関関係（樹種により異なる）を利用する方法が用いられている。森林においては、森林生産量を把握するためにこの相関関係について多くのデータが蓄積されている。都市緑化樹木についても半田ら[2-24]や藤原ら[2-25]が、樹高や胸高直径から CO_2 固定量を求める式を樹種ごとに作成している。このような式を求めるための解析対象樹木は樹種や樹齢が限られているため、さらにデータを蓄積していくことが必要とされている[2-25]。

以上のように CO_2 の固定量の評価には、樹種、樹高、胸高直径、乾燥重量と樹高・胸高直径の関係式が必要となる。

2.2.5 大気浄化

光合成のための CO_2 と同時に、NO_2 や SO_2 などの汚染ガスも気孔から取り入れられて植物内に固定されることが植物の大気浄化機能、汚染物質吸着機能などと呼ばれている。光合成能力の低下を引き起こさない低濃度の条件であれば、CO_2 吸収量と汚染ガス吸収量の比をあらかじめ求めておけば、CO_2 の固定能力から汚染ガス吸収能力が推定することが可能である[2-26]。NO_2 や SO_2 は植物内から植物外への放出がないため、CO_2 の吸収量が問題となる（CO_2 固定量の評価には純生産量（CO_2 の吸収量－呼吸量）が必要）。CO_2 の吸収量は純生産量から推定される。植物の汚染ガス吸収速度は例えば名取ら[2-27]の研究のように多くの研究で調査されている。

以上のように大気浄化機能の評価には、CO_2 固定量の評価に必要な情報に加えて、樹種ごとの CO_2 吸収量と汚染ガス吸収量の比の情報が必要となる。

2.2.6 防音

樹木の防音効果とは、騒音減からの音が樹冠内で摩擦抵抗や粘着抵抗により熱エネルギーに変換されたり、枝葉が振動したりすることで減衰することである[2-28]。樹木に入射した音には、樹冠で吸収される成分、透過する成分、散乱する成分に分けられるが、樹冠の構造を考慮して理論的に音の減衰を表すことは困難であるため、実験的に減衰を表す式を求める研究が行われている[2-28]。多くの研究では、樹林の幅と音の減推量が関係付けられている。

実際には密な樹冠ほど防音効果が高い。しかしながら、防音効果は単木ではなく樹林や何列にも並ぶ樹木群に期待されるものであり、個々の樹木の粗密よりも、まずはある樹種の樹林を何 m 通過したのかが重要視されているものと考えられる。

以上のように防音効果の評価には、樹林の幅と樹種ごとの防音効果の関係が必要である。

2.2.7 眩光防止、紫外線の遮蔽

眩光防止、紫外線の遮蔽は樹冠での放射の減衰を考えればよいため、2.2.1 で述べた日射遮蔽効果の評価に必要な情報により評価することができる。葉の吸収率は紫外域や可視域では 0.8 以上になるため、空隙を透過する成分を考えることが重要になる。

2.2.8 景観の改善

高精度なレンダリング手法によって、木陰や葉を透過する太陽光のイメージを再現する研究は、情報処理や、コンピュータグラフィック、映像メディア等の分野で古くから行われており、多くの市販品も見られる(maya, 3dsmax, cinema4D など)。現在の研究では，赤木ら[2-29]の風にゆれる樹木のアニメーションの高速表現や、新谷ら[2-30]の現実に近い樹木の質感の表現方法に関する研究、また丸山ら[2-31]の昼光下の天空光を考慮した樹木と樹影の高速レンダリング等が挙げられ、他にも様々なアプローチで木陰の光環境の再現に関する研究がなされている。

しかしながら、都市に存在する樹木の葉を 1 枚 1 枚再現することは困難である。そこで山岸ら[2-32]の研究ように、3 次元樹木成長シミュレーションモデルにより、実際の樹木の樹種、樹高、樹冠直径などの情報から CG モデルを作成する方法が有効である。葉の疎密は景観に大きく影響するため、LAI のように葉の密度を表す情報をもとに、配置する樹木モデルの葉の量を変えることも可能である。

行政における緑化による景観改善効果の評価指標として、緑視率が用いられている。緑視率とは、人の視野内に占める樹木などのみどりの割合である。多くの自治体におけるみどりの調査の際に、対象地内の主要な箇所で写真撮影を行い緑視率の情報が整備されている。個々の樹木の樹冠形状の情報が整備されればより多くの箇所で緑視率を得ることが得きる。

以上のように景観改善効果の評価には、樹種、樹高、樹冠直径、葉の密度（LAI）とこれらの情報を基に樹木を再現することができる CG モデルが必要となる。行政の評価に用いられる指標である緑視率の整備の点からは樹冠形状の情報が求められる。

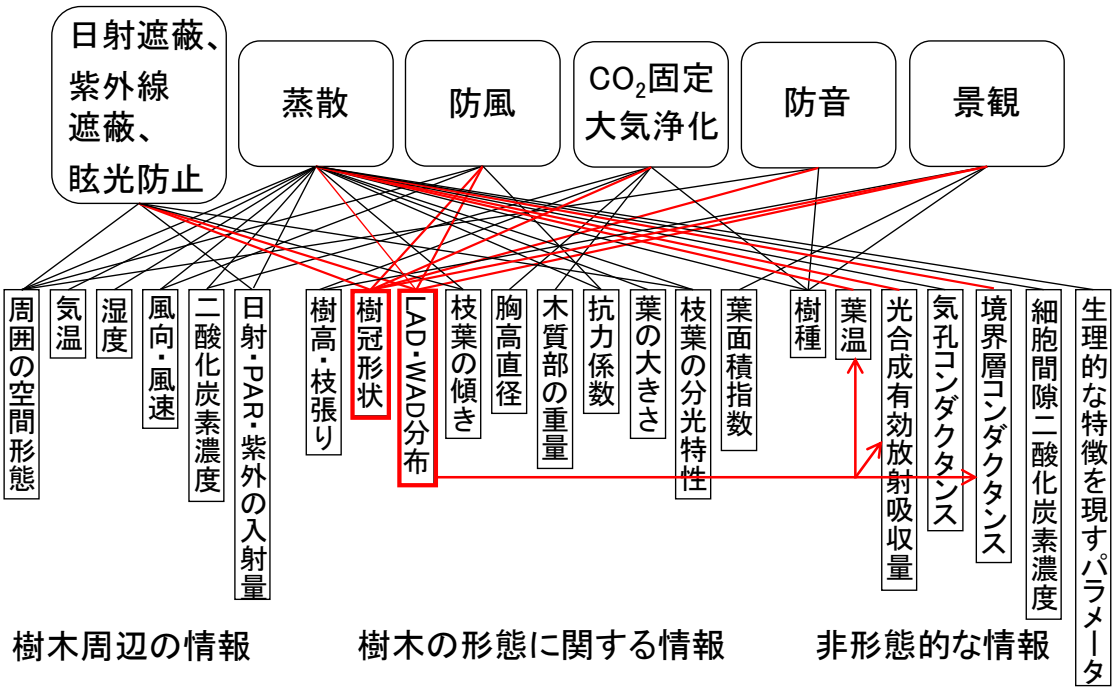


図 2-10　樹木の環境調整効果とその評価に必要な情報

2.2.9　本研究で整備する情報

2.2.1 から 2.2.9 において述べた樹木の環境調整効果に必要な情報を図 2-10 にまとめる。樹木の形態情報が樹木の効果を評価するための基礎となるが、特に樹冠形状と LAD 分布まで整備することが熱環境緩和効果の評価には重要である。本研究では、樹高や枝張りだけでなく樹冠形状と LAD 分布まで含めた形態情報を樹木の 3 次元情報と呼ぶ。樹木の 3 次元情報は熱環境緩和効果以外の環境調整効果を評価するためにも重要な情報となっている。

LAD 分布は voxel ベースとすることで、都市空間の熱収支シミュレーション [2-33]や CFD シミュレーション [2-18]の樹木領域にも適用することができる。浅輪らは単木の熱・水収支特性の分析に基づき、voxel ベースで熱・水収支のモデル化を行い，熱収支シミュレーション [2-33]に導入する研究も行っている [2-34]。また、voxel サイズが小さい場合には樹冠形状も表現することができる。以上から、本研究では voxel ベースで樹木の 3 次元情報を整備する手法を検討する。

2.3　樹木の三次元情報を整備するための観測方法

2.2 において樹木の環境調整効果の評価に最も重要であると指摘した樹木の 3 次元情報の整備方法について検討する。

2.3.1　観測方法に求められる要件

樹木の 3 次元情報の中で最も推定が難しい LAD 分布を地上の固定点から測定する方法としては、ポイントコドラート法や地上型 LiDAR を用いた手法が挙げられる。ポイントコドラート法とは樹冠にプローブを挿入し、葉とプローブの接触確率から LAD 分布を求める方法である。プローブの挿入数を増やすことで高精度な推定が可能であるが、樹冠を voxel に分割し、各 voxel にプローブを挿入する作業は多大な労力を要する。地上型 LiDAR は、高速でレーザーを照射することで、ポイントコドラート法と同様の原理の測定が短時間で可能となる（レーザーは葉を透過しないため、死角をなくすためには複数個所からの測定が必要)。しかしながら、建物や樹木、その他の構造物によるレーザーの遮蔽の影響で 1 つの測定地点から情報を得ることができる範囲が限られるため、個々の樹木の情報を得るには多くの労力・測定時間を要する。以上のように、地上の固定点からの測定では、緑化重点地区（図 1-5）のような領域において面的に樹木の 3 次元情報を整備することは困難である。

本研究では、低労力で広域を短時間に観測することが可能な方法として、移動するプラットフォームにセンサを搭載する観測方法に着目する。プラットフォームとは、衛星や航空機などセンサを搭載する乗り物である。センサには、マルチスペクトルセンサなどの受動型のものやレーザー・レーダのように能動型のものがあり、使用される波長も可視域、近赤外域、熱赤外域、マイクロ波など様々な種類がある。次項において、一般的に用いられるプラットフォームとセンサを整理し、本研究で使用する観測方法を決定する。

2.3.2　センサ

三次元の空間情報を得ることができるセンサとしては、立体視センサ、合成開口レーダ（synthetic aperture radar (SAR)）、レーザー計測 (light detection and ranging (LiDAR)) が挙げられる。以下にそれぞれの特徴を述べる。

立体視センサ

複数地点から撮影した画像同士の共通点を用いて、画像上のある点の 3 次元座標値を取得する写真測量のことである。例えば、日本の衛星「だいち」には、衛星の進行方向に対して前方、直下、後方を観測することにより、2.5 m の空間分解能で地上の標高の情報を得る

ことができる立体視センサ PRISM が搭載されている。また、航空機による写真測量は自治体によるみどりの調査に用いられている。コストが安いこと、また現在までに多く使われてきたことという長所があるが、得られる情報は樹冠表面の形状であり奥行き（樹冠の内部構造）は得ることができない。同様に 2 次元の画像を取得するマルチスペクトルスキャナやハイパースペクトルスキャナにより取得することができる、対象物からの太陽放射の分光反射強度には、葉の密度の情報が含まれるが、得られるのは平面的な情報(LAI)であり植生の活性度の情報も混在している。

合成開口レーダ（SAR）

SAR とは、電波をセンサから能動的に発射して対象物からの反射を捉えるレーダ（radio detecting and ranging (Radar)）の一種である。SAR は電波の中でもマイクロ波（波長 0.1 mm～1 m の電磁波）を用いる。通常のレーダは波長が長いため空間分解能が低く、分解能の向上には開口の大きなアンテナが必要となる。SAR は、衛星や航空機が移動しながら連続的にマイクロ波を照射し、対象物に複数回照射されるようにし、その反射を合成することで、開口の大きなアンテナで観測した場合と同じ分解能を実現している。可視域や熱赤外域よりも波長が長いマイクロ波を用いるため、大気での散乱を受けず天候によらずに観測が可能である。そのため、晴天が少ない地域の自然の監視や、緊急性を要する災害後の被害抽出などに用いられる。波長が長いマイクロ波（L バンド（波長 15 cm 以上）など）は植生を透過するため、植生の観測には C バンド（波長 3.8-7.5 cm）以下の波長帯が用いられる。

近年高分解能化が進んでおり、情報通信研究機構が開発を行っている航空機搭載高分解能 SAR、PiSAR2 は 0.5 m 以下の空間分解能を有している [2-35]。また、0.1 m の分解能のデータも報告されている [2-36]。SAR で得られるのは通常、対象物のマイクロ波の散乱特性を表す 2 次元の画像であり、偏波を解析して標高情報を得るには時間を要する。また、樹冠での散乱特性を解析して葉や枝の分布の情報を抽出することは困難である。

レーザー計測（LiDAR）

センサから能動的に電磁波を照射する点は SAR と同様であるが、光（可視～近赤外域）を用いる点が異なる。波長が短い電磁波を使用するため、容易に高分解能のデータを得ることができる。図 2-11 に LiDAR で得られる情報の模式図を示す。レーザーを発射してから反射してくるまでの時間から対象物までの距離を算出し、レーザーの発射時に記録された発射方向の情報からレーザーが反射した位置を特定する。レーザーが反射した点の 3 次元座標値をデータとして得ることができる。このとき、水平方向の座標値は、レーザーが照射される範囲の中心点の値である。なお、以下ではレーザーが照射される範囲をフットプリントと呼ぶ。樹木にレーザーが照射された場合には、1 つのレーザーの中に複数の対象（葉群）

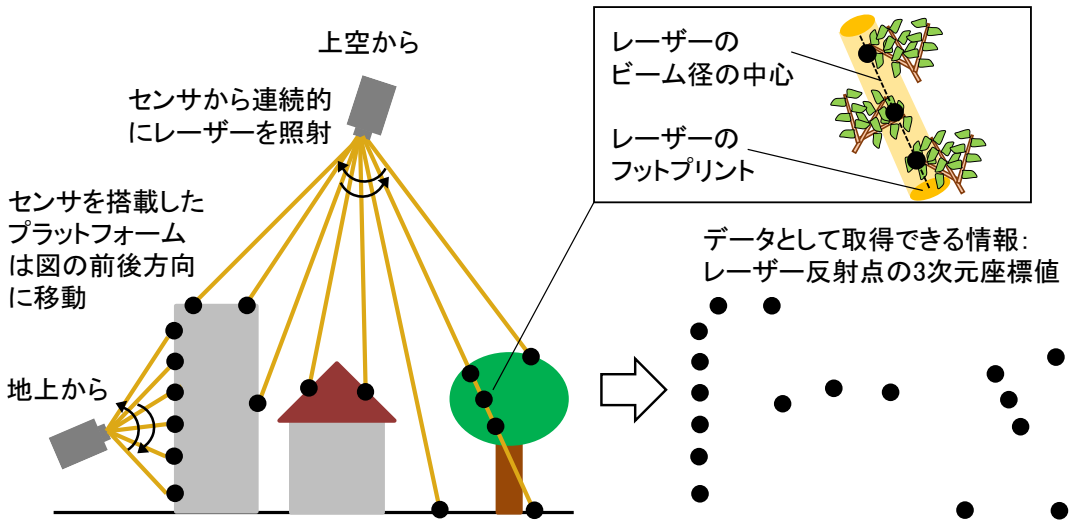


図 2-11　LiDAR により得られる情報の概念図

表 2-1　3 次元の空間情報を得ることができるセンサの特徴

	立体視センサ	合成開口レーダ(SAR)	レーザー計測(LiDAR)
長所	・安価 ・従来からみどりの調査に使われてきた	・気象条件によらず観測可能 ・0.1～0.3 mのような高分解能データを取得可能	・レーザーが当たった点の3次元座標値を取得 ・樹冠内部での反射についても同様に取得可能
短所	・得られるのは表面的な形状 ・マルチスペクトルやハイパースペクトルを合わせてもLAIなど2次元的な情報	・得られるのは散乱特性を表す2次元の画像 ・標高データの作成にも時間がかかる ・樹冠内部の情報の抽出は困難	・レーザーが遮蔽された部分のより奥は観測できない ・大気での散乱を受けやすい

が含まれる場合がある。距離方向の分解能よりも離れている対象については、それぞれの位置情報を取得できる。これは樹冠内部の葉群の分布の情報を得るのに有利である。また、LiDAR には、地上においてフットプリントの直径が数 m から数 10 m となる large footprint LiDAR と数 10 cm 程度の small foot print LiDAR がある。LiDAR の短所としては、原理上、レーザーが完全に遮蔽されるとそれより奥の情報は得ることができないことである。また、SAR とは異なり、大気による散乱の影響を受けやすい。

表 2-1 に各センサの特徴をまとめる。本研究では、樹冠の内部も含めて 3 次元の空間情報を取得することが可能な LiDAR を採用する。large footprint LiDAR では、樹冠全体が 1 つのレーザーのフットプリントで覆われるため、樹冠形状や水平方向の葉群の分布を推定することができない。そのため、small footprint LiDAR を採用する。以下、LiDAR と言う場合には small footprint LiDAR を指すこととする。

2.3.3　プラットフォーム

移動しながら観測が可能なプラットフォームとしては、衛星、航空機（固定翼、回転翼）、自動車が挙げられる。図 2-12 に LiDAR を搭載するプラットフォームの特徴を示す。衛星からは高頻度で広域の観測が可能である。また、衛星データは安価で入手しやすいという長所がある。国立環境研究所などが、樹高に加えて植生指数を推定可能な 2 波長のレーザーを用いた衛星搭載型植生 LiDAR を開発している（i-LOVES[2-37]）。森林のバイオマス推定に有用となるが、宇宙からの観測ではレーザーのフットプリントが数 10 m になるため、個々の樹木の情報を得ることはできない。最も高分解能のデータを得ることができるのは自動車搭載型の LiDAR である。しかしながら、接道部の樹木しか観測できず、樹冠の中でも高精度に捉えられるのは道路側のみと考えられる。航空機による観測データは衛星に比べて高価であるが、高分解能なデータを取得できる。従来は地上の 1 m^2 の領域に数発のレーザーが到達する照射密度であったが、近年では 20 発以上到達する高分解能航空機 LiDAR データが一般に入手可能になっている。さらに、距離方向の分解能も従来の 2m 以上から 0.5 m に改善されている。これは 1 つのレーザー内に複数の葉群が含まれた場合、0.5 m 以上離れているものはそれぞれの位置を特定できるということである。以上のような特徴は、本研究が対象とする個々の樹木の葉群の空間スケールの 3 次元情報の整備に対して優位である。航空機には、固定翼と回転翼がある。固定翼は、広域の観測に有用であり、飛行姿勢が安定するためデータの質が良いという特徴がある。回転翼は固定翼に比べて飛行速度を落とすことができるため、より高分解能なデータを得ることができる特徴があり、GPS や慣性計測装置の発達によりデータの質も向上している。また、回転翼の方が飛行コースにも自由度があるため、対象領域を無駄なく観測することができる。本研究では、緑化重点地区のような領域における、高分解能な 3 次元空間情報の取得に適用できるように回転翼の航空機を用いる。

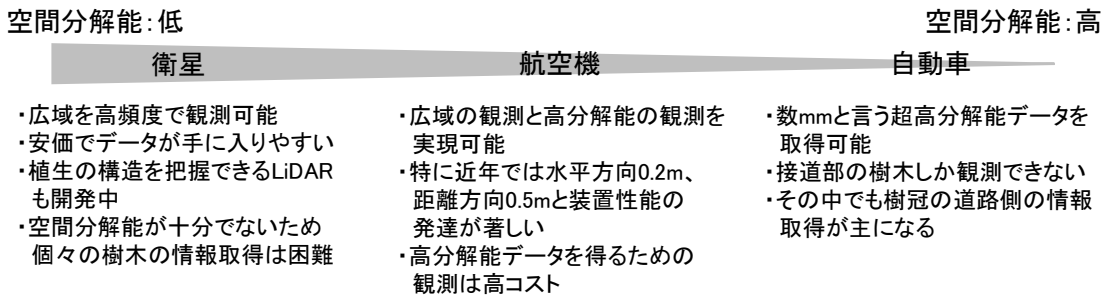


図 2-12　LiDAR を搭載するプラットフォームの特徴

2.3.4　本研究で用いる観測方法の原理

以上から本研究では、樹木の 3 次元情報の整備方法として回転翼に搭載された LiDAR を用いる。固定翼、回転翼ともに観測原理は同様であるため、これらをまとめて航空機 LiDAR と呼ぶ。本研究で使用するデータを指して航空機 LiDAR と言う場合の航空機とは回転翼を示す。図 2-13 に航空機 LiDAR の観測原理を示す。発射したそれぞれのレーザーの反射パルスを短い時間間隔でサンプリングし波形を再現することで、波形のピーク値からレーザーが反射した地点までの距離を算出する。通常、レーザーは航空機の直下から左右の 20°～30° の範囲に照射される。近年では数 cm の精度で距離を測定できるようになっている。反射パルス波形の各ピークの高さを反射強度といい、レーザーの入射角が小さく、入射方向と、入射方向と同じ反射方向の BRDF が大きい対象物ほど反射強度が大きくなる。雑音などを除くために、閾値を決めてそれ以上の反射強度のパルスのみをデータとして取得する。そのため、葉や枝の隙間から地表面が見えていても、その割合が小さい場合には、反射強度が閾値以下となり地表面のデータは得られない。このように、レーザーが完全に遮蔽されていない場合であっても下部のデータが得られなくなった場合には、レーザーが遮蔽されたと言う。また、樹木にレーザーが入射した場合には、1 つのレーザーに対して複数の葉群や地表面から複数の反射パルスが帰ってくることがある。このとき最初に反射したパルスをファーストパルス、最後に反射したパルスをラストパルス、その間のパルスを中間パルスと呼ぶ。このように別々のターゲットとして認識するためには、パルスの持続時間よりも対象物同士が離れていなければならない。従来は 2 m 以上離れていなければならなかったが、

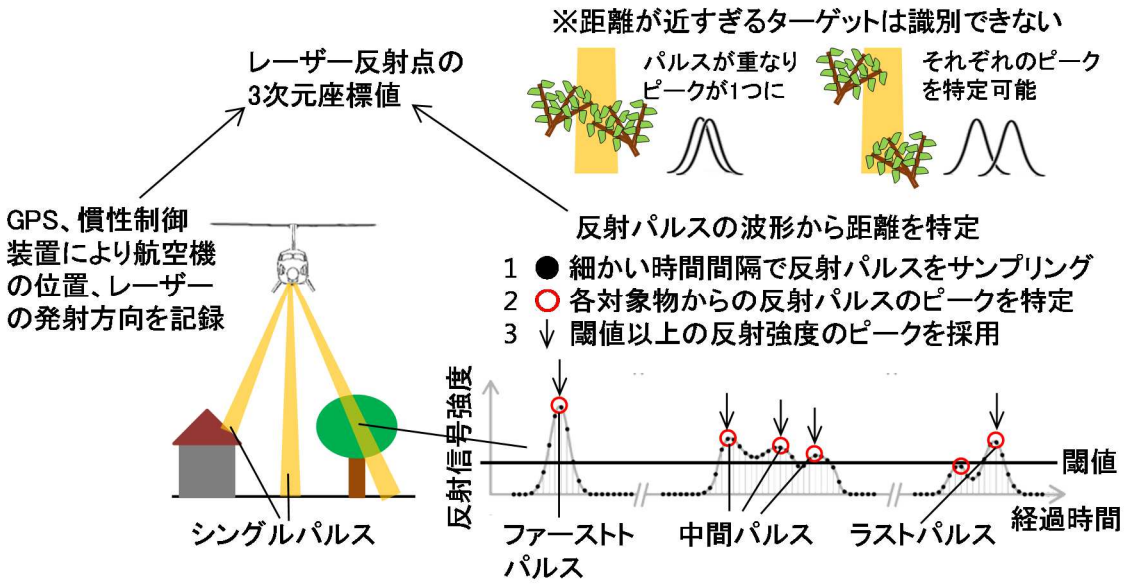
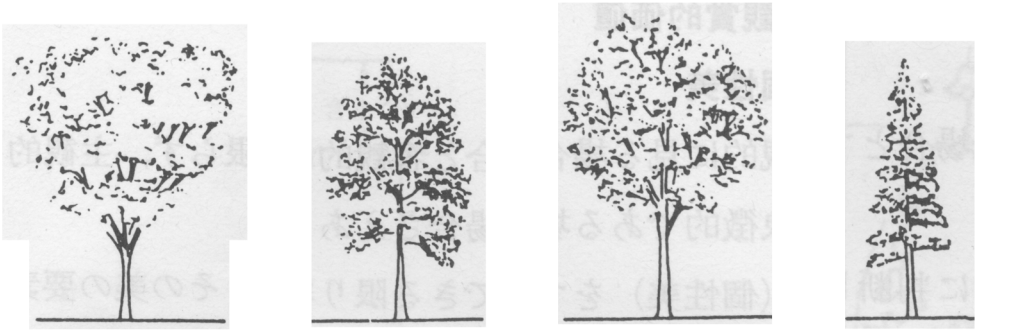


図 2-13　航空機 LiDAR の観測原理

近年では 0.5 m まで分解能が向上している。地表面や屋根面にレーザーが照射され、1 つの反射パルスのみが帰ってきたものはシングルパルスと呼ぶ。樹木であっても葉の密度が大きくなるとシングルパルスの割合が増加する。

2.3.5 航空機 LiDAR と樹木の形態の関係

航空機 LiDAR は上空からレーザーを照射する。そのため、上部の葉によりレーザーが遮られた場合、それより下部の情報を得ることはできない。都市には様々な樹冠形状・葉のつき方の樹木が存在しており、樹冠の形態の特徴により航空機 LiDAR で情報を得ることができる範囲が異なる。図 2-14 に都市緑化に用いられる樹木の代表的な樹冠形状を示す。円錐状の樹木のように、樹冠の外側に葉が分布しており上空から見て死角が少ないほど、葉群の分布を高精度に捉えることができる。一方、逆円錐状の樹木のように、樹冠の上部が広がっており樹冠上部に葉が密集している樹木ほど、樹冠下部の観測が難しくなる。図 2-15 に樹冠内を進むレーザーの概念図を示す。同図①のレーザーのようにレーザーが遮蔽された場合、より下部の情報を得ることはできない。従って、図の③のように voxel に入射するレーザー数が徐々に減少してゆくように、レーザーの照射間隔よりも大きな voxel を設定する必要がある。このような voxel を設定した場合であっても、図の④のように、樹冠下部においてはレーザーが当たらない領域が増加することで葉面積が過小推定される。特に、逆円錐状の樹木はこのような領域が増加する。しかしながら、航空機からのレーザーが届かない領域は日射も届きにくいと考えられ、航空機 LiDAR で得られる 3 次元情報は樹木の熱環境緩和効果の評価に有効であると言える。



逆円錐状	卵状	球状	円錐状
樹冠上部に葉が密に分布	樹冠の外側に葉が均等に分布	樹冠の外側に葉が均等に分布	樹冠の外側に葉が分布し、下部ほど樹冠が広がる
ケヤキ、ヤマザクラ など	シラカシ トウカエデ など	タブノキ ウメ など	カラマツ ヒノキ など

図 2-14　都市緑化に用いられる樹木の樹形とその特徴 [2-38)]

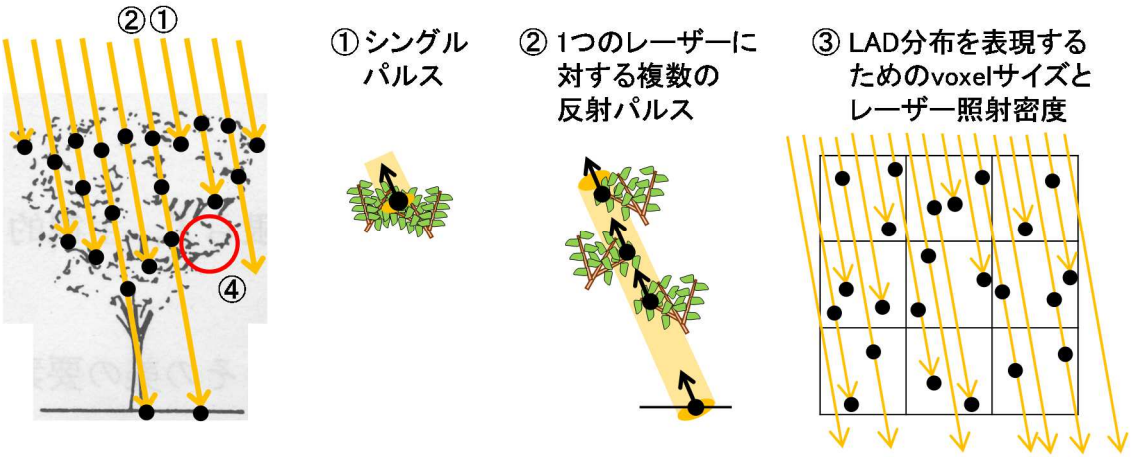


図 2-15 樹冠内を進む航空機からのレーザーの模式図

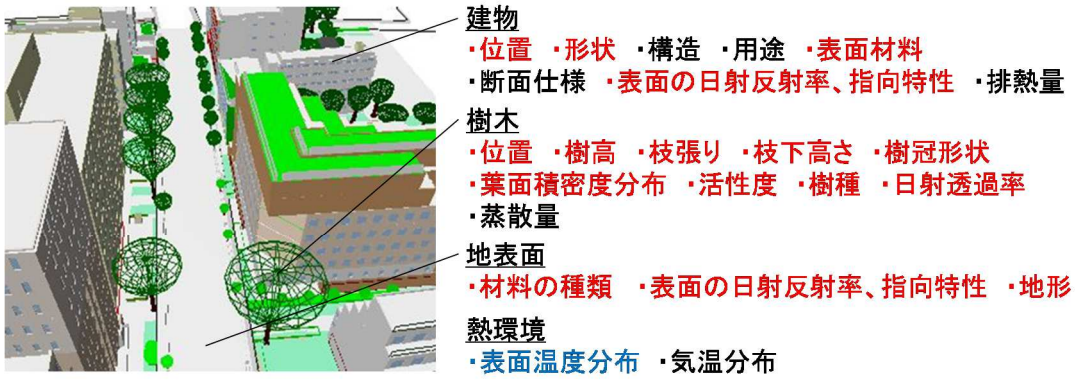


図 2-16 都市熱環境情報と航空機 LiDAR により得られる情報の関係

2.3.6 都市熱環境情報の整備に対する航空機 LiDAR の有用性

図 2-16 に都市の熱環境を評価するために必要な情報、都市熱環境情報を示す。これは気温や表面温度分布などの環境情報と、それらの形成要因となる建物や樹木の形状などの空間情報を合わせたものである。本研究では、この中で樹木の熱環境緩和効果に着目し、航空機 LiDAR を用いた樹木の形態情報の整備を研究対象としている。しかしながら、航空機 LiDAR は樹木の情報だけではなく、多くの熱環境情報の整備に貢献することができると考えられる（図 2-16）。レーザーの反射強度は対象物の反射率や反射の指向特性の情報を含んでいる。また、建物の壁面にもレーザーが照射されるため、壁面の形状や材料に関する情報も得ることができる。樹木が航空機から見て建物の死角に存在する場合、樹木の情報を得ることができない（図 2-17）。そこで、複数の飛行コースから観測を行う必要が生じるが、こ

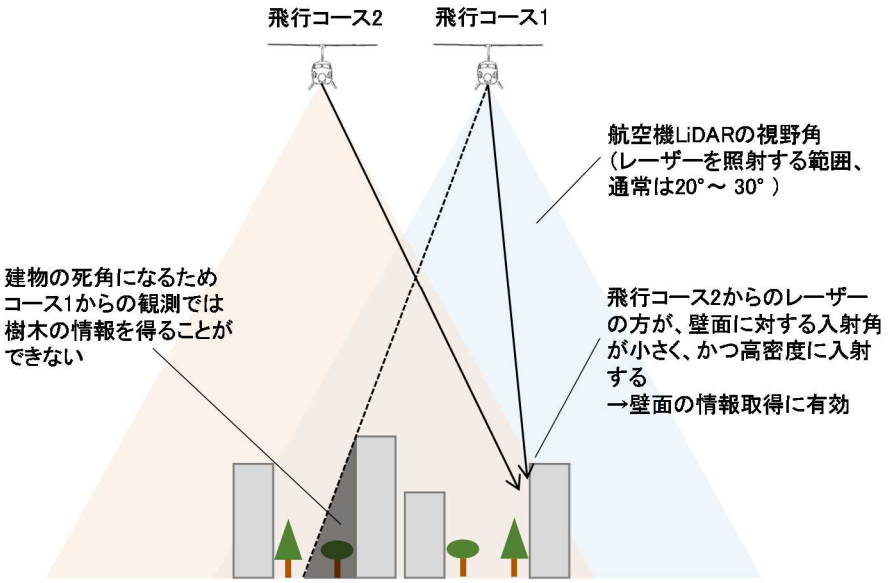


図 2-17 航空機 LiDAR の視野角と情報を得ることができる範囲の関係

れにより壁面に対する入射角が小さくなるようにレーザーが照射される（レーザーの間隔も狭く、フットプリントも小さい）建物が増加する。そのため、建物の形状を捉えるためにも、複数コースからの観測は有効である。さらに近年では、LiDAR による観測と同時に、熱赤外カメラによる観測も行うことが可能な観測システムも開発されており、表面温度に関連した情報も得ることができる。以上のように、本研究で樹木の 3 次元情報の整備に航空機 LiDAR を活用することは、都市熱環境情報を整備するという観点からも重要なものと位置づけられる。

2.3.7 航空機 LiDAR を用いた情報整備の実用性

観測を行うことができる気象条件

2.3.2 で述べたように、LiDAR はマイクロ波を用いたセンシングとは異なり、観測には象条件の制約を受ける。しかしながら、葉群の空間スケールの高分解能航空機 LiDAR データを得るためには、300 m～500 m 程度の高さから観測を行うため、その範囲に雲や霧が生じていなければ観測を行うことができる。また、都市における樹木の情報整備は、災害の監視などに比べて緊急性を要しないことも考慮すると、レーダに比べて天候の制約を受ける点は問題ではない。

観測に必要となるコスト

各地方自治体におけるみどりの調査では、ある規模以上の樹木を対象として、地上での毎木調査により樹木の本数・位置・樹種・樹高・胸高直径・生育状況などの情報が整備されて

いる。地上において個々の樹木の調査を行っているため、多くの調査期間やコストをかけていると考えられる。航空機 LiDAR は少ない労力で短時間に広域を観測することが可能であり、特に回転翼の場合は自由に飛行することができるため、往復して飛行することで緑化重点地区（図 1-5）のような範囲の観測も容易に実施することができる。また、航空機 LiDAR を用いることで、本研究で対象としている樹冠形状や葉面積密度分布だけでなく、各地方自治体が調査対象としている情報のうち大部分の情報を取得することができる。以上のことから、観測のためのコストを考慮しても、航空機 LiDAR は実用性の高い観測方法であると言える。また、近年では本研究で用いたような高分解能航空機 LiDAR データのデータベース化を進めている航測会社も存在する。これにより、新たに観測を行うよりも安価にデータの入手が可能となるため、コストの面でも航空機 LiDAR データを活用することが有利になってゆくと考えられる。ヒートアイランド現象や熱中症患者の増加が社会的な注目を集める現在では、各地方自治体は都市熱環境の改善に力を入れており、大阪府のように府内の 1000 km^2 の領域に渡って航空機熱画像を整備している例も見られる（図 2-18）。このような現状を考慮すると、高分解能航空機 LiDAR データが、緑化重点地区のように特に環境に配慮した計画が実施される地域における環境の評価に活用される可能性は高いと考えられる。

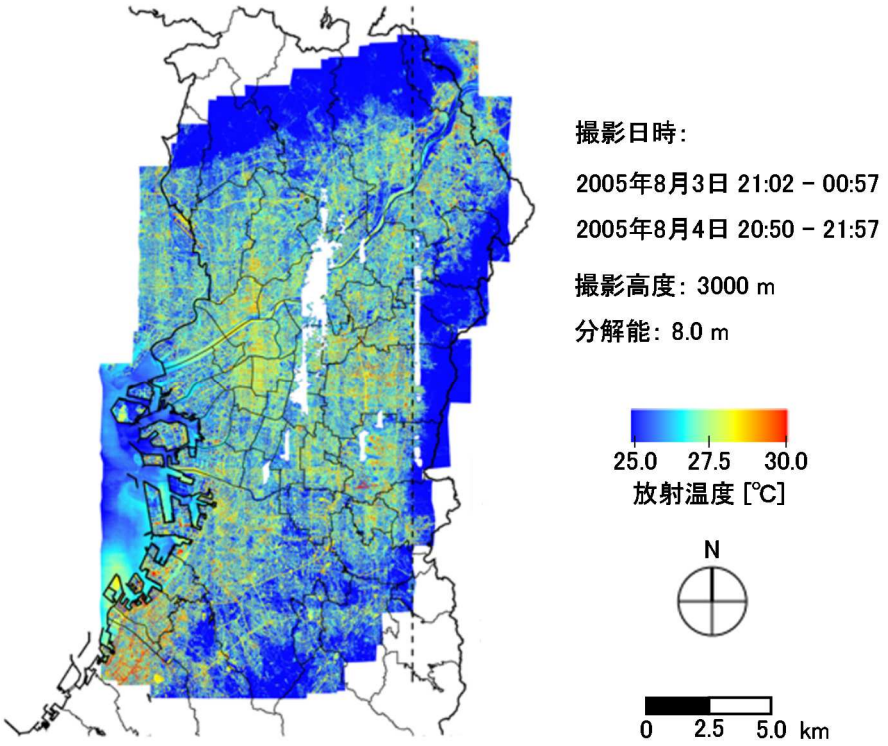


図 2-18 大阪府で整備されている航空機熱画像 [2-39)]

2.4 航空機 LiDAR により樹木の三次元情報を推定した既往研究

航空機 LiDAR による樹木の形態情報の推定手法について検討した既往研究を概観し、本研究で必要な樹木の 3 次元情報を推定するための課題を明らかにする。

2.4.1 樹高・枝張り・枝下高さ

最も基本的な形態情報であり、バイオマスや森林の機能を評価するため基礎となる樹高・枝張り・枝下高さの推定手法については多くの研究が行われてきた。レーザーの密度が低い場合には、レーザーが樹冠の頂点に当たらない確率が高いため、レーザー反射点密度の鉛直分布などから樹高を求める回帰式が作成されている[2-40]。しかしながら、1m² あたり 20 点以上の高密度なデータにより、点群から直接樹高を読み取ることができると指摘されている[2-41]。Persson et al.[2-42]は、隣り合う樹木との境界が最も高さが低くなることを利用して単木の樹冠領域を抽出している。また、地表面と樹冠の間で点密度が小さくなることを利用して枝下高さの推定も行われている[2-43][2-44]。森林では樹冠の下には下層植生が存在するが、都市部では建物や標識、街灯などが存在する。これらも、樹冠の内部に入り込んでいるものでない限り、点密度の鉛直分布から樹冠と分離することができると考えられる。

2.4.2 葉面積指数（LAI）

LAI とは leaf area index（葉面積指数）であり、「地上の単位面積に対してその上方に存在する全ての葉の片面の総面積」と定義され、m^2/m^2 の単位をもつ。植生の成長を表すために重要なパラメータとされている。LAD を鉛直方向に積算したものが LAI となる。葉が一様に分布する層であれば LAI により、放射の消散・散乱を計算することができる（2.2.1）。LiDAR による LAI の推定手法は大きく 2 種類に分けられる。1 つは、現地でサンプル調査を行うことで LAI を得て、LiDAR データから LAI を推定する回帰式を作り、回帰式を対象領域全体に適用する手法である。もう 1 つは、理論的な式から算出する手法である。回帰式に用いられる LiDAR の指標としては、地上に到達したレーザーの割合や樹冠内でのレーザー反射点分布の特徴（尖度や歪度）などが用いられる[2-45]~[2-50]。現地でのサンプル調査は、刈り取りではなく樹冠を透過する光の量から LAI を推定する方法が用いられることもある。一方、理論的な手法としては、式(2-4)や(2-5)から透過率により葉の量が推定できることが利用されることが多い[2-51][2-52]。また、図 2-4 のように、レーザーが葉に当たる確率をもとに直接的に葉の面積を推定する手法も用いられている[2-53]。 同様の構造が一面に広がる森林では回帰式を用いる手法は有用であるが、様々な樹種、樹冠形状、葉の密度の樹木が存在

する都市では、理論的に推定する手法が適している。

2.4.3 樹冠形状・葉群の分布

2.2.1 で述べた通り、樹冠の形状が再現されることは日射遮蔽効果の評価のために重要である。伊藤ら[2-54]は 8.8 点/m^2 の航空機 LiDAR 点群から作成した標高データを用いて樹冠形状を可視化したが、標高データを用いているため葉群の下部分は再現されていない。また、現地で寸法を測定することで検証を行っているが、45 度おきの樹冠中心からの距離での検証に限られている。Kato et al.[2-55]は、10-20 点/m^2 のデータから、ある厚さの層ごとに凸包（全ての点が内側に含まれるような最短の外形線で囲むこと）により外形を再現し、樹冠形状を表現している。しかしながら、凸包では形状の凹凸は表現されにくい。検証はトータルステーション（光を照射しその反射を捕らえることで高精度に対象の位置を測定可能な測量機器）の測定による代表点に限られている。また、枝張りが 1～2 m 過小推定されている。

voxel ベースで樹冠を再現した研究も見られる。Wang et al.[2-56]は 4-7 点/m^2 のデータを用いて、0.5 m × 0.5 m × 1 m の voxel で葉群の分布を再現している。レーザー反射点を含む voxel を抽出することで再現を行っている。しかしながら、精度の検証はされていないため、使用した点密度のデータにより、用いた voxel サイズの空間スケールの葉群の分布が推定可能であるかは明らかにされていない。Sasaki et al.[2-57]は 47 点/m^2 という高密度なデータを持ちて、Wang et al.[2-56]と同様の考え方により、1 m × 1 m × 1 m の voxel を用いて再現を行い、現地調査により検証を行っている。しかしながら、検証が行われたのは奥行き 1m の鉛直断面に限られている。またこれらの研究では、voxel 内の葉の密度については扱われていない。以上のように、3 次元的な樹冠形状や葉群の分布の推定を行った研究では、精度検証が限定されているため、使用しているデータと推定される情報の空間分解能や精度の関係が十分に明らかにされていない。本研究で使用するデータが熱環境緩和効果の評価に必要な空間分解能の情報を有しているかを確認する必要がある。

2.4.4 LAD 分布

これまで挙げた形態の情報とは異なり、LAD 分布の推定手法を扱った研究は少ない。Hosoi et al.[2-58]は航空機 LiDAR と地上型 LiDAR により、LAD 分布を推定する手法を提案している。これは Hosoi et al.[2-59]が提案した地上型 LiDAR により LAD 分布を推定する voxel-based canopy profiling (VCP) method を航空機にも応用したものである。VCP method とは点群をレーザーの分解能と同程度のサイズの small voxel（LAD 算出の voxel とは異なる）に分割し、レーザーの軌跡をトレースすることでレーザーが遮られる確率から

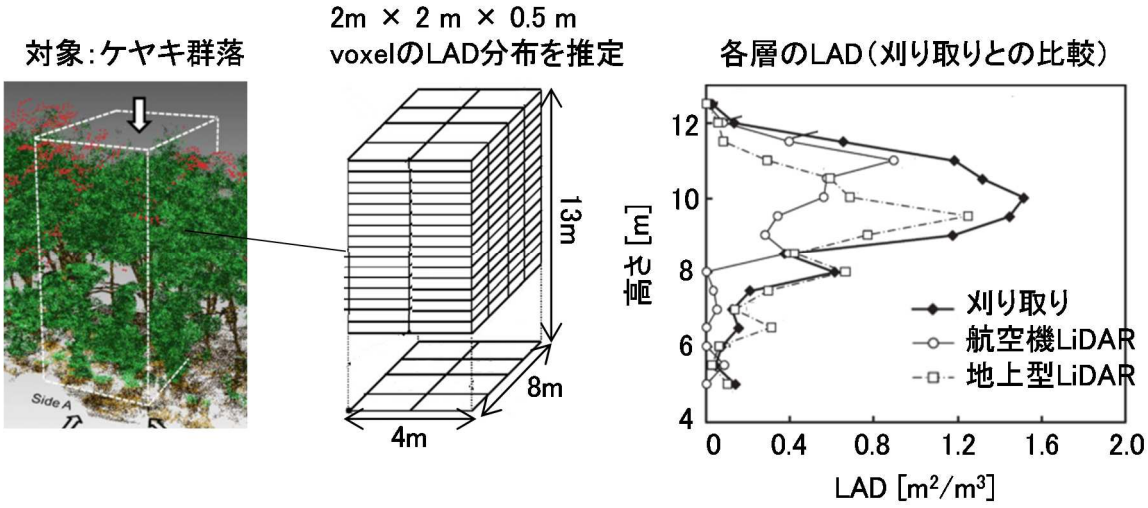


図 2-19　Hosoi et al.による LAD の推定結果 [2-59)]

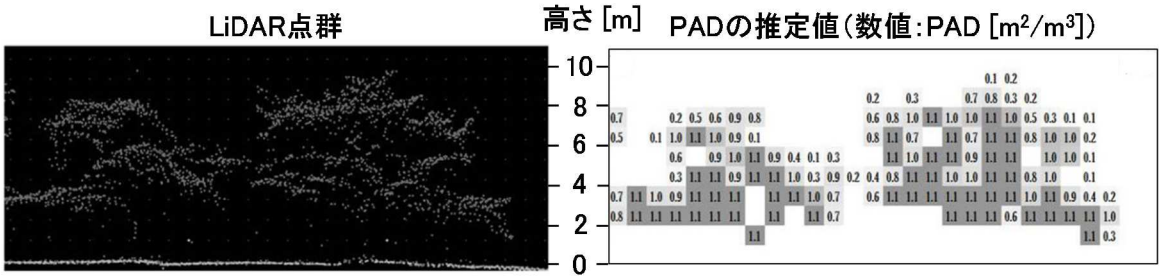


図 2-20　Song et al.による PAD の推定結果 [2-60)]

voxel 内の LAD を推定する手法である（ポイントコドラート法の原理)。図 2-19 に航空機 LiDAR と地上型 LiDAR によるケヤキ群落の LAD 分布を示す。航空機 LiDAR のみの結果では樹冠上部の 1 m を除いて実測値とは対応していないことが分かる。これは、ファーストパルスとシングルパルスのデータのみが用いられたことやレーザーの軌跡の再現方法に課題があるなどの理由が考えられる。Song at al. [2-60)]も同様の原理により植物面積密度(plant area density (PAD))の推定手法を提案している。PAD とは単位体積あたりの葉と枝の表面積である。Song at al.の手法では、レーザー反射点から航空機に向けてレーザーのトレースを行っているため、より正確なレーザーの軌跡の再現が可能であると考えられる。図 2-20 に Song et al.の結果を示す。樹冠下部では多くの voxel で PAD が 1.1 となっている。しかしながら、枝の面積が 1 m^3 中で 1 m^2 を越えることはないと考えられ、明らかに過大推定されている。これはファーストパルスとシングルパルスのみを用いていることが原因である。また、推定精度の検証は胸高直径及び樹高から推定した樹冠のボリュームと PAD の積算値の相関性を示すことで行われているため、具体的な精度は明らかにされていない

が、ファーストパルスとシングルパルスを用いているため樹冠下部では葉面積が過小推定される部分も多いと考えられる。Song et al.はラストパルスや中間パルスも含むデータを取得しているが、これらのパルスからもレーザーのトレースを行うと、1 つのレーザーをダブルカウントすることになるため、ラストパルスや中間パルスは用いていない。

本研究で対象とする葉群の空間スケールの情報の整備には、2.3 で述べたような水平方向・距離方向ともに高分解能な観測装置が不可欠である。しかしながら、高分解能な観測装置を用いた場合であっても、本項で指摘したように、既往研究の手法で推定した 3 次元情報は実際の樹木の形態と対応しないため、環境の評価に適用できないと考えられる。そこで、次節において Hosoi et al.や Song et al.の手法を基に新たな手法を提案する。

2.5　LAD 分布の推定手法の提案

2.5.1　既往研究における推定手法の課題

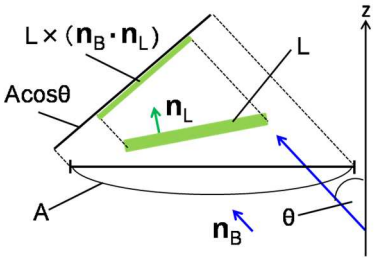
2.4 で挙げた Hosoi et al.[2-58]と Song et al.[2-60]の手法の課題点を具体的に整理する。Song et al.[2-60] の LAD の算出式は Hosoi et al.[2-58]のものを参考にしているため、はじめに Hosoi et al.の算出手法について述べる。葉面積とレーザーと葉の接触確率（contact frequency (CF)）の間には図 2-21 の関係がある。これはポイントコドラート法の原理であり、ポイントコドラート法ではプローブを挿入することで CF を算出する。これをレーザーで行うものが Hosoi et al.の VCP method[2-59]である。VCP method の LAD の推定式は式(2-13)である。

$$LAD = \frac{1}{\Delta H} \cdot \frac{\cos(\theta)}{G(\theta)} \sum_{k=1}^{N} \frac{n_i(k)}{n_i(k) + n_p(k)} \qquad (2-13)$$

ΔH: voxel の高さ、θ: レーザーの天頂角、$G(\theta)$：レーザーに垂直な平面への単位面積の葉の投影面積（葉面の単位法線ベクトルとレーザー方向の単位ベクトルの内積，各 voxel の平均的な葉の傾斜角と入射レーザーの平均的な天頂角を用いて計算される）、N: voxel 内の層の数，$n_i(k)$：k 層で遮蔽されたレーザーの数、$n_p(k)$：k 層を通過したレーザーの数

Σ以降が CF を表している。LAD は葉面積を体積で割った値であるため、図 2-21 の葉面積と CF の関係を葉面積について解いて、体積で割ったのが式(2-13)である。

図 2-22 に式(2-13)の $n_i(k)$，$n_p(k)$の算出方法の概念図を示す。まずは取得したファースト



$$CF = \frac{L \cdot G(\theta)}{A \cdot \cos\theta}$$

A:対象範囲の面積
L:葉の面積　θ:レーザーの天頂角
n_b:レーザー方向の単位ベクトル
n_l:葉の単位法線ベクトル
G(θ):単位葉面積のレーザーに垂直な面への投影面積（n_bとn_lの内積）
CF:レーザーが葉に接触する確率

図 2-21　レーザーと葉の接触確率と葉面積の関係

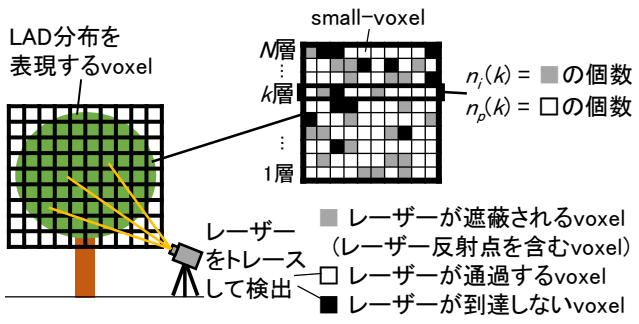


図 2-22　voxel-based canopy profiling (VCP) method[2-59]の概念図

パルス、ラストパルス、中間パルス、シングルパルスのデータのうち、ファーストパルスとシングルパルスのデータをレーザー計測の分解能と同程度のスケールの small voxel に分割する。例えば、LAD を算出する voxel サイズが 0.1 m × 0.1 m × 0.1 m，small voxel のサイズが 1 mm × 1 mm × 1 mm の場合、voxel は 10^6 個の small voxel から構成され、式(2-13)の層の数 Nは 100 となる。$n_i(k)$はレーザーの反射点を含む small voxel の数で与えられる（図 2-22■）。$n_p(k)$はレーザーの軌跡をトレースすることで計算される。レーザーの反射点を含む small voxel にレイが入射した場合にはトレースを中止して次のレーザーのトレースを行う計算を繰り返し、レーザーが通過した small voxel を検出してゆく（図 2-22 □）。この手法を航空機 LiDAR に応用したものが 2.4.4 で挙げた Hosoi et al.の研究[2-58]である。

図 2-19 に示した航空機 LiDAR による推定において LAD が過小推定された理由としては、レーザーの軌跡のトレースが正確に行われなかったことが原因と考えられる。0.1 m × 0.1 m × 0.1 m の small voxel が用いられたが、これは平均的なレーザーの間隔 0.27 m に比べて小さかった。そのため、実際には葉や枝で遮られるはずのレーザーが、計算においてはレーザー反射点を含む voxel に入射せずに下層に侵入した可能性がある。地上型 LiDAR はスキャナが固定されているためレーザーの軌跡を正確にトレース可能であるが、航空機は風の影響により姿勢が変動するため、レーザーの軌跡を再現することは難しいと考えられる。また、LAD の推定誤差の要因としてファーストパルスとシングルパルスのみが用いられたことが挙げられる。これらのパルスのみでは樹冠下部の情報を得ることができない（式(2-13)の n_i が 0 になる）。上記のようにトレースが難しいことを考慮すると、Hosoi et al.[2-58]の手法にラストパルスと中間パルスを含めることは難しいと考えられる。

Song et al.[2-60]の手法の模式図を図 2-23 に示す。レーザー反射点から上空へレーザーをトレースしている。PAD の算出式は Hosoi et al.[2-58]とほぼ同様である。Song et al.は voxel

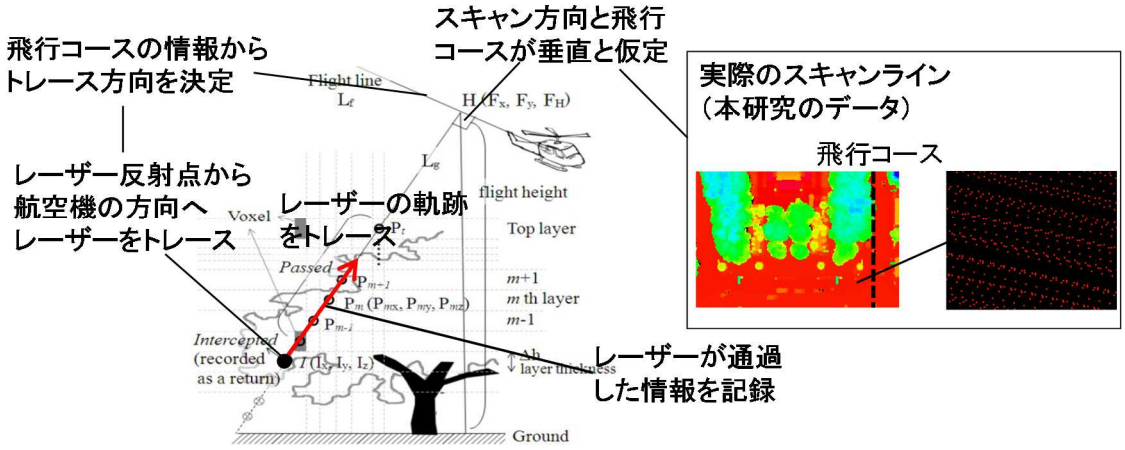


図 2-23　Song et al.[2-61]による PAD の推定方法

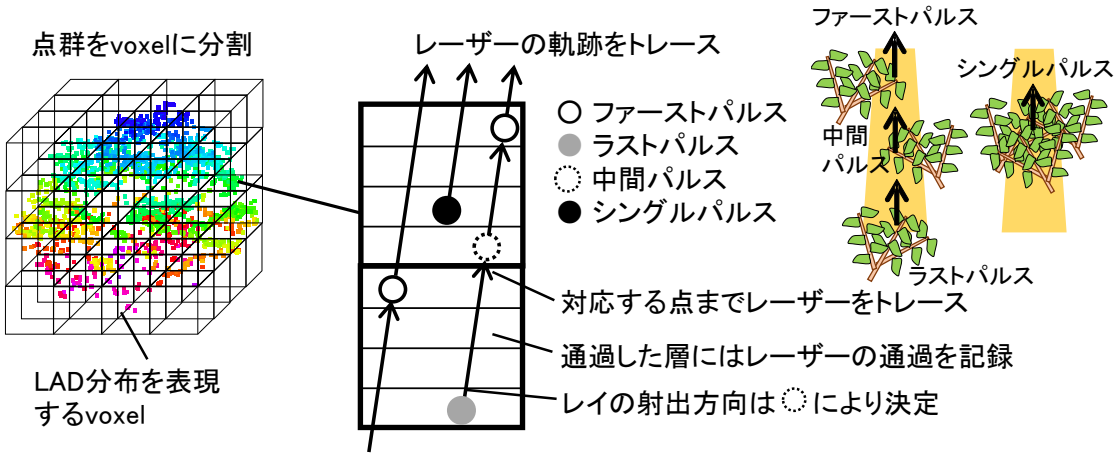


図 2-24　本研究で提案する LAD 分布の推定手法の概念図

を層に分割していないが（式(2-13)において、$N = 1$）、voxel の側面から入射するレーザーに対応するためには層に分ける必要がある。レーザー反射点からトレースを行うことで、正確にレーザーの軌跡を再現できると考えられる。しかしながら、トレースの方向はスキャンラインと飛行ラインが垂直であると仮定して決定している。実際には風などの状況で飛行姿勢が変化するため、この過程は成り立たない。また、Song et al.[2-60]はラストパルスや中間パルスからもトレースを行うと、1 つのレーザーをダブルカウントすることになるためファーストパルスとシングルパルスのみを用いている。上記のようにトレースの方向が実際のレーザーの向きと異なる場合、他のレーザー反射点に当たったときにトレースを中断するという計算を行うことも難しい。

以上から、図 2-19 に示すような既往研究における推定誤差を改善するためには、ラストパルスや中間パルスも含めて、レーザーの遮蔽と通過を正確に再現することができる方法が求められる。

2.5.2　本研究で提案する手法

本研究では、LAD を求める式は Hosoi et al.[2-58]と同様（式(2-13)）のものを用いる。2.5.1 で挙げた課題を解決し、レーザーと葉の接触確率 CF を求めるためのレーザーのトレース方法を提案する。図 2-24 に提案する手法の概念図を示す。はじめに LAD を算出する voxel を層に分割する。式(2-13)の $n_l(k)$は層内の点数である。次に、ラストパルスの点と中間パルスの点から 1 つ前の中間パルスまたはファーストパルスの点までトレースを行い、レーザーが通過した層の $n_p(k)$に 1 を加えていく。1 つのレーザーに対する複数の反射パルスは連続的に記録されるため、1 つ前のパルスをデータから探すことができる。これにより正確な方

向にトレースすることができる。ファーストパルスとシングルパルスの点からは上空へ向けてトレースを行う。ファーストパルスからのトレースの向きは、ファーストパルスの次に記録されたラストパルス、または中間パルスにより決定する。シングルパルスには前後のパルスが存在しないため、ファーストパルスのトレースの方向の平均値を用いる。図 2-25 に既往研究の課題と本研究での改良点をまとめる。提案した手法により、ラストパルス及び中間パルスも含めて正確にレーザーの軌跡をトレースし、樹冠内でのレーザーの遮蔽・通過を再現することができる。航空機の飛行コースやレーザーの発射位置に関する情報も不要である。

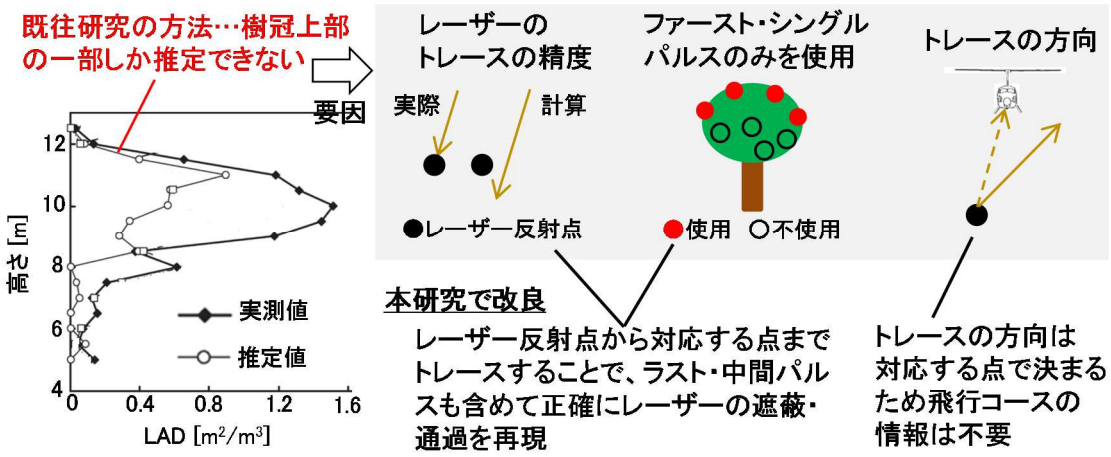


図 2-25　既往研究における課題と本研究での改良点

2.6　検証に使用するデータ

2.6.1　航空機 LiDAR 観測の概要と取得したデータ

2.5 において提案した手法の有用性を検証するための航空機 LiDAR データについて述べる。一般的に都市緑化によく用いられるケヤキやクスノキをはじめ、多くの樹木からなる街路樹や都市公園を有する名古屋の久屋大通を対象地区に選定した。観測には最新のヘリコプター搭載型高分解能 LiDAR 観測システムを用いた（SAKURA（中日本航空））。このシステムの特徴として、1 m² あたり 20 点以上の高密度なデータ取得可能であり、1 つのレーザー内の複数のターゲットの分解能（2.3.4）が 0.5 m である [2-61]ことが挙げられる。特に距離方向の分解能については、従来の測定装置の 2 m から大幅に改善しており、樹冠内の葉群の分布を推定するという本研究の目的に適している。図 2-26 に航空機 LiDAR 観測の飛行コースを示す。表 2-2 には航空機 LiDAR の観測概要を示す。街区スケールでの評価を行うため、また、レーザーの入射条件の違いが樹木の 3 次元情報の推定精度に及ぼす影響を検討するために、久屋大通の両端、隣の大津通、それらを横切るコースの 4 つの飛行コースから観測を行った。高度 350 m から観測を行い、各観測コースの直下において約 20 点/m² となるデータを得た。レーザービーム径は 0.5 mrad であるため地表面でのレーザーのフットプリントの直径は 17.5 cm となる（図 2-27）。使用した観測システムは航空機の直下から片側 30°（航空機の左右合計で 60°）の範囲でスキャンを行うため、1 コースあたりの観測幅は約 400 m である。図 2-28 に取得した航空機 LiDAR データを示す。高密度な観測により、樹冠も多くのレーザー反射点から構成されており、樹冠の形状が認識できる。また、建物の壁面の形状の情報も得られている。

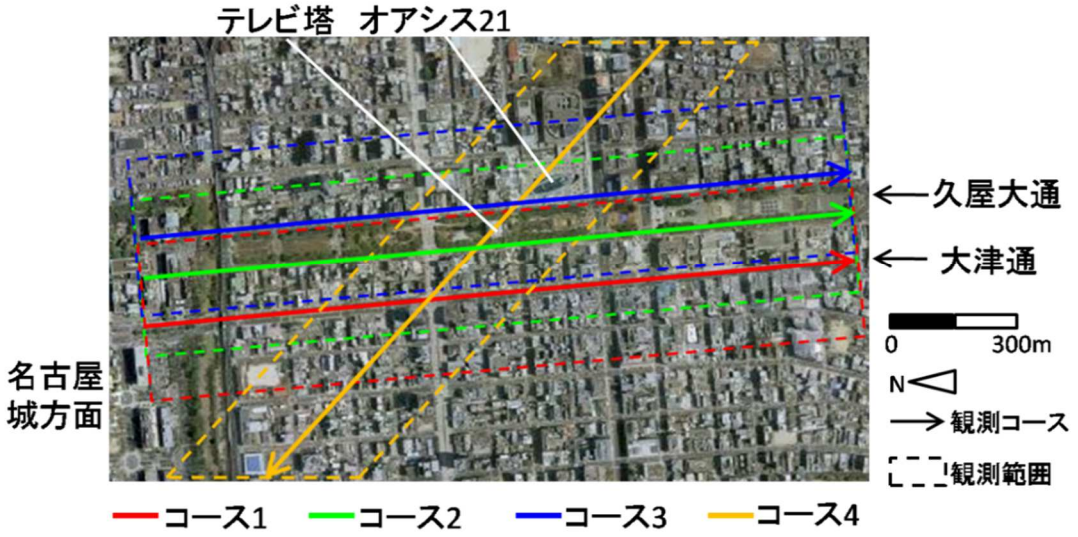


図 2-26　航空機 LiDAR 観測の飛行コースと観測範囲

表 2-2　航空機観測の概要

観測日：2010.9.6	**スキャナ**：LMS-Q560 (RIEGL)
観測システム：SAKURA（中日本航空）	**波長**：1550nm
観測高度：約 350m	**測距精度**：20mm
1 コースの観測幅：400m（航空機の直下から片側 30°）	**レーザービーム径**：0.5mrad
	1 発射パルス当たりのターゲット数：無制限
点密度：20～30 点/m²	**1 発射パルス内のターゲット分解能**：0.5m

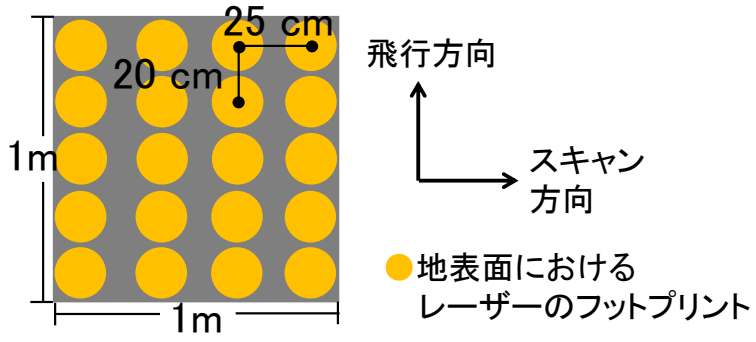


図 2-27　飛行コース直下におけるレーザーの分布

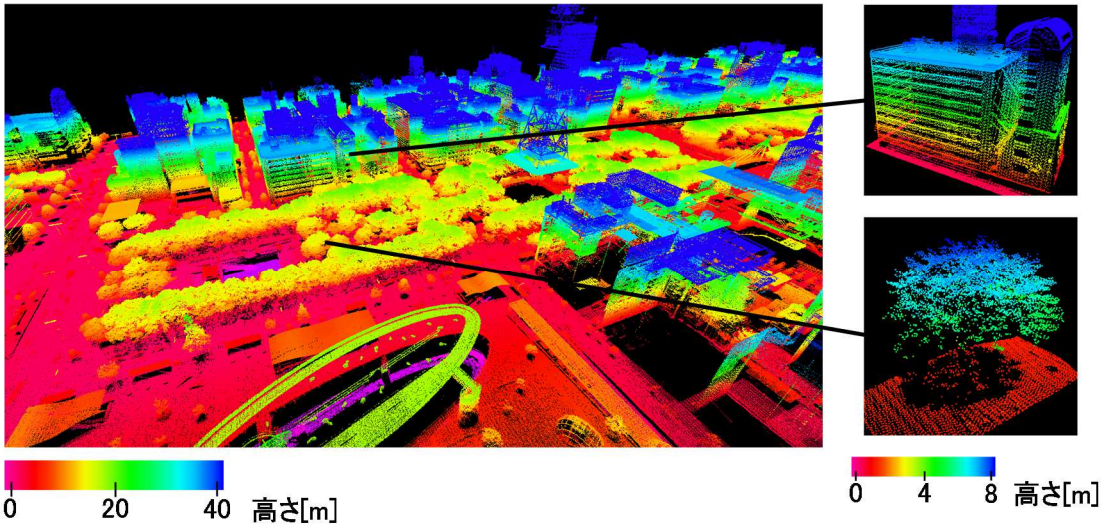


図 2-28　検証に使用した航空機 LiDAR データ

2.6.2　検証対象樹木の選定

2.5 で提案した手法の推定精度を検証するための樹木を、樹冠形状や葉の密度を考慮して選定する。

樹種

樹種を選定するために樹冠内のレーザー反射点密度の鉛直分布を算出した。都市緑化によく用いられ、樹冠形状の特徴が異なるイチョウ、ケヤキ、トウカエデ、クスノキを用いた。樹冠の頂点と地表面の間を均等の厚さで 20 分割し、樹冠内の全ての点数に対する各層の点数の割合を算出した。この割合は反射パルスの種類ごと（ファースト、ラスト、中間、シングル）に算出した。図 2-29 に各樹種の点密度の鉛直分布を示す。各樹種において、10 本の樹木について算出した結果の平均値を示している。どの樹木も入射するレーザーの天頂角が小さい（天頂付近からレーザーが入射する）飛行コースのデータを用いた。また、明らかに生育状態が悪い樹木は除いて、葉が密な樹木も粗な樹木も区別せずに選定した。ケヤキは樹冠上部においてファーストパルスとシングルパルスが大きなピークを持っており、逆円錐型の樹冠形状のため上部に葉が多く分布していることが表れている。また，ラストパルスと中間パルスの分布も樹冠上部に偏っている。卵型のクスノキとトウカエデは樹冠全体に葉が分布するため、ファースト、シングルパルスとラスト、中間パルスの分布が分離している。円錐型のイチョウは樹冠下部に多くの点が分布している。

図 2-14 にも示した通り、イチョウは、円錐型であり外周部に葉郡が分布するため、葉群には航空機からのレーザーが当たりやすい。一方、ケヤキは逆円錐型であり、樹冠上部が広がっており葉が蜜に分布するために樹冠下部にはレーザーが届きにくい。これは定性的には明らかであるが図 2-29 によるとそれぞれの樹種の差が明白である。本研究では、樹冠下部でレーザーが届きにくくなる部分も含めて評価を行うためケヤキを検証対象樹木とする。

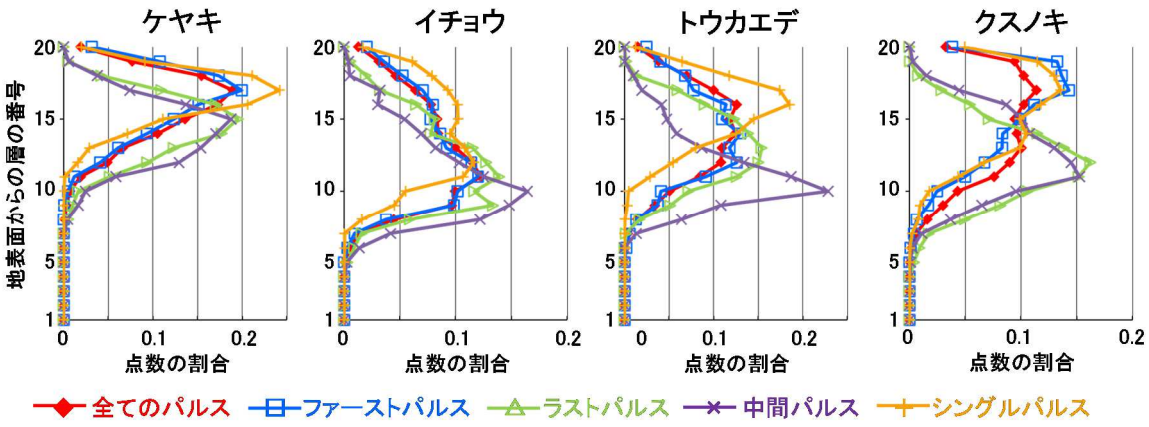


図 2-29　樹種による点密度の鉛直分布の違い

対象とするケヤキの個体

次に、ケヤキの中から検証に用いる個体を選択する。そのために、ケヤキの樹冠内でのレーザー数の減少を算出した。レーザー数の減少とは、レーザーが葉や枝で遮蔽されて樹冠内を進むレーザー全体の数が減少していくことを表す。樹冠の頂点と地表面の間を厚さ 1 m の層に分割し、1 番上の層に入射したレーザー数（N_1）に対する各層に入射したレーザー数（N_i）の割合を算出した（$= N_i / N_1$）。N_1 は次式により算出した。

$$N_1 = N_{cf} + N_{cs} + N_{gs} \qquad (2-14)$$

N_{cf}: 樹冠内のファーストパルスによる点の数, N_{cs}: 樹冠内のシングルパルスによる点の数, N_{gs} : 樹冠下のシングルパルスによる点の数

また，2 層目以降の i 番目の層への入射数 N_i は(2)式のように表すことができる。

$$N_i = N_{i-1} - N_{s,i-1} - N_{l,i-1} \qquad (2-15)$$

N_{i-1} : i-1 番目の層に入射したレーザー数，$N_{s,\,i-1}$: i-1 番目の層に含まれるシングルパルスによる点の数，$N_{l,\,i-1}$: i-1 番目の層に含まれるラストパルスによる点の数

樹種の検討において用いた 10 本に新たに 10 本を加えて解析に用いた。図 2-30 に算出結果を示す。図 2-30 (1)のように葉が密な樹木では、地上部での反射パルスが検知されたレーザーの割合は 0.20 である。また、レーザーの透過率が小さい樹木では樹冠の上部で急激にレーザー数が減少している。図 2-30 (2)のように明らかに葉が少ない樹木では 0.57 である。本研究では葉密度が中間的であり、樹冠長が長いことにより樹冠下部の再現性が問題となる個体を検証対象に選んだ（図 2-30 (3)）。以上のように本研究では、ケヤキの中から平均的な形態の特徴を持つ個体を対象として検証を行う。

図 2-31 に対象とするケヤキに対する航空機からのレーザーの入射条件と航空機 LiDAR データを示す。樹高は 10.5 m、樹冠の直径は 8.5 m であり、単木で存在している。航空機 LiDAR 観測の飛行コース 3 からのレーザーの天頂角が最も小さく 7.5° であり、天頂に近い位置からレーザーが照射される。最も天頂角が大きく点密度が小さいのは、対象樹木が観測幅の端に位置することになるコース 1 であり、天頂角は 26.3° となり、レーザーの間隔もコース 3 に比べて 5 cm 広い。



図 2-30　ケヤキの樹冠内におけるレーザー数の減少

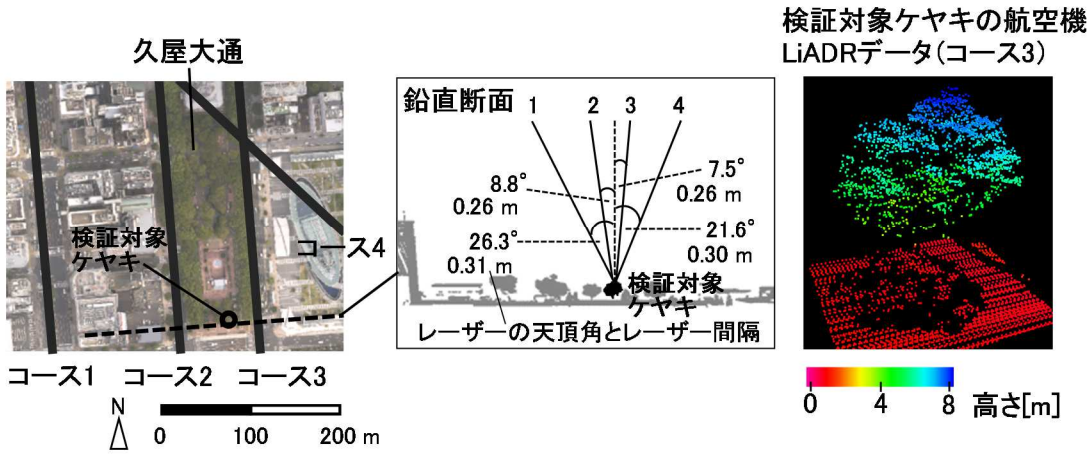


図 2-31　検証対象のケヤキに対する航空機からのレーザーの入射条件と
航空機 LiDAR データ

2.7 まとめ

樹木の環境調整効果の評価に必要な情報を整理し、その中で本研究では熱環境への影響を評価するための情報を整備することの位置づけを示した。熱環境緩和効果を精緻に把握するためには、葉の空間スケールの樹冠形状及び LAD や WAD の分布が必要となるが、実用的に効果を評価するためには葉群の空間スケールの樹冠形状や LAD 分布を整備することが重要である。熱環境の評価には、樹高や枝張りだけでなく、樹冠形状と LAD 分布まで含めた樹木の 3 次元情報が求められる。また、他の環境調整効果を評価するためにも樹木の 3 次元情報が必要となる点からも、本研究で樹木の 3 次元情報の整備方法を扱うことの重要性を示した。

実用的に樹木の 3 次元情報を整備するための方法として、移動するプラットフォームからの観測に注目し、センサやプラットフォームの特徴を整理した。この中から、樹冠内部も含めて高分解能の 3 次元空間情報を取得可能な航空機、特に回転翼に搭載された LiDAR を情報整備のための観測方法として採用した。

次に、航空機 LiDAR により樹木の形態情報の推定を行った既往研究を整理し、LAD 分布を推定するためには、正確なレーザーの軌跡のトレース方法とラストパルスや中間パルスも用いた方法が必要であることを明らかにした。そして、1 つのレーザーに対する複数の反射パルスは連続してデータに記録されることを利用して、ある反射点から対応する反射点までレーザーをトレースすることで、ラストパルスと中間パルスも考慮しながら正確にレーザーの遮蔽・透過を計算することが可能な手法を提案した。

最後に、提案した手法による推定精度を検証するための航空機 LiDAR データを取得し、樹冠形状や葉の密度の特徴を考慮して、検証対象樹木を選定した。本研究では、平均的な形態の特徴をもつケヤキを選定し、検証に用いることにした。次章では、本章で提案した手法の推定精度を検証するための方法について検討する。

引用文献

2-1) N. Lukac, D. Zlaus, S. Seme, B. Zalik and G. Stumberger：Rating of roofs' surfaces regarding their solar potential and suitability for PV systems, based on LiDAR data, Applied Energy 102, PP.803-812, 2013.

2-2) T. R. Tooke, N. C. Coops, J. A. Voogt and M. J. Meitner：Tree structure influences on rooftop-received solar radiation, Landscape and Urban Planning, 102, pp.73-81, 2011.

2-3) J. A. Jakubiec and C. F. Reinhart：A method for predicting city-wide electricity gains from photovoltaic panels based on LiDAR and GIS data combined with hourly Daysim simulations, Solar Energy, 93, pp.127-143, 2013.

2-4) 西川竜二, 宿谷昌則：樹木の日射遮蔽効果の簡易推定法の開発, 日本建築学会計画系論文集, (527), pp.29-35, 2000.

2-5) 熊倉永子, 中大窪千晶, 梅干野 晃: 木漏れ日に着目した単木落葉樹の日射遮蔽に関する数値解析, ランドスケープ研究, 73(5), pp.573-576, 2010

2-6) M. Monshi and T. Saeki：Uber den Lichtfaktor in den Plflanzengesellschaften und seine Bedeutung fur die Soffproduktion, Japanese Journal of Botany, 14, pp.22-52, 1953.

2-7) D. Whitehead, J. C. Grace and M. J.Godfrey：Architectural distribution of foliage in individual Pinus radiata D. Don crowns and the effects of clumping on radiation interception, Tree physiology, 7, pp.135-155, 1990.

2-8) T. Nilson：A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands, Agricultural Meteorology, 8, pp.25-38, 1971.

2-9) H. Sinoquet, J. Stephan, G. Sonohat, P. E. Lauri and P. Monney：Simple equations to estimate light interception by isolated trees from canopy structure features assessment with three-dimensional digitized apple trees, New Phytologist, 175(1), pp.94-106, 2007.

2-10) J. M. Chen and J. Cihlar：Plantcanopy gap-size analysis theory for improving optical measurements of leaf-area index, Applied Optics, 34(27), pp.6211-6222, 1995.

2-11) C. J. Kucharik, J. M. Norman and S. T. Gower：Characterization of radiation regimes in nonrandom forest canopies: theory, measurements, and a simplified modeling approach, Tree Physiology, 19(11), pp.695-706. 1999.

2-12) A. Iio, Y. Kakubari and H. Mizunaga：A three-dimensional light transfer model based on the vertical point-quadrant method and Monte-Carlo simulation in a Faguscrenata forest canopy on Mount Naeba in Japan, Agricultural and Forest Meteorology, 151(4), pp.461-479, 2011.

2-13) H. Sinoquet, G. Sonohat, J. Phattaralerphong and C. Godin：Foliage randomness and light interception in 3-D digitized trees: an analysis from multiscale discretization of the canopy, Plant, Cell & Environment, 28(9), pp.1158-1170. 2005.

2-14) J. M.Chen and T. A. Black：Measuring leaf area index of plant canopies with branch architecture, Agricultural and Forest Meteorology, 57, pp.1-12, 1991.

2-15) G. Talbot and C.Dupraz：Simple models for light competition within agroforestry discontinuous tree stands: are leaf clumsiness and light interception by woody parts relevant factors?, Agroforestry Systems, 84(1), pp.101-116, 2012.

2-16) L. Grant：Diffuse and specular characteristics of leaf reflectance, Remote Sensing of Environment, 22, pp.309-322, 1987.

2-17) H. Kobayashi and H. Iwabuchi：A coupled 1-D atmosphere and 3-D canopy radiative transfer model for canopy reflectance, light environment, and photosynthesis simulation in a heterogeneous landscape, Remote Sensing of Environment, 112, pp.173-185, 2008.

2-18) 神山健二, 大橋征幹, 成田健一：葉面積密度を代表面積とした樹木の抵抗係数に関する風洞実験,

日本建築学会計画系論文集, (578), pp.71-77, 2004.
2-19) P. G. Jarvis：The interpretation of the variations in leaf water potential and s tomatal conductance found in canopies in the field, Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 273(927), pp.593-610, 1976.
2-20) R. Leuning：A critical appraisal of a combined stomatal- photosynthesis model for C3 plants, Plant, Cell & Environment, 18(4), pp.339-355, 1995.
2-21) G. D. Farquhar, S. Caemmerer and J. A. Berry：A biochemical model of photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C_3 Species, Planta, 149, pp.78-90, 1980.
2-22) 平岡久司, 丸山敬, 中村泰人, 桂順治：植物群落内および都市キャノピー内の乱流モデルに関する研究（その 1）乱流モデルの作成, 日本建築学会計画系論文報告集, (406), pp. 1-9, 1989.
2-23) 吉田伸治, 大岡龍三, 持田灯, 富永禎秀, 村上周三：樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温熱環境緩和効果の検討, 日本建築学会環境系論文集, (536), pp.87-94, 2000.
2-24) 半田真理子, 小沢徹三, 飯塚康雄, 井上忠, 前田博, 田代順孝, 有村恒夫, 武田裕：道路緑化樹木の二酸化炭素固定に関する研究, 土木研究所資料, 第 3059 号, 建設省土木研究所道路部緑化研究室, 1992.
2-25) 藤原宣夫, 山岸裕, 村中重仁：都市緑化による CO_2 個定量の算定方法に関する研究, 日本緑化工学会誌, 28(1), pp.26-31, 2002.
2-26) 戸塚績：植物の生産力に基づく各種植物群落のガス吸収量の評価, 国立公害研究所研究報告, 108, pp.19-24, 1987.
2-27) 名取俊樹, 戸塚績：二酸化窒素の短期および長期暴露に伴う植物のガス収着速度を支配する植物側の要因について, 大気汚染学会誌, 15(8), pp.329-333, 1980.
2-28) 三沢彰：沿道空間における環境緑地帯の構造に関する基礎的研究, 千葉大学園芸学部学術報告, 30, pp.87-174, 1982.
2-29) 赤木康宏, 北嶋克寛：GPU による形状生成に基づく樹木アニメーションの高速化, 情報処理学会研究報告, グラフィクスと CAD 研究会報告, 133(1), pp.1-6, 2008.
2-30) 新谷幹夫：コンピュータグラフィックスにおける質感表現, 情報処理学会研究報告, グラフィクスと CAD 研究会報告, 145(10), pp.1-7, 2011.
2-31) 丸山恭扇, 中前栄八郎, 多田村克己：簡易 3D 樹木モデルと天空光を考慮したレンダリング, グラフィックスと CAD 研究報告, 99(19),55-60, 1999
2-32) 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(4), pp.394-397, 2005.
2-33) T. Asawa, A. Hoyano and K. Nakaohkubo：Thermal design tool for outdoor spaces based on heat balance simulation using a 3D-CAD system, Building and Environment, 43, pp.2112-2123, 2008.
2-34) 浅輪貴史, 梅干野, 清水克哉, 久保田光政：大型重量計を用いた単木樹木の蒸散量の計測法とその精度確認, 日本緑化工学会誌, 38(1), pp.67-72, 2012.
2-35) 灘井章嗣, 浦塚清峰, 梅原俊彦, 小林達治, 松岡建志, 佐竹誠：サブメータ空間分解能を有する航空機搭載 X-band 合成開口レーダの開発, 電子情報通信学会技術報告集, 109(13), pp.37-42, 2009.
2-36) 長谷川秀樹, 後藤健一, 岡田祐, 大石昇, 土田正芳, 中野陽介, 岩本雅史, 原　芳久：10cm 級分解能合成開口レーダ装置の開発及び画像取得結果, 電子情報通信学会技術報告集, 108(76), pp.25-28, 2008.
2-37) 浅井和, 杉本伸夫, 沢田治雄, 下田陽久, 三枝信子, 小熊宏之, 鷹尾肇, 平田泰雅, 水谷耕平, 石井昌憲, 佐藤篤, 西澤智明：ISS-日本実験モジュール暴露部搭載・植生ライダー（i-LOVE）, 第 51 回日本リモートセンシング学会学術講演会論文集, pp.65-66, 2011.
2-38) (社)日本公園緑地協会公園緑地研究委員会編, 造園施工管理技術編,（社）日本公園緑地協会, 2005.
2-39) 「熱環境マップ」, 大阪府

参考 URL　http://www.pref.osaka.lg.jp/chikyukankyo/jigyotoppage/heatmap.html
(2013.12.14 参照)

2-40) E. Næsset and T. Økland：Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve, Remote Sensing of Environment, 79, pp.105-115, 2002.

2-41) 大政謙次, 秋山幸秀, 石神靖弘, 吉見健司 ： ヘリコプター搭載の高空間分解能 Scanning Lidar システムによる樹冠高の 3 次元リモートセンシング, 日本リモートセンシング学会誌, 20(4), pp.34-46, 2000.

2-42) A. Persson, J. Holmgren and U. Soderman：Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 68(9), pp.925-932, 2002.

2-43) S. Popescu and K. Zhao：A voxel-based lidar method for estimating crown base height for deciduous and pine trees, Remote Sensing of Environment, 112, pp.767-781, 2008.

2-44) J. Holmgren and A. Persson: Identifying species of individual trees using airborne laser scanner, Remote Sensing of Environment, 90, pp.415-423, 2004.

2-45) D. Riaño, F. Valladares, S. Condés and E. Chuvieco：Estimation of leaf area index and covered ground from airborne laser scanner (Lidar) in two contrasting forests, Agricultural and Forest Meteorology, 124, pp.269-275, 2004.

2-46) A. Farida, D.C. Goodrich, R. Bryant and S. Sorooshian：Using airborne lidar to predict Leaf Area Index in cottonwood trees and refine riparian water-use estimates, Journal of Arid Environments, 72, pp.1-15, 2008.

2-47) J. L. R. Jensen, K. S. Humes, L. A. Vierling and A. T. Hudak：Discrete return lidar-based prediction of leaf area index in two conifer forests, Remote Sensing of Environment, 112, pp.3947-3957, 2008.

2-48) K. Zhao and S. Popescu：Lidar-based mapping of leaf area index and its use for validating GLOBCARBON satellite LAI product in a temperate forest of the southern USA, Remote Sensing of Environment, 113, p.1628-1645, 2009.

2-49) T. Sasaki, J. Imanishi, K. Ioki, Y. Morimoto and K. Kitada：Estimation of leaf area index and canopy openness in broadleaved forest using an airborne laser scanner in comparison with high-resolution near-infrared digital photography, Landscape and Ecological Engineering, 4, pp.47-55, 2008.

2-50) 佐藤浩, 小荒井衛, 江田敏幸, 伊藤麻子 ： 新宿御苑における航空レーザ測量データを用いた樹林の葉面積指数(LAI)のマッピング, 写真測量とリモートセンシング, 47(3), pp.37-47, 2008.

2-51) S. Solberg, A. Brunner, K. H. Hanssen, H. Lange, E. Næsset, M. Rautiainen, and P. Stenberg：Mapping LAI in a Norway spruce forest using airborne laser scanning, Remote Sensing of Environment, 113, pp.2317-2327, 2009.

2-52) L. Korhonen, I. Korpela, J. Heiskanen, and M. Maltamo：Airborne discrete-return LIDAR data in the estimation of vertical canopy cover, angular canopy closure and leaf area index, Remote Sensing of Environment, 115, pp.1065-1080, 2011.

2-53) F. Morsdorf, B. Kötz, E. Meier, K. I. Itten and B. Allgöwer：Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap fraction, Remote Sensing of Environment, 104, pp.50-61, 2006.

2-54) 伊藤拓弥, 松英恵吾, 内藤健司:航空機 LiDAR による樹冠の再現性, 日本森林学会誌, 91(5), pp.326-334, 2009.

2-55) A. Kato, M. Moskal, P. Schiess, E. Swanson, D. Calhoun and W. Stuetzle：Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne lidrar data, Remote Sensing of Environment, 113, pp.1148-1162, 2009.

2-56) Y. Wang, H. Weinacker and B. Koch：A LiDAR point cloud based procedure for vertical canopy structure analysis and 3D single tree modeling in forest, Sensors, 8, pp.3938-3951, 2008.
2-57) T. Sasaki, J. Imanishi, W. Fukui, F. Tokunaga and Y. Morimoto：Fine-scale replication and quantitative assessment of forest vertical structure using LiDAR for forest avian habitat characterization, Forest Science and Technology, 8(3), pp.145-153, 2012.
2-58) F. Hosoi, Y. Nakai and K. Omasa：Estimation and error analysis of woody canopy leaf area density profiles using 3-D airborne and ground-based scanning lidar remote sensing techniques, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48(5), pp.2215-2223, 2010.
2-59) F. Hosoi and K. Omasa：Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44(12), pp.3610-3618, 2006.
2-60) Y. Song, M. Maki, J. Imanishi and Y. Morimoto：Voxel-based estimation of plant area density from airborne laser scanner data, Proceedings of the ISPRS Workshop Laser Scanning, Calgary, Canada, XXXVIII-5/W12, pp.209-212, 2011.
2-61) 千田良道, 山下悟, 村手直明, 都竹正志：ヘリコプター搭載型波形記録式レーザー計測システムによる高品質データ, 日本写真測量学会平成 19 年度秋季学術講演会発表論文集, pp.199-202, 2007.

第 3 章

地上型 LiDAR による精度検証方法

3.1 はじめに

本章では、前章で提案した手法による LAD 分布の推定精度を検証する方法について検討する。本研究では、樹種・剪定・生育状況などにより異なる個々の樹木の樹冠形状や葉の密度が熱環境に及ぼす影響を評価することを目標とするため、推定した LAD 分布の精度を高精度に検証する必要がある。また、樹木の 3 次元情報の推定に求められる葉群の空間スケールに対して、航空機 LiDAR により得ることができる情報の空間分解能を明らかにするためには、複数の空間分解能における検証が求められる。既往研究においては、航空機や衛星による樹木の形態情報の推定精度を検証するために、葉の刈り取りによる葉面積の実測や樹冠下における光の測定など様々な方法が用いられてきた。刈り取りによる実測は、高精度な実測値を得ることができるが、航空機 LiDAR との位置のずれが生じることや様々な空間分解能の情報を得ることは難しいという問題がある。また、光の測定は容易に実施することができるため多くの樹木を測定することが可能であるが、葉群の分布を捉えることは難しい。そこで本研究では、検証のための測定方法として、地上から高密度にレーザーを照射することで高精度に対象物の 3 次元空間情報を取得可能な地上型 LiDAR に着目する。

まず、地上における樹木の形態の測定方法を整理し、本研究では検証のために地上型 LiDAR を用いることの位置づけ示す。次に、既往研究を概観し、地上型 LiDAR を用いて葉面積密度分布を算出するための課題を明らかにする。そして、刈り取り可能な樹木を用いることで課題について検討し、航空機 LiDAR による推定精度を検証する方法を示す。その結果から、第 2 章において選定した検証対象のケヤキの測定を行い、検証用のデータを整備する。

3.2　検証のための測定方法の選定

表 3-1 に航空機や衛星から推定した樹木の形態情報の精度を検証するための地上における実測方法の特徴をまとめる。

刈り取り

葉を刈り取って葉面積を測定することで、正確な葉面積の情報を得ることができる。短所としては、詳細な空間スケールの LAD 分布になるほど測定が難しくなることが挙げられる。Hosoi et al.[3-1)]が地上型 LiDAR により LAD 分布を推定する手法（voxel-based canopy profiling (VCP) method（図 2-22)）を提案した際には、樹高 0.6～1.5 m の樹木で検証を行った。層ごとに葉を刈り取り地上型 LiDAR による推定値と比較しているが、層が細かい場合には、実測と LiDAR 計測のずれの影響で、見かけ上推定誤差が生じると報告している。全ての層を統合して樹木全体の葉面積を算出した場合（すなわち、LAI を算出した場合）に最も誤差が小さくなっている。同様に、航空機からの観測データと位置のずれがないように、葉群の空間スケールの LAD 分布を実測することは困難であると考えられる。

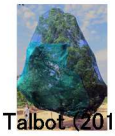
リタートラップ

樹冠から落下してくる葉の量を測定する方法である。落葉樹の場合は全葉面積を測定することができる。樹木を傷つけることなく正確な量を測定できるが、葉群の分布を測定することは難しい。

ポイントコドラート法

ポイントコドラート法[3-2) 3-3)]は植生にプローブを挿入し、葉とプローブの接触確率により式(2-13)から LAD を測定する方法である。プローブが葉に当たったとしてもプローブの差

表 3-1　航空機や衛星から推定した樹木の形態情報の精度を検証する測定方法の特徴

	刈り取り	リタートラップ	ポイントコドラート法	地上型LiDAR	樹冠下での光測定
		 Talbot (2012)	 Ito (2011)		
長所	・正確なLAD分布を取得可能	・落葉樹の総葉面積の取得に適する	・非破壊の方法で樹冠全域のLAD分布を取得	・簡単な測定で3次元情報を取得 ・航空機データとのずれが小さい	・最も測定が簡単 ・研究の蓄積が多い
短所	・葉群スケールの測定は実施が困難 ・航空機データとの位置がずれる	・密度分布の情報は得られない	・葉群スケールの測定は実施が困難 ・航空機データとの位置がずれる	・レーザーが届く場所のみの情報取得 ・推定方法が確立されていない	・3次元的な密度分布の情報を得ることは困難

込みを続けることで、レーザーのように遮蔽されずにさらに奥の情報も得ることができる。プローブの挿入回数を増やすほど高精度な情報を得ることができ、非破壊的な方法では最も高精度な情報を取得可能である。しかしながら、都市緑化に用いられるサイズの樹木を葉群の空間スケールに分割してプローブを挿入していく測定は実施が困難である。刈り取りと同様に航空機データとの位置のずれも問題となる。

地上型 LiDAR

地上から高密度にレーザーを照射して対象物の 3 次元空間情報を取得する方法である。原理は航空機 LiDAR と同じであるが、より高分解能・高精度である。近年では、装置性能の発達により 10 m 程度の測定距離で数 mm の高空間分解能のデータを取得することができる。Hosoi et al.[3-1)]の手法のように LAD 分布の推定手法が提案されているが、原理的にレーザーが届かない部分の情報は得ることができないため、測定方法や推定手法は研究が進められている段階である。しかしながら、航空機データとの位置合わせが容易で、樹冠のどの部位であっても位置合わせの誤差の範囲内で情報を得ることができる。また、刈り取りや寸法の測定に比べて測定の実施が容易である。

樹冠下での光測定

葉が一様に分布するキャノピーでは、樹冠の空隙の割合と葉面積の間には式(2-4)のような関係があるため、空隙を通過してきたエネルギーを測定することで葉面積を推定することができる（Gap fraction 法)。この測定装置である LAI-2000 (LI-COR)[3-4)] は多くの研究で検証に用いられている。同様の原理の測定を魚眼カメラを用いて行う方法も研究されている [3-5) 3-6)]。このように葉の分布を一様と仮定して推定された LAI は effective LAI (LAIe) と呼ばれ、LAIe = μ･LAI（μ：クランピング係数）と言う関係がある。実際には LAI-2000 の測定原理上、得られた結果はシュートの空間スケールよりも大きいクランピングの補正が含まれていると指摘されている [3-7)]。空隙の大きさの分布からクランピング係数（針葉樹の場合はシュートの空間スケールよりも大きな）を推定する手法 [3-8) 3-9)]やデジタルカメラと LAI-2000 により LAI を推定する手法 [3-10)]も提案されている。以上のような方法はこれまで多くの研究が蓄積されており、測定が容易であるという長所があるが、3 次元の葉群の分布の情報を得ることは難しい。

本研究では、比較的簡単な測定により LAD 分布を取得でき、航空機 LiDAR データとの位置のずれも小さくすることができる地上型 LiDAR を検証に用いる。地上型 LiDAR による LAD 分布の推定手法や推定のための測定方法は、現在研究段階にある。そこで本章では、地上型 LiDAR を本研究での検証に適用するための検討を行う。

3.3　地上型 LiDAR により LAD 分布を算出するための課題と本研究での検討方法

3.3.1　既往研究における LAD 分布の算出手法とその改良点

地上型 LiDAR は対象物の 3 次元空間情報を高分解能で取得可能であるため、森林における地上調査などに用いられてきた。近年では、数 mm の精度でレーザーが反射した点の位置を特定することができ、樹高や胸高直径の推定[3-11)][3-12)]だけでなく、数 mm の空間スケールで梢端部の検出能力を検証した研究[3-13)]や葉やシュートの形状を再現した樹木の形態モデルの生成[3-14)~3-16)]が行われている。LAD 分布の推定手法としては、各層で gap fraction 法を用いる Takeda et al.[3-17)]の手法や、voxel 内の点数と voxel の手前でのレーザーの遮蔽の度合いから voxel 内の contact frequency (CF)（図 2-21）を求める手法[3-18)]が提案されている。しかしながら、small voxel を用いてレーザーの軌跡をトレースし voxel 内の各層の CF を求める Hosoi et al.の VCP method（図 2-22）[3-1)]が最も高精度な手法と考えられる。

<u>既往研究の</u>手法<u>の詳細</u>

VCP method についてより詳しく示す。2 章で述べたように各 voxel の LAD は以下の式で算出される。

$$LAD = \frac{1}{\Delta H} \cdot \frac{\cos(\theta)}{G(\theta)} \sum_{k=1}^{N} \frac{n_i(k)}{n_i(k) + n_p(k)} \qquad (3-1)$$

ΔH: voxel の高さ、θ: レーザーの天頂角、$G(\theta)$：レーザーに垂直な平面への単位面積の葉の投影面積（葉面の単位法線ベクトルとレーザー方向の単位ベクトルの内積、各 voxel の平均的な葉の傾斜角と入射レーザーの平均的な天頂角を用いて計算される)、N: voxel 内の層の数、$n_i(k)$：k 層で遮蔽されたレーザーの数、$n_p(k)$：k 層を通過したレーザーの数

G はレーザーの天頂角のみの関数となっているが、レーザーの方向に垂直な平面への単位面積の葉の投影面積は、正確に表すとレーザーの方位角も含まれる（式(3-2)）。

$$G(\theta, \varphi) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} g(\theta_L) g'(\varphi_L) \left| \boldsymbol{n}_B \cdot \boldsymbol{n}_L \right| d\theta_L d\varphi_L \qquad (3-2)$$

φ: レーザーの方向の天頂角、θ_L: 葉の傾斜角（葉面の法線ベクトルの天頂角)、φ_L: 葉面の法線ベクトルの方位角、g: 葉の傾斜角の確率分布関数、g': 葉の方位角の確率分布関数、$\boldsymbol{n}_B$: レーザーの方向の単位ベクトル、$\boldsymbol{n}_L$: 葉面の単位法線ベクトル

樹冠における放射の消散・散乱を扱う場合には葉の方位角は一様と仮定されることが多

い[3-19]。Hosoi et al.もこの仮定を採用している。すなわち、葉の方位角の確率は $d\varphi_L/2\pi$ となり、式(3-2)は次のようになる。

$$G(\theta,\varphi)=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2} g(\theta_L)\left|\boldsymbol{n}_B\cdot\boldsymbol{n}_L\right| d\theta_L d\varphi_L \qquad (3-2)$$

このうち φ_L に関する積分を $S(\theta, \theta_L, \varphi)$ とおく。絶対値の中の内積が正と不の場合に分けて積分を実行すると、$S(\theta, \theta_L, \varphi)$ は式(3-3)になる。

$$S(\theta,\theta_L,\varphi)$$

$$=\begin{cases} cos\theta cos\theta_L & \theta \leqq \pi/2-\theta_L \text{の場合} \\ cos\theta cos\theta_L\left(1+\dfrac{2(\tan x-x)}{\pi}\right), x=cos^{-1}(cot\theta cot\theta_L) & \theta \leqq \pi/2-\theta_L \text{の場合} \end{cases} \qquad (3-3)$$

このようにレーザーの方位角には依存しなくなり、G はレーザーの天頂角と、葉の傾斜角の確率分布を用いて表される（式(3-4)）。

$$G(\theta)=\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi/2} g(\theta_L)S(\theta,\theta_L)\,d\theta_L \qquad (3-4)$$

Hosoi et al.は地上型 LiDAR データから葉の傾斜角を読み取り、5°刻みの確率を与えている（式(3-5)）。

$$G(\theta)=\sum_{q=1}^{T_q} g(q)S(\theta,\theta_L(q)) \qquad (3-5)$$

q: 傾斜角のクラス番号（5°刻みの場合は 1～18）、Tq: クラスの数（5°刻みの場合は 18）、$g(q)$：各クラスの確率（合計は 1）、$\theta_L(q)$：各クラスの代表傾斜角

既往研究の手法の課題

プローブを用いるポイントコドラート法とは異なり、地上型 LiDAR ではレーザーが葉に遮られるとそれより奥の情報を得ることはできない。そこで、レーザーが届かない領域を減らすために、Hosoi et al.は複数の測定地点から取得したデータを統合して用いることが有効であるとしている[3-1) 3-20]。統合しているという特徴から、本研究ではこの手法を VCP method ではなく以下では「統合法」と呼ぶ。統合法では、測定時に風により枝が動くと、複数の測定地点のデータが重ならない（図 3-1）。この場合は small voxel のサイズを越えて



図 3-1　風の影響による 2 つの測定地点の地上型 LiDAR データのずれ

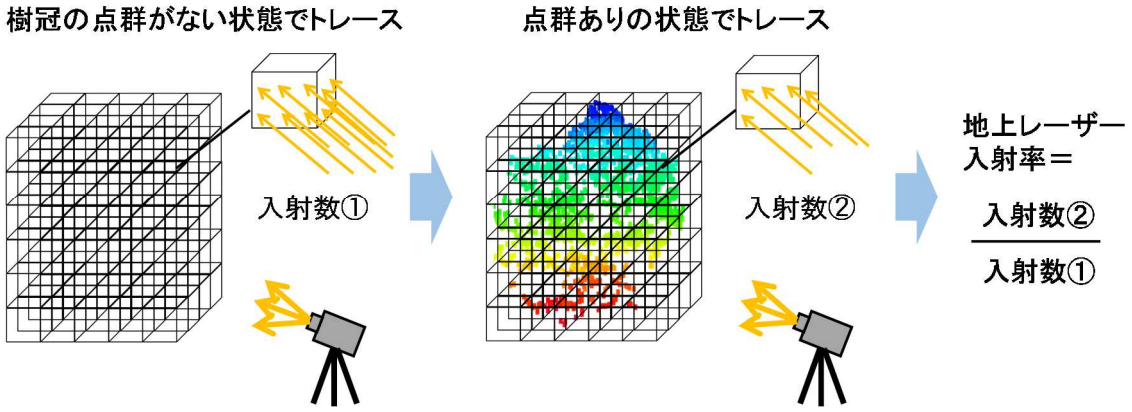


図 3-2　地上レーザー入射率

ずれが生じるため、式(3-1)の $n_i(k)$が増加し、葉面積が過大推定される。また、地上型 LiDAR による対象物までの距離の測定精度には数 mm の誤差が含まれる。これは s-voxel のサイズと同程度または大きい。さらに、枝は動かない場合であっても、葉は弱い風でも動きやすい。これらのことから、弱風時に測定を行ったとしても、葉面積が過大推定される可能性がある。

本研究での改良点

そこで本研究では、上記の誤差要因の影響を受けない推定手法として、各 voxel について最もレーザーの入射条件の良い 1 地点のデータを選択して用いる手法を提案する。この手法を「選択法」と呼ぶ。これは、レーザーの軌跡をトレースして式(3-1)により LAD を算出する点は既往研究と同様であるが、複数の測定地点のデータの利用方法が異なる。1 地点の選択にはレーザー入射率 [3-18) 3-21)]を用いた。レーザー入射率の概念図を図 3-2 に示す。レーザー入射率は Na/Nt で表され、Na は voxel に入射するレーザー数、Nt は voxel とレーザ

一発射位置の間に葉や枝などの遮蔽物が存在しないと仮定したときに、voxel に入射するレーザー数である。測定地点ごとに各 voxel の LAD とレーザー入射率を求めた。そして各 voxel について、レーザー入射率が最も大きい測定地点の LAD を選択した。

3.3.2　検討項目とその確認方法

選択法による LAD の算出精度を明らかにするために、葉の刈り取りが可能な小規模な樹木を用いて、選択法による算出値と刈り取りによる葉面積の実測値の比較を行う。すなわち、2 章で選定した検証対象樹木において選択法の推定精度を明らかにすることは難しいため、小規模な樹木で選択法の精度を確認した上で、航空機 LiDAR の検証に用いる（図 3-3）。3.4, 3.5 において、小規模な樹木を用いて以下の項目①～④について確認する。それを踏まえて、2 章で選定したケヤキを対象として地上型 LiDAR による測定を行う(3.6)。このデータを用いた航空機 LiDAR の精度検証を 4 章において行う。

① 統合法と選択法の比較

はじめに、弱風時における統合法の推定精度を示した上で、選択法の有効性について検討する。弱風条件は、安定した気圧配置の朝方などでも可能であるが、本研究ではより検証に適した条件を作るため、対象樹木をレーザーが透過するシートで覆った状態で地上型 LiDAR により複数の地点から測定を行う。統合法と選択法により推定した葉面積を、刈り取りで得た葉面積の実測値と比較することで精度を検証する。

統合法と選択法の違いが生じるのは式(3-1)の Σ の項である。そのため、統合法と選択法の比較を行うためには、葉の傾き（式(3-1) $G(\theta)$に影響）が適切に設定されていなければならない。そこで、統合法と選択法を比較する前に、葉の傾きの設定について検討する。葉の

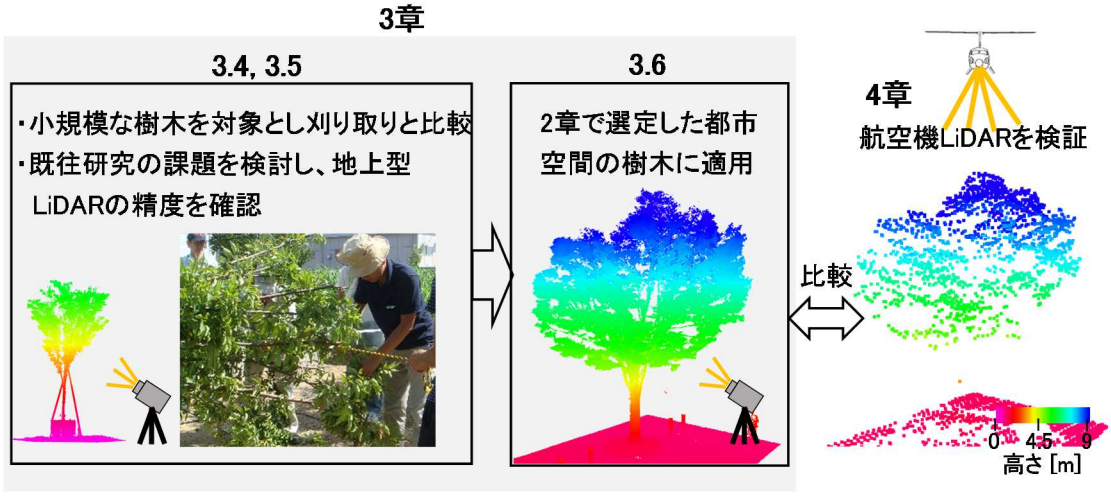


図 3-3　航空機 LiDAR による推定精度を地上型 LiDAR により検証するフレーム

傾きとは葉面の法線の方位角と天頂角で与えられる。Hosoi et al.[3-1) 3-20)]は、葉の方位角はどの角度も等しい頻度で出現する（一様分布）としている。樹冠全体では一様分布に近いと考えられるが、方位別に指向性があることが指摘されており[3-22)]、LAD 分布の推定においては問題になる可能性がある。また、Hosoi et al.[3-1) 3-20)]は、葉の傾斜角には頻度分布を与えているが、樹冠全体で同じ分布としている。生育状況などにより、高さごとに分布の特徴が異なる可能性がある。そこで、葉の方位角と傾斜角を実測することで、実際の分布の特徴を踏まえた角度の設定を行った上で、統合法と選択法を比較する。

②選択法による推定誤差の分析

選択法により、1 つの voxel に 1 方向から入射するレーザーを使うと、voxel 内の葉の配置によって、葉面積を過大推定する場合（図 3-4(1)）と過小推定する場合（図 3-4(3)）がある。実際には、図 3-4(1)のように空隙を埋めるような葉の配置になるよりも、クランピングと言われるように、ランダム分布（図 3-4(2)）に比べて葉が重なりやすい[3-23)]（図 3-4(3)）。そのため、葉の密度が大きくなると voxel 内のスキャナに近い側で多くのレーザーが遮られ、図 3-4(3)のような状況が起こりやすくなり、過小推定になる確率が高くなる。また、樹冠全体でも同様のことが言える。樹冠内の葉の分布を様々な角度から見ると、角度によってランダム分布との差は変化するが、図 3-4(1)よりも図 3-4(3)の分布に近い傾向を示すとされている[3-24)]。そのため、樹冠下部でレーザーが遮られ、上部においてレーザーの入射数が減少すると過小推定になる確率が高くなる。そこで、推定誤差とレーザー入射率、刈り取りによる LAD の関係を分析し、推定誤差が理論通りのものであるか確認する。

③選択法が適用できる風の条件

風の影響により 1 つの voxel の領域を越えて図 3-1 に示すように枝のずれが生じると、選択法も適用できない。そこで、風速と枝の揺れ方の関係を分析することで選択法が適用で

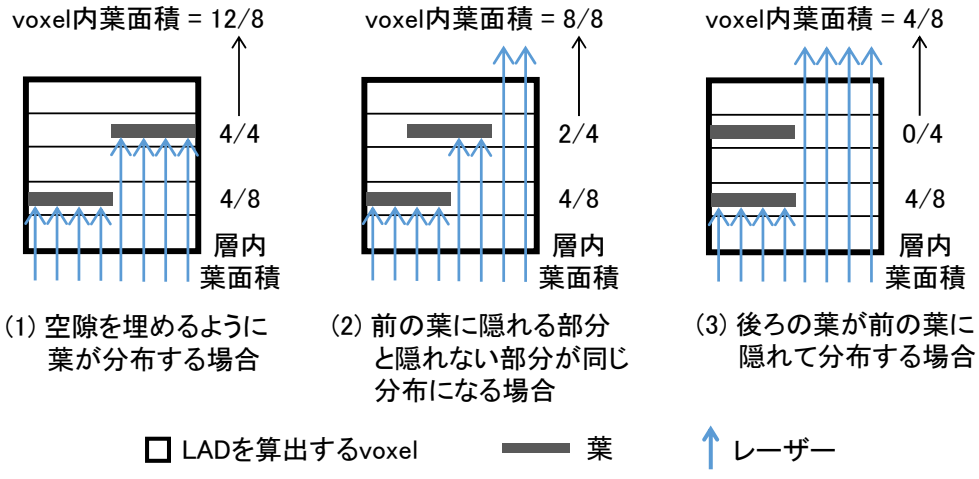


図 3-4　voxel 内の葉の配置と選択法により推定される葉面積の関係

きる風速の範囲を求める。シートがない状態で①と同様に複数地点から地上型 LiDAR による測定を行い、同時に風速も測定する。各測定地点のデータ間の枝のずれと風速の関係を調べる。

④地上型 LiDAR を航空機 LiDAR の検証に用いるための検証項目

①～③は地上型 LiDAR による推定精度の問題であったが、本研究での地上型 LiDAR は航空機 LiDAR との比較用である。航空機 LiDAR データと比較するための課題として次の 3 点が挙げられる。図 3-5 にそれらの模式図をまとめる。

voxel サイズ

航空機 LiDAR により得られる情報の空間スケールを検証するためには、複数の voxel サイズで検証用のデータを取得する必要がある。voxel サイズが小さい場合は、各 voxel において最適な測定地点のデータを選択することができる（選択には図 3-2 のレーザー入射率を用いる）ため、より高精度な情報を取得可能である（図 3-5(1)）。そこで、voxel サイズを変化させた場合の推定精度への影響を検証する。

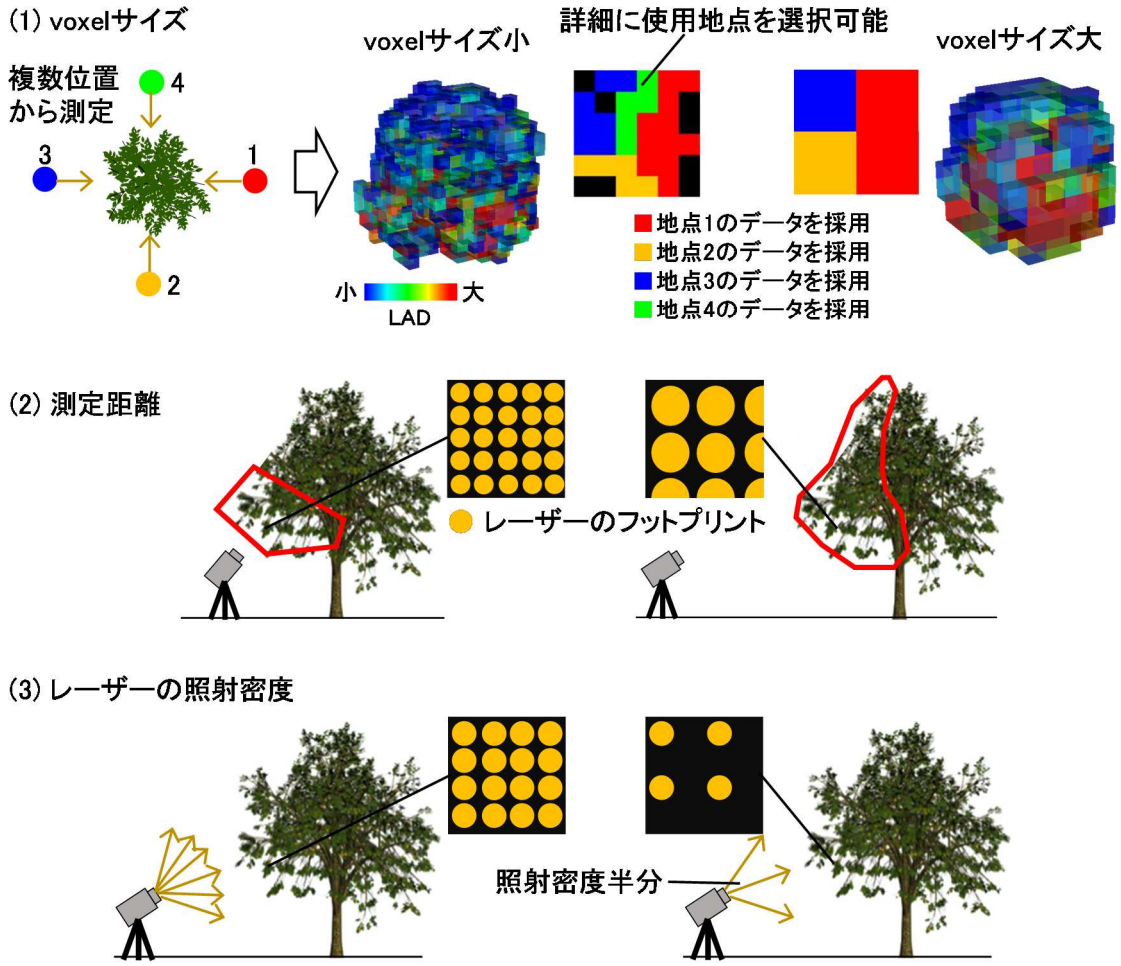


図 3-5　地上型 LiDAR を航空機 LiDAR の検証に使用するための検討項目

測定距離

樹冠形状と測定距離に応じてレーザーが届きやすい範囲が異なる（図 3-5(2)）。対象樹木に合わせて可能な限り樹冠全体にレーザーが照射されるようにする必要がある。距離が遠くなると単位面積を通過するレーザーの数が減少するため、LAD の推定精度が低下する。そこで、距離を変化させた場合の推定精度への影響を検証する。

レーザーの照射密度

風の影響により樹木が揺れることで、航空機の観測時と地上からの測定時でずれが生じてはならない。地上型 LiDAR による測定も弱風の日に行ったとしても、可能な限り短い時間で測定を終えることが望ましい。測定時間にはレーザーの照射密度が関係する（図 3-5(3)）。高密度にレーザーを照射することで高精度な情報が得られるが、測定には時間がかかる。密度が低下するとレーザーのフットプリントで覆われる面積が小さくなるため、推定精度が低下する。そこで、レーザーの照射密度を変化させた場合の推定精度への影響を検証する。

①～④の検証の流れ（図 3-3 における 3 章 3.4, 3.5 の中身）を図 3-6 に示す。はじめに、検証において葉の傾きの設定による誤差が生じないように、実測結果をもとに葉の傾きの設定方法を検討する。そして、レーザーの入射数が少ないことの影響が生じないよう、高精度な推定ができると考えられる近距離から高密度な測定データを用いることで、統合法と選択法の比較を行う。次に選択法の適用範囲を検討する。ここでは、(1) 選択法が適用できる風の条件、(2) voxel サイズが推定精度に及ぼす影響、(3) 測定距離やレーザーの照射密度が推定精度に及ぼす影響について検討する。

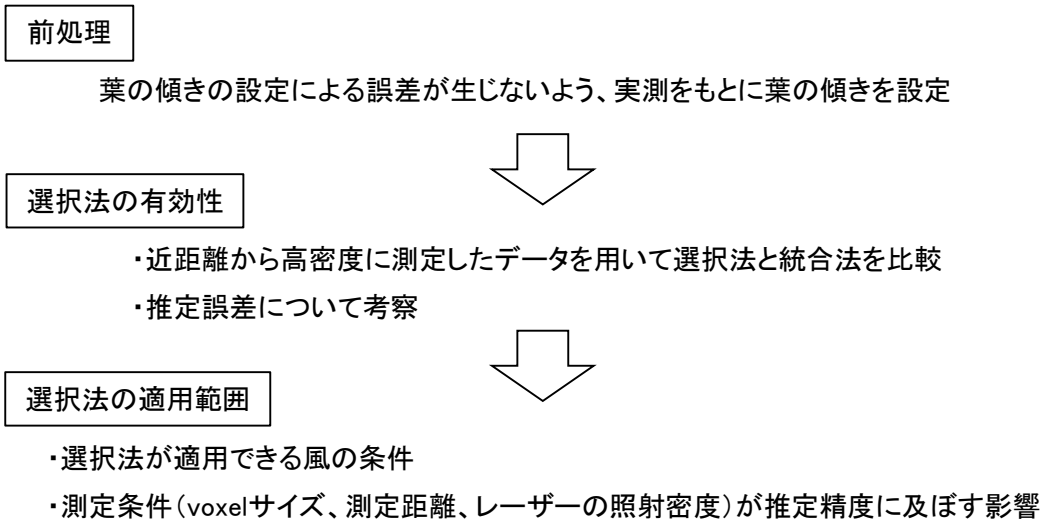


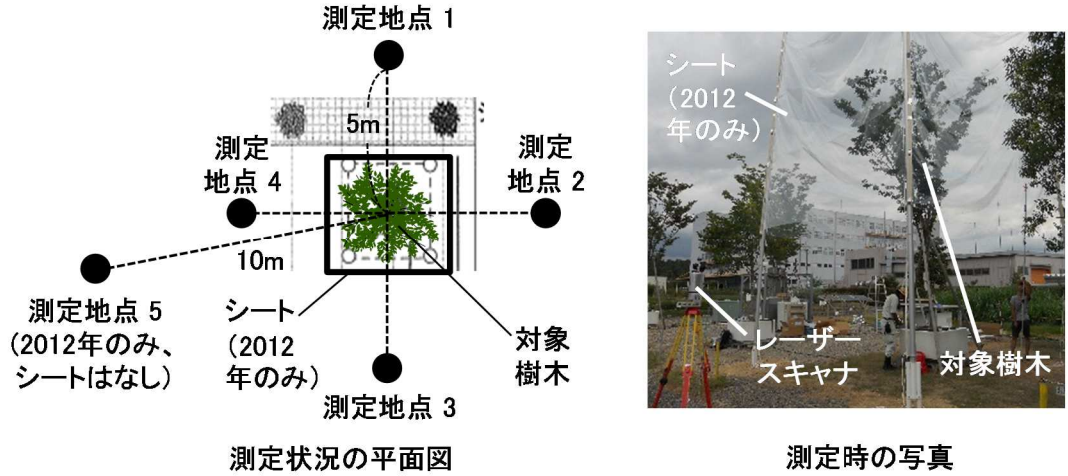
図 3-6　地上型 LiDAR の精度検証のフロー

3.4　解析に使用したデータ

3.4.1　地上型 LiDAR による測定

図 3-7 に対象樹木の写真と地上型 LiDAR による測定方法を示す。2 章で選定した航空機 LiDAR の検証対象樹木と同様にケヤキを選択し、樹高 6 m の個体を対象とした。この樹木は一般的な都市の樹木と比較すると小さいが、本研究は一般的なサイズの樹木における航空機 LiDAR の精度検証を目的として、選択法と統合法の精度を検証するために刈り取りによる精度検証を行うことができる規模の樹木として対象樹木を選定した。地上型 LiDAR を用いた推定において理想的な条件である弱風時であっても、既往研究の統合法では誤差が生じるという仮定のもと、選択法を提案した。そこで、弱風時において統合法と選択法を比較するために、対象樹木をレーザーが透過するシート（フッ素樹脂フィルム）で覆い、樹木の周囲 4 地点（図 3-7）から地上型 LiDAR による測定を行った。レーザーの波長帯におけるシートの透過率は 95.6%である。また、風速と枝の揺れ方の関係を分析するために、シートがない状態でも同様に測定を行った。シートを設置した測定は 2012 年 8 月 29 日に、シートがない状態での測定を 2010 年 9 月 3 日に行った。2012 年の測定では、図 3-5(1)の距離の検討を行うために、10 m 離れた 1 地点からも測定を行った（図 3-7）。このときにはシートは設置しなかった。

本研究では高密度・高精度・高速な測定が可能な最新の地上型 LiDAR を採用した（VZ-400 (RIEGL)）。表 3-2 に使用したスキャナの概要を示す。レーザー反射点までの距離の測定精度は 5 mm である。また、レーザーを照射する角度の分解能は 0.0005° であり、天頂角と方位角の成分について誤差はないと見なせる。このような高精度な測定が短時間で可能であることから、航空機 LiDAR で推定した情報の精度検証に有用である。このスキャナ



測定状況の平面図　　測定時の写真

図 3-7　地上型 LiDAR による測定位置と測定時の写真

表 3-2　レーザースキャナ（VZ-400（RIEGL））の仕様

スキャン範囲： 鉛直方向 100°(-40～60°), 水平方向 360°
角度測定分解能： 0.0005°
レーザー波長： 1550 nm
レーザービーム径： 0.3 mrad　(5m の距離で 1.5mm)
測距精度： 5 mm
確度(さらなる測定が同じ結果を示す度合い)： 3 mm

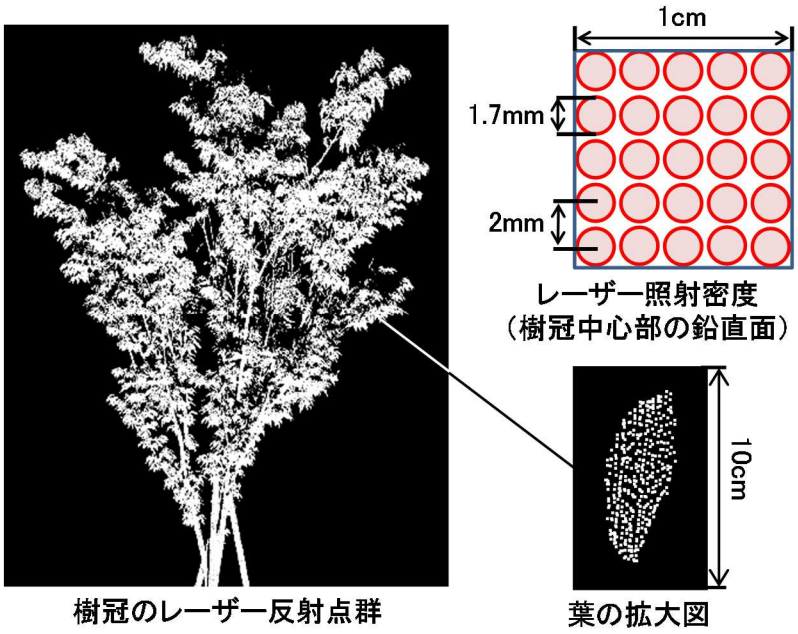


図 3-8　対象樹木の地上型 LiDAR データ（測定距離 5m）

により、選択法と統合法の比較を行うために高密度にレーザーが照射されるように、4 つの地点それぞれから葉のスケールよりも十分細かい 2 mm 程度の間隔でレーザーが照射される条件で測定を行った。レーザーを照射する間隔は、天頂角と方位角ともに 0.02° のである。この測定の結果、図 3-8 のように葉の形状を明確に確認できるデータを取得した。測定距離の影響を検証するために、樹木から 10 m 離れた地点（測定地点 5）からも同様のレーザー照射間隔で測定を行った。この場合、測定距離が 5 m から 10 m になるため、図 3-5(2) に示した通り、レーザーの数が半分になりフットプリントのサイズが 2 倍になる。また、樹木から 5 m 離れた地点において地表面からの高さ 4 m の位置に三次元超音波風向風速計を設置し、風速を測定した。

3.4.2 地上型 LiDAR データの前処理

2010 年と 2012 年に取得した地上型 LiDAR データを、分析に使用できるように処理を行った。はじめに、それぞれの年において、4 つの測定地点のデータの位置合わせをした。測定時に樹木の周囲に置いた複数の反射材を参照点として、データ処理ソフト（RiSCAN PRO (RIEGL)）を用いて、推定に使用する各測定地点のファーストパルスとシングルパルスのデータを共通の座標系での値に変換した。各データにはフライングポイント、またはゴーストポイントなどと呼ばれるエラーの点（実際には物体がない位置に存在するデータ）が含まれる。このようなデータは、レーザーの発射時に比べてパルス形が乱れた反射波により生じるとされている [3-25]。そのため、波形の乱れを表す値 deviation（レーザー反射点の 3 次元座標値と同時に記録される）が 12 以下のレーザー反射点を正しいデータとして抽出した。この閾値は目視判読により決定した。

3.4.3 葉の方位角と傾斜角の実測

2012 年の地上型 LiDAR による測定の後、葉の方位角と傾斜角の測定を行った。葉を平面と見なしたときの法線ベクトルの方位角と天頂角を方位磁針と水準器を用いて測定した。樹冠の中から葉群（1 本の枝の先につく葉の集まり）を選び、それぞれの葉群について 30-40 枚の葉を測定した。方位角は樹冠下部から中部の中で方位が異なる 3 箇所で測定した。傾斜角は樹冠下部と中部で 1 箇所ずつ測定した。上部では測定が困難であったため、地上型 LiDAR データから傾斜角を読みとった。地上型 LiDAR の測距精度は 5 mm の精度であるが、10 cm の空間スケールの葉の傾きの判別は可能である。

3.4.4 地上型 LiDAR による LAD 分布の算出

シートで風を遮り弱風条件を作った 2012 年に取得した地上型 LiDAR データを用いて、統合法と選択法により LAD 分布を推定した。はじめに、各測定地点のデータを、手動で葉と枝のデータに分離した。今回は確実に分離できるように手動としたが、落葉樹においては着葉期と落葉期の差を利用する方法が用いられている [3-20]。また、葉と枝のレーザーの反射強度の差により分離する方法 [3-18]や、葉と枝におけるレーザー反射点の分布パターンの違いを用いた方法 [3-26] [3-27]が提案されている。このような研究が進むことで、常緑樹においても自動での葉と枝のデータの分離が可能となる。

次に、実測結果に基づく葉の方位角と傾斜角を与え、式(3-1)と(3-5)を用いて統合法と選択法により LAD 分布を推定した。測定地点 1～4 の樹冠のデータを 2 mm × 2 mm × 2 mm の small voxel に分割し、各測定地点からのレーザーの軌跡をトレースし、図 2-22 のよう

に small voxel の種類を決定した。 LAD 分布を表す voxel サイズは、図 3-5 のように航空機 LiDAR との比較を想定し、0.2 m × 0.2 m × 0.2 m, 0.5 m × 0.5 m × 0.4 m, 1 m × 1 m × 0.4 m の 3 種類のサイズを用いた。0.2 m × 0.2 m × 0.2 m では最も推定精度が高いと考えられ、これを用いて選択法を統合法と比較する。0.5 m と 1 m は航空機 LiDAR の検証を想定して設定した。0.5 m と 1 m では voxel の高さは変化していないが、航空機 LiDAR の距離方向の分解能（0.5 m）を考えると、voxel の高さは 1 m よりも低くできると考えたためである。本章で対象としているケヤキの樹冠高さの関係から、voxel サイズ 0.2 m の場合と比較できるように、voxel の高さを 0.5 m ではなく 0.4 m とした。図 3-5 (3)のレーザーの照射密度の影響を検討するために、取得した LiDAR データから点を間引くことにより、天頂角と方位角ともに 0.04° の間隔で測定した場合と等価のデータを作成した。2.5 で述べたように、反射パルスは連続的に記録されるため、照射間隔が変化した場合と等しいデータを正確に作成することができる。このデータを用いる場合は、樹冠でのレーザーの照射間隔に合わせて small voxel のサイズを変更した。

3.4.5 刈り取りによる葉面積の実測

葉の傾きの実測に続いて、対象樹木の葉を刈り取り、葉面積を実測した。図 3-9 に刈り取りの手順を示す。全ての葉の面積を直接測定することは困難であるため、サンプリングにより樹冠の上部、中部、下部の葉について葉面積と葉の乾燥重量の関係を求め、他の部分は乾燥重量からその関係式を用いて葉面積を算出する方法を用いた。葉面積と乾燥重量の関係を求めるために、下部と中部については 3.3 で葉の傾きを測定した葉群を用い、上部については 1 つの葉群を選択して用いた。角度の測定後に葉を刈り取り、それらをスキャンして葉面積を測定した。その後葉を乾燥させ、葉面積と葉の乾燥重量の関係を得た。次に、樹木の全ての葉を刈り取った。樹冠を上層、中層、下層の 3 層に分け、層ごとに葉を刈り取り乾燥させ、重量を計測した。層の高さは上層と中層が 1.2 m、下層が 1.5 m である。そして、葉面積と乾燥重量の関係から各層の葉面積を求めた。



図 3-9 刈り取りによる葉面積の実測方法

3.5　地上型 LiDAR による LAD 分布の算出精度と航空機 LiDAR の検証のための測定条件

3.5.1　葉の傾きの設定方法

統合法と選択法を比較する前に、実測結果に基づいて葉の傾きを設定する。図 3-10 に葉の方位角の実測結果を示す。点線は葉群がついている枝の伸びる方位を表している。方位角には指向性があり、枝の方向に多く分布していることが分かる。図 3-10 には、実測した全ての葉について、枝の方位を基準（0°）としたときの葉の方位角の分布も示している。枝の方位から±90°以内の方位角の葉は 60%、それ以外も 40%存在している。そのため、指向性はあるものの一様分布としても誤差は小さい考え、既往研究 [3-1) 3-20)]と同様に葉の方位角は一様分布とする。

図 3-11 に葉の傾斜角の実測結果を示す。各高さで明らかなピークが見られ、下部と中部では水平に近い葉が多く、上部では垂直に近い葉が多い。既往研究 [3-1) 3-20)]と同様に樹冠全体で同一の分布（図 3-11 右下）を用いると、上部では垂直に近い葉が多い（地上からのレーザーは当たりにくい）にも関わらず水平に近い葉が多い設定になるため、$G(\theta)$が大きくなり葉面積が過小推定される。以上から本研究では、上層、中層、下層ごとに傾斜角の頻度分布を与える。本研究では検証のために葉の傾斜角の実測を行ったが、実用上は、吉田らの研究 [24)]のようにデータベースの整備が進めば利用することができる。または今回の樹冠上部のように地上型 LiDAR データから読み取ることができる。

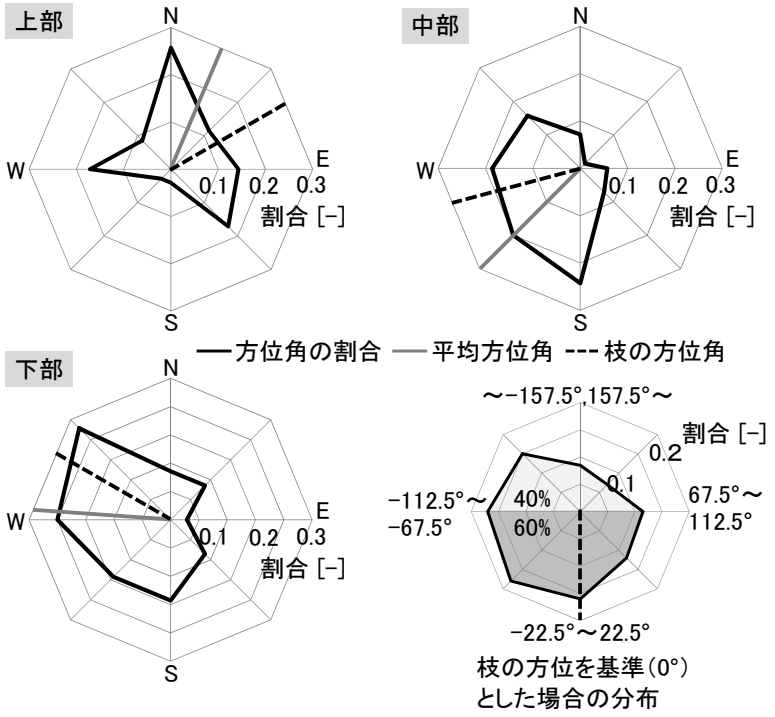


図 3-10　葉の方位角の実測結果

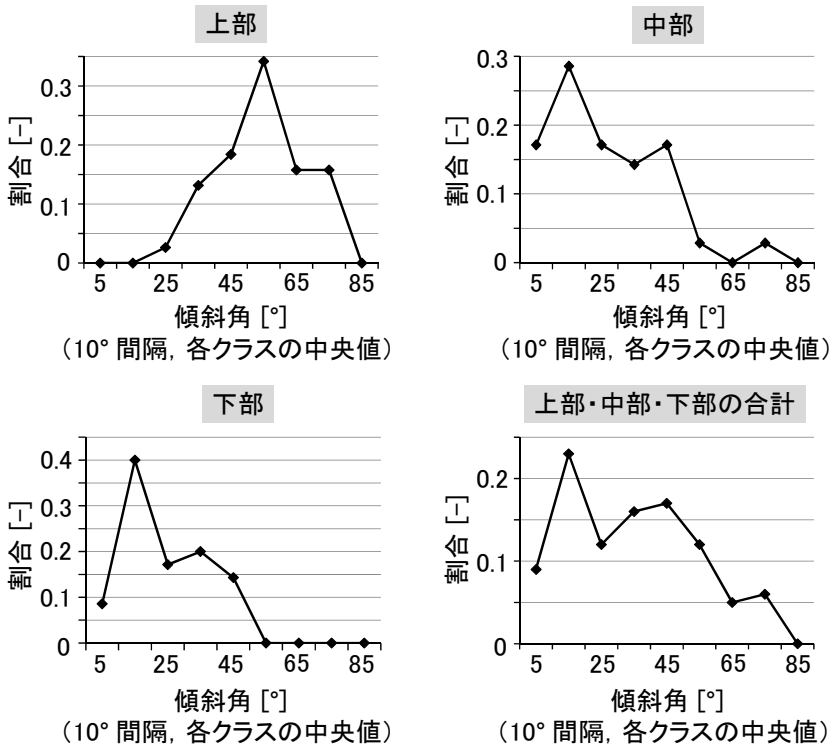


図 3-11　葉の方位角の実測結果

3.5.2　統合法と選択法の比較

統合法と選択法の比較を行い、選択法の有効性を検証する。レーザーの照射数が少ないことで精度が低下する影響や voxel サイズが大きいことの影響が生じないように、最も高分解能のケース（voxel サイズ 0.2 m × 0.2 m × 0.2 m、測定距離 5 m、レーザーの照射間 0.02°）を用いた。図 3-12 に上層、中層、下層における刈り取りによる葉面積、及び統合法と選択法により推定した葉面積を示す。統合法と選択法の葉面積は、0.2 m × 0.2 m × 0.2 m の voxel 内の葉面積を合計して求めた。樹冠全体の総葉面積は、刈り取りの結果 29.5 m² であるのに対し、統合法は 30.8 m²、選択法は 25.0 m² であり、統合法の方が誤差が小さい。しかしながら、層ごとに傾向が異なっている。統合法は下層では 11%、中層では 17%葉面積が過大推定されている。弱風時に測定を行ったとしても、地上型 LiDAR の測距精度や微小に葉が揺れることの影響で過大推定が生じることを示している。上層においては選択法に比べて誤差が小さく、9%の誤差であるが、3.3.2②で述べた LAD 推定の誤差要因による過小推定と下層・中層と同様の過大推定が相殺された結果であり、原理的な妥当性はない。選択法は下層と中層において、2.2②で述べたように過小推定にはなるが、誤差がそれぞれ 9%と 6%であり実測値とよく一致している。しかしながら、上層では 26%の過小推定となっている。次に、この誤差が本手法の原理に従ったものであるかについて検討を行う。

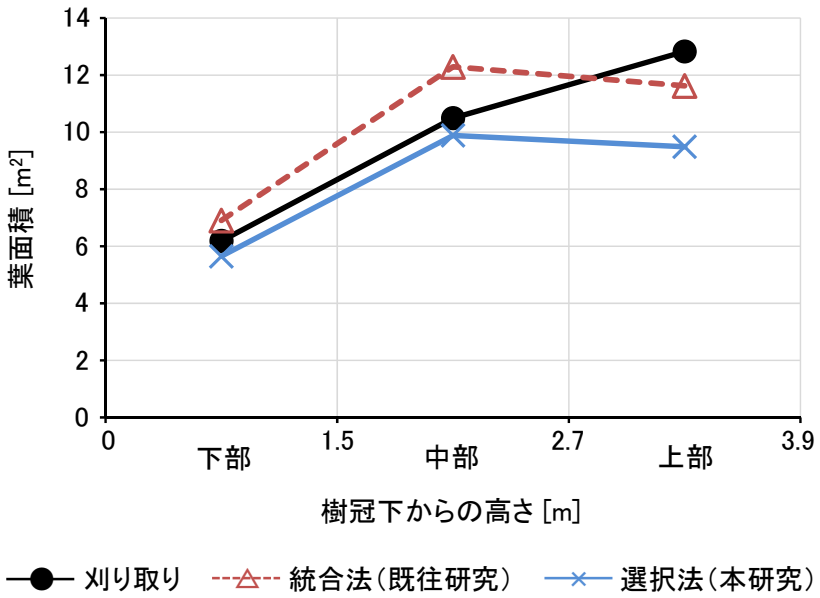


図 3-12　葉の方位角の実測結果

表 3-3　方位角を一様とした場合と分布を考えた場合の選択法による葉面積 [m²]

	刈り取り	方位角考慮無	方位角考慮有	考慮無と考慮有の差 [%]
葉群 1	0.250	0.216	0.222	-2.62
葉群 2	0.470	0.476	0.444	6.88
葉群 3	0.304	0.255	0.264	-3.32

表 3-4　傾斜角の設定の違いによる選択法で推定した樹冠全体の総葉面積 [m²]

刈り取り	一様分布	樹冠全体で同一の頻度分布	上部・中部・下部ごとの頻度分布
29.5	22.9	22.9	25.0

なお、葉の方位角を実測した葉群において、方位角を一様とした場合と分布を与えた場合の葉面積を比較したとところ、相対誤差は平均で 4%（表 3-3）であり、一様分布と仮定することの誤差は小さいことを確認した。また、葉の傾斜角を一様とした場合と樹冠全体で同一の分布（図 3-11 右下）とした場合の、総葉面積の推定値はともに 22.9 m² であり（表 3-4）、高さごとに傾斜角の分布を与えることが妥当であることを確認した。

3.5.3　選択法による算出誤差に関する考察

3.3.2②で述べたように、レーザー入射率の低下と voxel 内の LAD の増加が選択法による LAD 推定の誤差要因となる。まずは入射率と推定誤差の関係を考える。図 3-13 に上層、中層、下層における刈り取りによる葉面積、選択法による葉面積、レーザー入射率を示す。レーザー入射率は、各層内の葉を含む voxel の入射率の平均値を示している。樹冠下部でレーザーが遮られるため、上部へ向けてレーザー入射率が低下する。入射率は一定の割合で減少するが、葉面積の推定誤差は下層・中層では同程度で、上層で急激に増加しており、入射率の変化とは対応していない。図 3-14 に選択法による LAD とレーザー入射率の分布を示す。

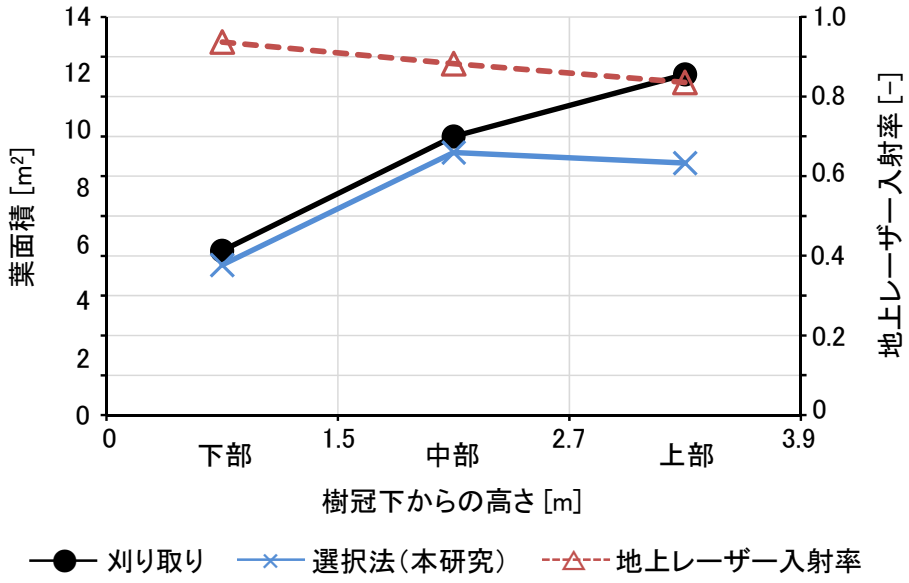


図 3-13　選択法により推定した葉面積、刈り取りによる葉面積、レーザー入射率の関係

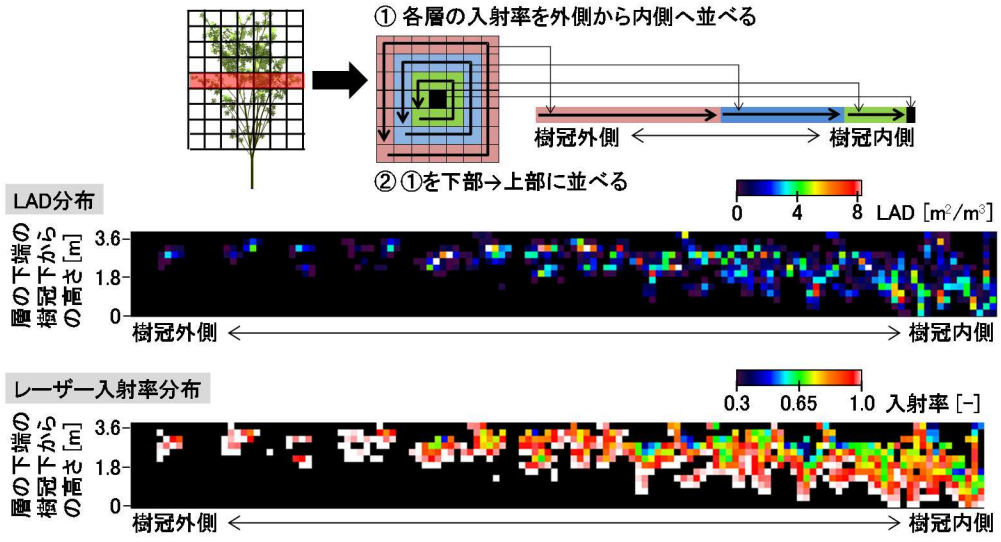


図 3-14　樹冠内における選択法による LAD とレーザー入射率の分布

1 メッシュが 1 つの 0.2 m × 0.2 m × 0.2 m の voxel を表している。樹冠下部から中部では樹冠の中央部では入射率が低下するが、3.5.2 の結果から LAD は推定できている。樹冠上部では中央部においてさらにレーザー入射率が低下するが、LAD 分布によると、この領域にはほとんど葉が分布していないことが分かる。上部ほど樹冠が広がり外側に葉が分布するためレーザー入射率は低下せず、多くの voxel で 0.8 以上の入射率が確保されている。

次に、voxel 内の LAD と誤差の関係を検討する。図 3-15 に刈り取りによる上層、中層、下層の LAD の平均値と、選択法による葉面積の推定誤差を示す。刈り取りによる LAD は、各層の葉面積を層内の voxel に分配したときの 1 voxel あたりの平均 LAD を示している。葉が数枚しか含まれない voxel を除くために、選択法による LAD が 0.1 以上の voxel のみを用いた。LAD の変化と葉面積の推定誤差の変化が対応している。上層では、voxel あたりの LAD が急激に大きくなり 3.0 m^2/m^3 になっており、0.8 以上の入射率が確保されていても葉面積が過小推定される。対象とした樹木は若い個体であり、枝の周りに葉が密集していたため、過小推定になりやすい部分が多かったと考えられる。

図 3-15 のような推定誤差の傾向から推定値の補正が可能であると考えられる。しかしながら、LAD の推定値やレーザー入射率では過小推定が生じる voxel を検出することができない。Hosoi et al.[3-28]のように voxel 内でのレーザー数の減少を考慮した指標を用いて検出を行い、誤差を補正する方法を検討する必要がある。平均的な形態の特徴を持ったケヤキにおいて航空機 LiDAR の推定精度を検証し、熱環境評価への適用性を明らかにするという本論文の研究方法に対しては、図 3-12 の下部と中部の結果を用いることができると考え、平均的な LAD が 3 m^2/m^3 を越える層での精度検証は今後の課題とする。

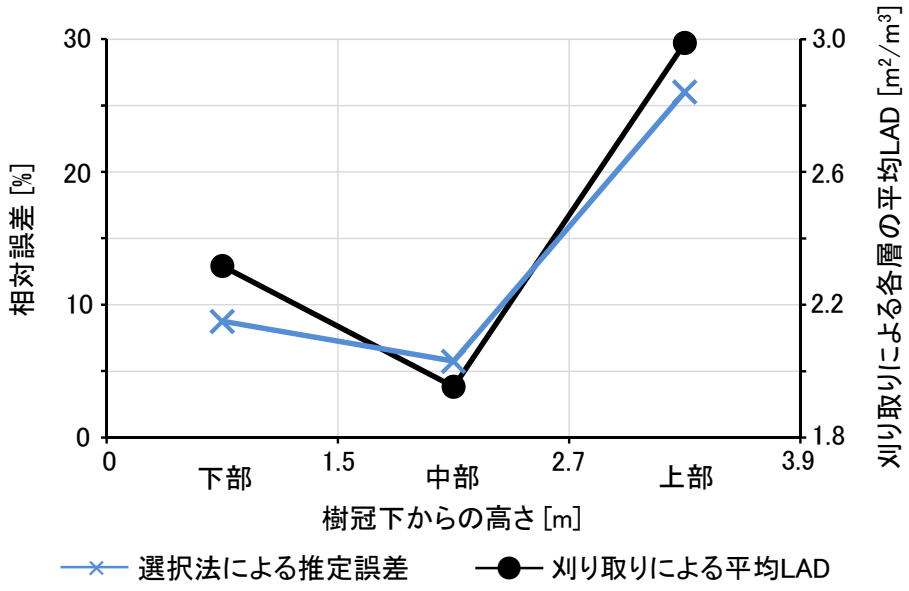


図 3-15　刈り取りによる各層の葉面積を層内の葉を含む voxel に均等に分配した時の voxel あたりの LAD と選択法による葉面積の推定誤差の関係

3.5.4　選択法が適用できる風の条件

選択法は測定時の風の影響を受けにくい手法であるが、図 3-1 に示すような風による枝のずれが 1 つの voxel の領域を越える状況には適用できない。2010 年に取得したデータにおいて、互いに向かい合う測定地点 1 と 3、及び 2 と 4 の間でデータの比較を行うことで、風速と枝の揺れ方の関係を分析した。図 3-16 に各測定地点での地上型 LiDAR による測定中の風速を示す。同図は地上型 LiDAR の測定時間 2 分とその前後 30 秒の結果である。測定地点 1 と 3 は、測定地点 2 と 4 に比べて風速の差が大きく、平均で 2 m/s 程度の差がある。主幹から遠く細い枝ほど風で揺れやすいと考えられる。そこで、第一分岐点からの距離と枝の太さごとに 2 つの測定地点間の枝のデータのずれをレーザー計測結果より求めた(図 3-17)。

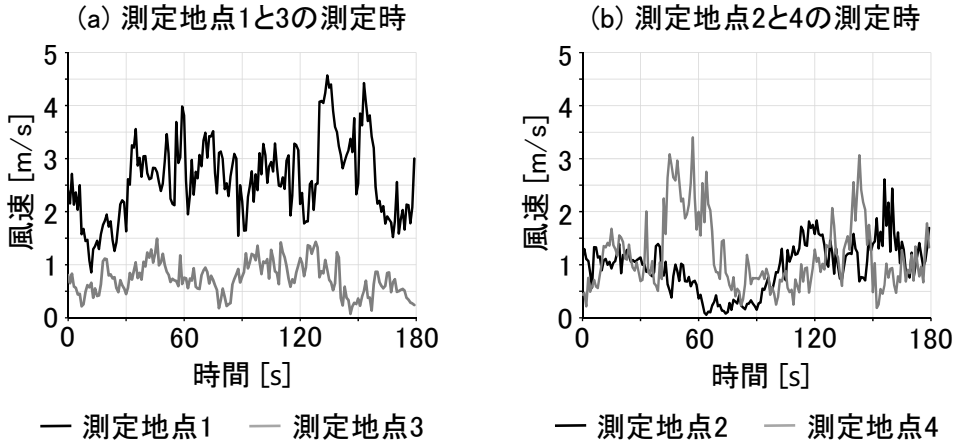


図 3-16　地上型 LiDAR による測定時の風速

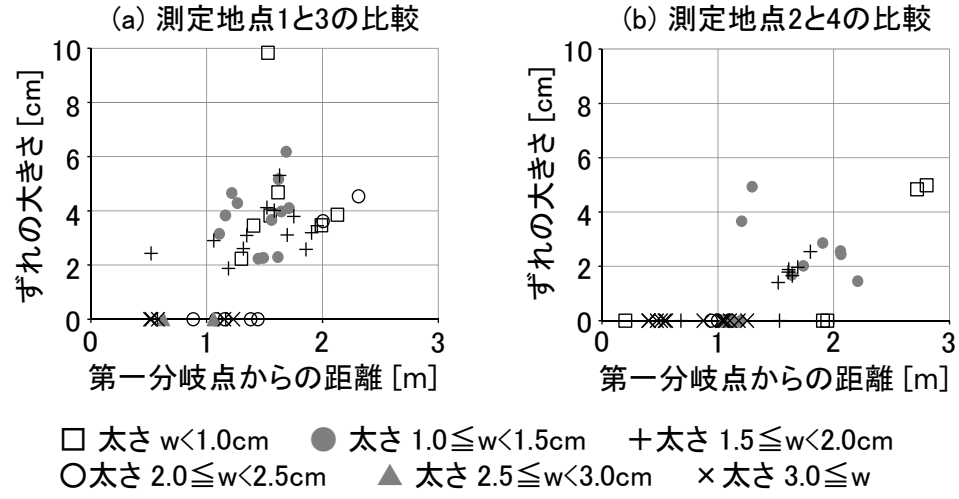


図 3-17　2 つの測定地点間の枝のデータのずれと枝の太さ、第一分岐点からの距離の関係

測定地点 1 では 3 に比べて風が強いため、2 と 4 に比べてずれが大きい。しかしながら、太さ 2 cm 以上で幹に近い枝ではほとんどずれがない。また、細い枝では 10 cm 近いずれも見られたが、大部分が 5 cm 以下である。このような数 cm のずれは、統合法においては更なる誤差の要因となるが、航空機 LiDAR との比較を想定している voxel サイズにおいては、選択法の推定精度には影響しない。また、測定地点 2, 4 ではずれが生じているのは細い枝のみで、そのずれも小さい。以上より、風速が 3 m/s 以下の条件であれば、風による枝のずれが選択法の推定精度に与える影響は小さい。

3.5.5　測定条件が推定精度に及ぼす影響

前説までは voxel サイズ：小、測定距離：近、レーザー照射密度：高、という条件を用いることで、選択法と統合法の差に着目して検証を行った。その結果、統合法に比べて選択法が優位であることを確認した。本節では、voxel サイズ、測定距離、レーザーの照射密度を変えることで選択法の適用範囲と検証のための測定条件を明らかにする。

voxel サイズが推定精度に及ぼす影響

図 3-18 に刈り取りによる各層の葉面積と、3 種類の voxel サイズ（0.2 m × 0.2 m × 0.2 m, 0.5 m × 0.5 m × 0.4 m, 1 m × 1 m × 0.4 m）で推定した葉面積を示す。0.5 m と 1 m の場合の総葉面積の推定値はそれぞれ 23.4 m^2 と 20.9 m^2 であった。0.5 m の場合は下部と中部での誤差は平均で 6%であり、voxel サイズ 0.2 m の場合と同程度である。voxel サイズ 1 m では、特にレーザーが届きにくい樹冠の中心部において詳細に測定地点を選択すること

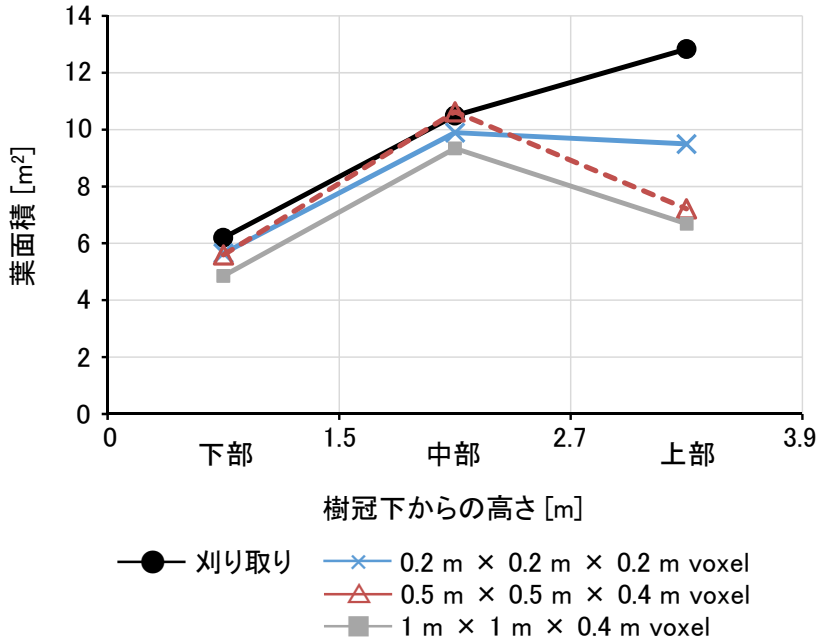


図 3-18　異なる voxel サイズによる葉面積の推定値の比較

ができない（図 3-5 (1)）ことが影響して、voxel サイズ 0.3 m と 0.5 m に比べて葉面積を過小推定していると考えられる。そこで測定距離やレーザー照射密度を変化させる検討では、1 m × 1 m × 0.4 m の voxel での推定結果に対し、各 voxel のレーザー入射率と推定誤差の関係を分析する。これにより、最も条件が厳しい voxel サイズの場合でも LAD が高精度に推定可能なレーザー入射率の範囲を検討する。ここでは、図 3-18 の結果から voxel サイズ 0.5 m × 0.5 m × 0.4 m の結果を基準とする（これを正解の値として 1 m × 1 m × 0.4 m voxel の結果と比較する）。また、下部と中部の結果のみを用いる。

測定距離が推定精度に及ぼす影響

図 3-19 に測定地点 5 のデータにより推定した 1 m × 1 m × 0.4 m voxel の LAD の精度と地上レーザー入射率の関係を示す。このとき樹冠におけるレーザーの間隔は図 3-18 の 2 倍、レーザーのフットプリントの大きさも 2 倍になる。図の各点が 1 つの 1 m × 1 m × 0.4 m voxel を表している。縦軸は推定値と測定地点 1～4 のデータで推定した 0.5 m × 0.5 m × 0.4 m voxel の結果（図 3-18）の差であり、負の値は LAD が過小推定されていることを表す。ここでは、4 つの 0.5 m × 0.5 m × 0.4 m voxel の値を合計して 1 つの 1 m × 1 m × 0.4 m voxel と比較している。前項の結果より、0.5 m × 0.5 m × 0.4 m voxel の結果には 6%の誤差が含まれている。地上レーザー入射率が低い場合には誤差が大きいが、レーザー入射率が高くなると誤差が小さくなり、ばらつきも小さい。この結果からは地上レーザー入射率 0.8 が基準となっていると見ることができる。これは、10 m 離れた地点から測定を行い、1 m × 1 m × 0.4 m voxel の LAD 分布を推定したとしても、地上レーザー入射率 0.8 以上確保されている voxel では高精度に LAD を推定できることを意味する。

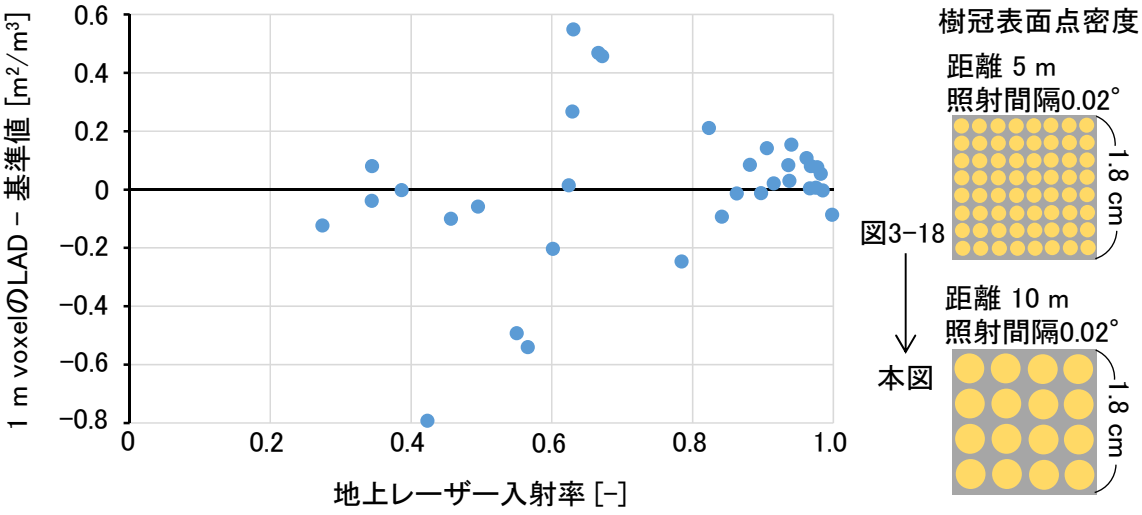


図 3-19　測定距離 10 m、voxel サイズ 1 m × 1 m × 0.4 m の場合の LAD の推定精度
（基準値は図 3-18 の 0.5 m × 0.5 m × 0.4 m voxel の推定値）

レーザーの照射密度が推定精度に及ぼす影響

最後に、レーザーの照射密度を変化させた場合の結果を述べる。図 3-20 に図 3-19 からレーザーの照射密度を半分にした場合の結果を示す。このとき樹冠におけるレーザーの間隔は 2 倍、面積あたりのレーザー数は 4 分の 1 になる。レーザーの数が減少するため、図 3-4 の原理の通り過小推定が起こりやすくなり、全体的として負の値をとる voxel が増えている。しかしながら、レーザー入射率が高い voxel に限定すると誤差は小さく、図 3-19 と同様に地上レーザー入射率 0.8 を基準として、それ以上であれば高精度に LAD を推定可能と見なせる。図の縦軸の 0 は図 3-18 の 0.5 m voxel の値と一致していることを示している。図 3-20 では過小推定される確率が高いが、平均的には図 3-18 との差はほぼ 0 と見なせる。すなわち、この条件での誤差も図 3-18 と同様に 6%である。

本節で得られた知見は次の通りである。

- 2 mm の間隔でレーザーが照射される条件（測定距離 5 m、レーザー照射間隔 0.02°）では、0.5 m の voxel サイズまでは 10%以下の誤差で LAD を算出可能。
- ただし、平均的な LAD が 3 m^2/m^3 を越える密な層ではレーザーの入射数が確保されていても 20%以上過小推定になる。
- 測定距離 10 m、レーザー照射間隔 0.04° とレーザー照射密度が低下しても、地上レーザー入射率が 0.8 以上の voxel であれば、1 m の voxel でも 6%の誤差で LAD を算出できる。

以上の結果を踏まえ、次節では、2 章で選定した都市空間の樹木（航空機 LiDAR 検証用）の測定を行う。

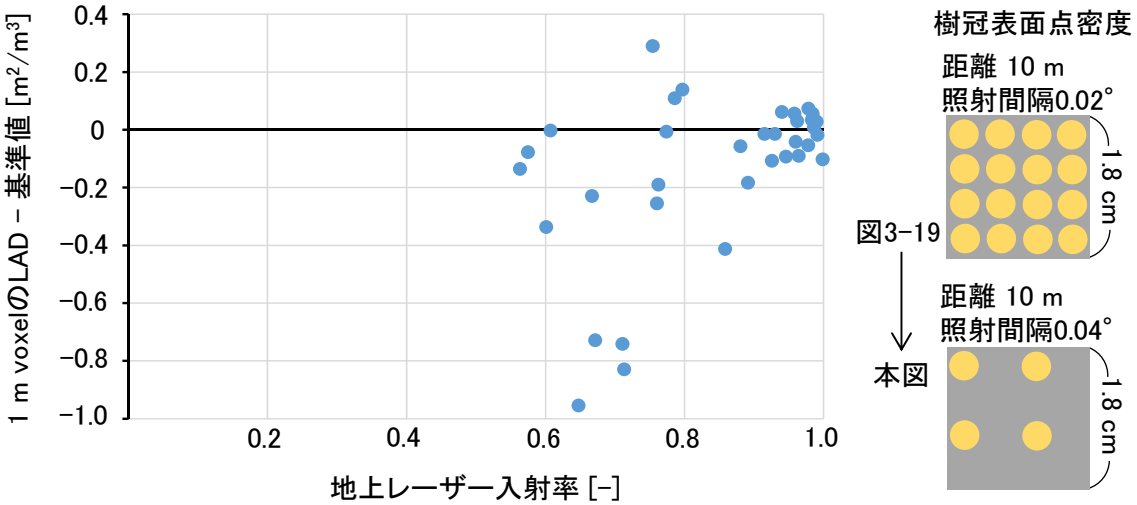


図 3-20　レーザーの照射間隔を 2 倍にした場合の推定精度
（基準値は図 3-18 の 0.5 m × 0.5 m × 0.4 m voxel の推定値）

3.6　航空機 LiDAR の推定精度を検証するための地上型 LiDAR による測定

3.6.1　測定の概要

2 章で選定した実際の都市空間の樹木（ケヤキ）を対象に、航空機 LiDAR による樹木の 3 次元情報の推定精度を検証するために、地上型 LiDAR による測定を行った。3.4, 3.5 と同様のレーザースキャナを用いて、図 3-21 に示すように 2 地点から測定を行った。対象樹木の樹冠形状と、3.5 の結果を踏まえて幹から 10 m の距離から測定を行った。レーザーの照射密度も同様に結果を踏まえ、弱風の間に測定を終えることができるよう（選択法は 3 m/s 以下であれば風があってもよいが、航空機観測のときとのずれが生じないことが目的）に、照射間隔は 0.04° とした。これは図 3-20 と同様の条件である。図 3-22 に取得したデータを示す。樹冠の表面では約 7 mm の間隔でレーザーが照射されており、葉の形状を識別することが得きるデータを取得した。

次に、取得した地上型 LiDAR データを用いて LAD 分布を算出した。航空機 LiDAR により得られる情報の空間スケールを検証するために、3 通りの voxel サイズで算出を行った（0.5 m × 0.5 m × 0.5 m、0.75 m × 0.75 m × 0.5 m、1 m × 1 m × 0.5 m）。地上レーザー入

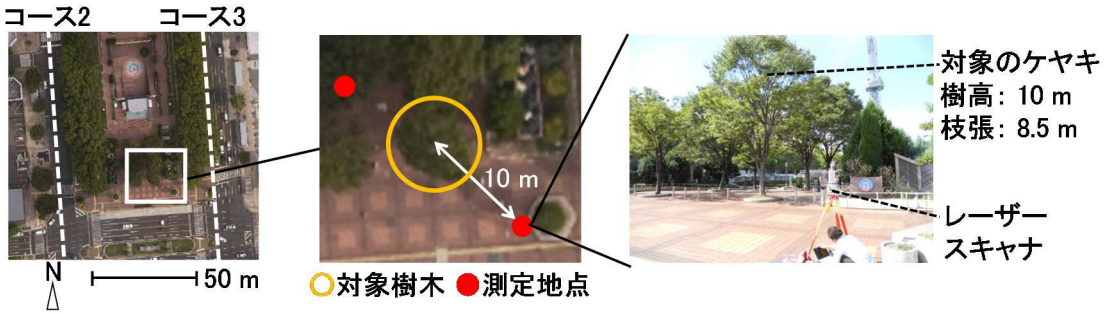


図 3-21　航空機 LiDAR の検証対象樹木の地上型 LiDAR による測定

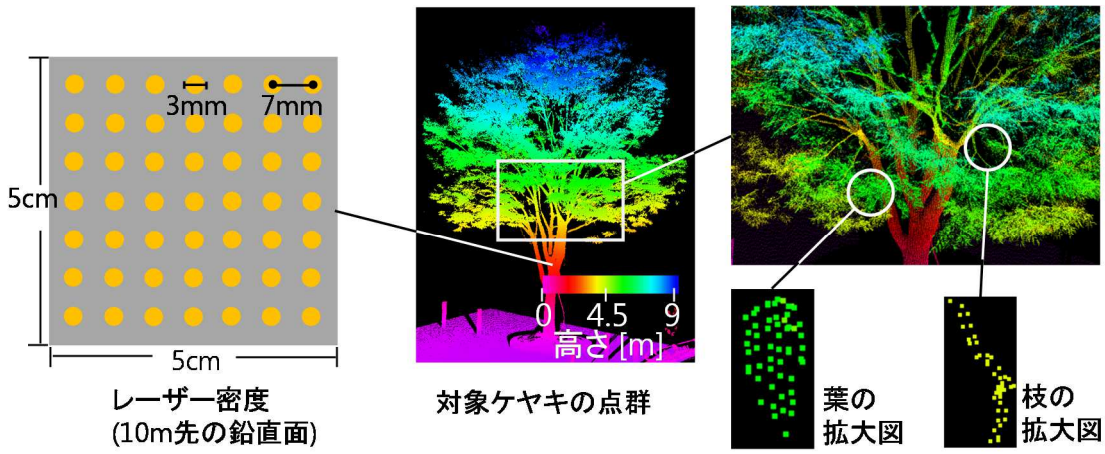


図 3-22　航空機 LiDAR の検証対象樹木の地上型 LiDAR データ

射率が 0.8 以上であれば、1 m のサイズまで選択法が適用可能であることは 3.5 で確認している。また、voxel の高さは航空機 LiDAR の距離方向の分解能（1 つのレーザー内のターゲットが 0.5 m 以上離れていれば区別してデータを取得可能）を考慮して設定した。

3.6.2　検証に使用可能な voxel の分布

3.5 の結果から地上型 LiDAR により算出した LAD 分布のうち、検証に使用することができるのは地上レーザー入射率が 0.8 以上の voxel である。図 3-23 に、voxel サイズが 1 m × 1 m × 0.5 m の場合の、地上レーザー入射率が 0.8 以上 voxel の樹冠内での分布と高さごとの割合を示す。樹冠上部では、各層内の voxel の中で検証に使用できる voxel の割合は 0.2～0.3 である。樹冠上部では voxel 間で航空機からのレーザーの入射条件の差が小さいため、このような 1 部の voxel を用いることで検証が可能である。一方、樹冠下部では、上部での遮蔽の有無により航空機からのレーザーの入射条件が voxel ごとに異なる。しかしながら、図 3-23 によると、下部の 4 層では 88%の voxel が検証に使用できるため、樹冠下部での検証も可能である。

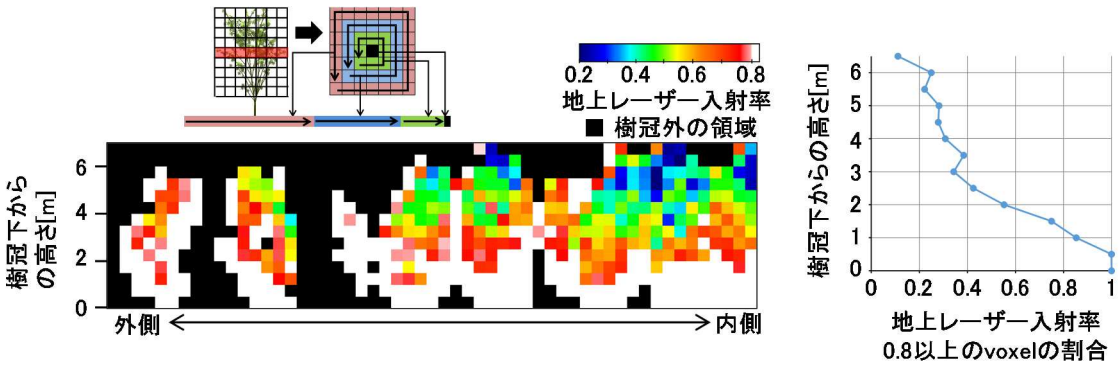


図 3-23　検証に使用できる voxel（地上レーザー入射率 0.8 以上）の分布と存在割合

3.7 まとめ

第 2 章で提案した手法により推定した樹木の 3 次元情報の精度を検証する方法について検討した。既往研究における、航空機や衛星から推定した情報の精度検証のための地上での実測方法を整理し、航空機 LiDAR データとのずれがなく高密度な 3 次元空間情報を取得できることから地上型 LiDAR を採用した。そして、既往研究の課題として残されている、風による枝の揺れや地上型 LiDAR の測距精度による葉面積の過大推定に対して、刈り取りが可能な小規模なケヤキを用いて、より高精度な葉面積密度情報の取得手法について検討した。地上型 LiDAR による測定時に対象のケヤキをレーザーを透過するシートで覆うことで、既往研究の推定手法とその改善手法の精度検証を行った。また、voxel サイズ、測定距離、レーザーの照射密度が推定精度に及ぼす影響を調査することで、航空機 LiDAR の検証への適用性を検討した。得られた知見は以下の通りである。

- 各測定地点のデータを統合して用いる既往研究の手法では、枝が揺れない弱風時に測定を行ったとしても、LAD が 20%以上過大推定される場合がある。
- 各 voxel において地上レーザー入射率が最大の測定地点のデータを用いることで、2 mm の間隔でレーザーが照射される条件では、0.5 m × 0.5 m × 0.4 m の voxel サイズまでは 10%以下の誤差で LAD を算出可能である。
- 平均的な LAD が 3 m^2/m^3 を越える密な層では、レーザーの入射数が確保されていても 20%以上過小推定になる。
- レーザーの照射間隔が 8 mm まで低下し、1 m × 1 m × 0.4 m の voxel を用いた場合でも、地上レーザー入射率が 0.8 以上の voxel であれば、6%の誤差で LAD を算出できる。
- 地上レーザー入射率が 0.8 以下では誤差が大きくなるため、0.8 以上が航空機 LiDAR の検証に使用可能である。

以上の結果を踏まえて、2 章で選定した航空機 LiDAR の検証用のケヤキを地上型 LiDAR により測定した。地上レーザー入射率が 0.8 以上の voxel は樹冠下部で 88%、上部でも 20～30%確保されており、取得したデータが航空機 LiDAR による推定精度の検証に使用できることを確認した。次章ではこのデータを用いて航空機 LiDAR により推定した樹木の 3 次元情報の精度検証を行う。

引用文献

3-1) F. Hosoi and K. Omasa：Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44(12), pp.3610-3618, 2006.

3-2) J. W. Wilson：Inclined point quadrats, New Phytologist, 59(1), pp.1-8, 1960.

3-3) J. W. Wilson：Estimation of foliage denseness and foliage angle by inclined point quadrats, Australian Journal of Botany, 11(1), pp.95-105, 1963.

3-4) J. M. Welles and J. M. Norman：Instrument for indirect measurement of canopy architecture, Agronomy Journal, 83(5), pp.818-825, 1991.

3-5) 松山洋, 藤原靖, 島村雄一, 泉岳樹, 中山大地：全天写真から得られる葉面積指数とプラント・キャノピー・アナライザーによる実測値との比較, 地学雑誌, 112(3), pp.411-415, 2003.

3-6) 三上寛了, 西田顕郎, 村岡裕由：魚眼デジタルカメラ画像による林冠の開空域の自動識別と葉面積指数の推, 写真測量とリモートセンシング, 45(5), pp.13-22, 2006.

3-7) Y. Ryu, T. Nilson, H. Kobayashi, O. Sonnentag, B. E. Law, and D. D. Baldocchi：On the correct estimation of effective leaf area index: Does it reveal information on clumping effects?, Agricultural and Forest Meteorology, 150(3), pp.463-472, 2010.

3-8) J. M. Chen and J. Cihlar：Plantcanopy gap-size analysis theory for improving optical measurements of leaf-area index, Applied Optics, 34(27), pp.6211-6222, 1995.

3-9) J. M. Chen, P. M. Rich, S. T. Gower, J. M. Norman and S. Plummer：Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements, Journal of Geophysical Research, 102, pp.29429-29443, 1997.

3-10) Y. Ryu, O. Sonnentag, T. Nilson, R. Vargas, H. Kobayashi, R. Wenk and D. D. Baldocchi：How to quantify tree leaf area index in an open savanna ecosystem: A multi-instrument and multi-model approach, Agricultural and Forest Meteorology, 150(1), pp.63-76, 2010.

3-11) 吉見健司, 細井文樹, 清水庸, 山田博章, 大政謙次：可搬型 Scanning Lidar を用いた地表面と樹冠高の 3 次元計測樹, Eco-Engineering, 16(3), pp.203-207, 2004.

3-12) 大政謙次, 浦野 豊, 小熊宏之, 藤沼康実：可搬型 Scanning Lidar デ ータを用いたカラマツ林の樹林マッピングと胸高直径及びバイオマスの推定, 日本リモートセンシング学会誌, 22(5), pp.550-557, 2002.

3-13) 戸田健太郎, 中村彰宏, 大藪崇司, 前中久行：地上型レーザースキャナを用いた 3 次元計測における樹高の推定, 日本緑化工学会誌, 35(1), pp.69-74.

3-14) F. Hosoi, K. Nakabayashi and K. Omasa：3-D modeling of tomato canopies using a high-resolution portable scanning lidar for extracting structural information, Sensors, 11(2), pp.2166-2174, 2011.

3-15) J.-F. Côté, J.-L. Widlowski, R. A. Fournier and M. M. Verstraete：The structural and radiative consistency of three-dimensional tree reconstructions from terrestrial lidar, Remote Sensing of Environment, 113(5), pp.1067-1081, 2009.

3-16) J.-F. Côté, J.-L. Widlowski, R. A. Fournier and R. Egli：An architectural model of trees to estimate forest structural attributes using terrestrial lidar, Environmental Modelling & Software, 26, pp.761-777, 2011.

3-17) T. Takeda, H. Ogura, T. Sano, Y. Yone and Y. Fujimura：Estimating the plant area density of Japanese larch (Larix kaempferi Sarg.) plantation using a ground-based laser scanner, Agricultural and Forest Meteorology, 148(3), pp.428-438, 2008.

3-18) M. Béland, J.-L. Widlowski, R. A. Fournier, J.-F. Côté, and M. M. Verstraete：Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LiDAR measurements, Agricultural and

Forest Meteorology, 151(9), pp.1252-1266, 2011.
3-19) M. Monshi and T. Saeki：Uber den Lichtfaktor in den Plflanzengesellschaften und seine Bedeutung fur die Soffproduktion, Japanese Journal of Botany, 14, pp.22-52, 1953.
3-20) F. Hosoi and K. Omasa：Factors contributing to accuracy in the estimation of the woody canopy leaf area density profile using 3D portable lidar imaging, Journal of Experimental Botany, 58(12), pp.3463-3473, 2007.
3-21) S. Durrieu, T. Allouis, R. Fournier, C. Vega and L. Albrech：Spatial quantification of vegetation density from terrestrial laser scanner data for characterization of 3D forest structure at plot level, Proceedings of SilviLaser 2008: pp.325-334, 2008.
3-22) 吉田伸治, 中井敦, 大岡龍三：樹木の成長, 樹種の違いが樹冠の葉面積密度・光学的深さに及ぼす影響－実測に基づく街路樹の日射遮蔽効果の評価手法に関する研究－, 日本建築学会環境系論文集, (605), pp.103-110, 2006.
3-23) H. Sinoquet, G. Sonohat, J. Phattaralerphong and C. Godin：Foliage randomness and light interception in 3-D digitized trees: an analysis from multiscale discretization of the canopy, Plant, Cell & Environment, 28(9), pp.1158-1170. 2005.
3-24) C. J. Kucharik, J. M. Norman and S. T. Gower：Characterization of radiation regimes in nonrandom forest canopies: theory, measurements, and a simplified modeling approach, Tree Physiology, 19(11), pp.695-706, 1999.
3-25) RIEGL News Report VZ-400, 2009.
3-26) 根来昇吾, 細井文樹, 大政謙次：着葉期の落葉広葉樹を対象とした可搬型スキャニングライダーデータからの非同化器官の抽出, Eco-Engineering, 24(2), 51-55, 2012.
3-27) F. Hosoi, Y. Nakai and K. Omasa：3-D voxel-based solid modeling of a broad-leaved tree for accurate volume estimation using portable scanning lidar, ISPRS Journal of Photgrammetry and Remote Sensing, 82, pp.41-48, 2013.
3-28) F. Hosoi and K. Omasa：Estimation and error analysis of woody canopy leaf area density profiles using 3-D airborne and ground-based scanning lidar remote sensing techniques, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48, pp.2215-2223, 2010.

第 4 章

航空機 LiDAR による三次元情報の推定と精度検証

4.1　はじめに

本章では、第 2 章で提案した手法により検証対象のケヤキの LAD 分布を推定し、第 3 章において検討した地上型 LiDAR を用いた方法により、推定精度を検証する。図 4-1 に本章における研究方法を示す。ここまで LAD 分布は葉群の空間スケールのものが必要であると述べてきたが、本章では最初に求められる空間スケールを設定する（図 4-1(1)）。2 章で明らかになったように、点群から樹冠形状を 3 次元的に再現した研究では検証箇所が樹冠表面上の代表点に限られていることもあり、航空機 LiDAR が樹冠を捉えている空間精度は明らかにされていない。そこで、voxel 化を行う前段階の検討として、樹冠を構成する点群の空間精度を検証する（図 4-1(2)）。航空機 LiDAR データを voxel 化する際に、実際に葉が含まれるにも関わらずレーザー反射点が含まれない voxel が増加すると、その voxel サイズでは LAD 分布を再現することはできない。そのような voxel を減らすために、航空機 LiDAR データを voxel 化して得られる情報の空間分解能や樹冠形状の再現精度を検証する（図 4-1(3)）。図 4-1(1)による目標とする空間スケールと図 4-1(2)による実際の点群の特徴から、検討を行う voxel サイズを選択し、航空機 LiDAR と地上型 LiDAR による voxel の分布を比較する。これにより決定した voxel サイズを用いて航空機 LiDAR により LAD 分布を推定し、第 3 章で取得した地上型 LiDAR による LAD 分布を用いて精度を検証する。

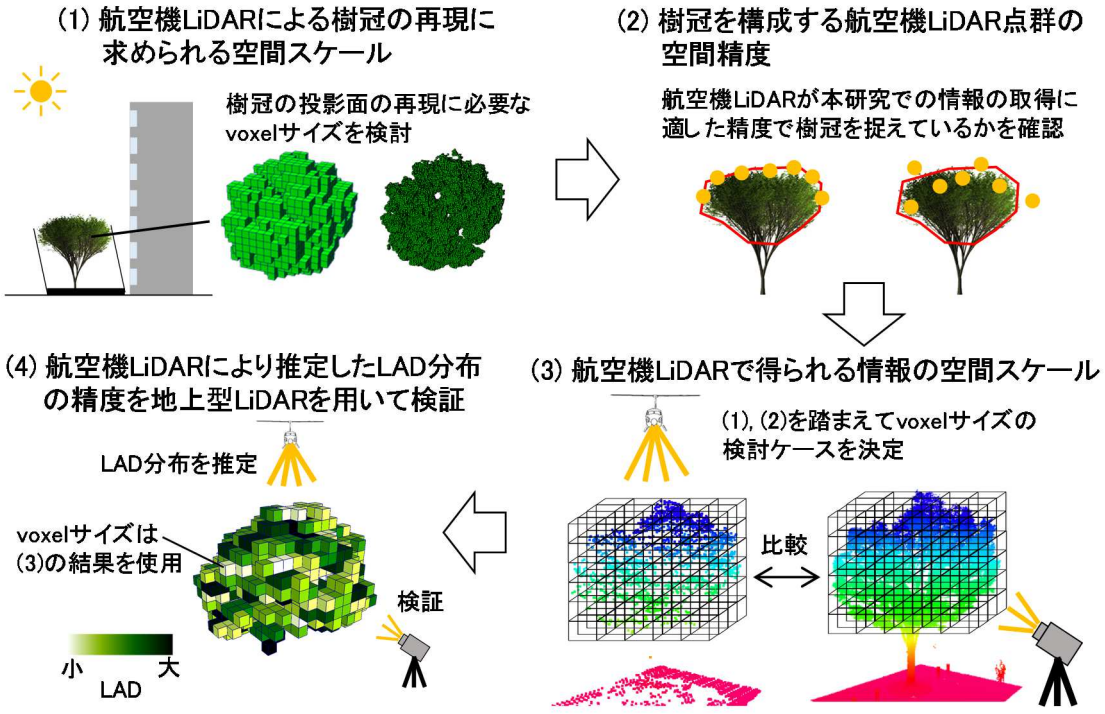


図 4-1　航空機 LiDAR により推定した樹木の 3 次元情報の精度検証のフロー

4.2　樹冠の再現に求められる空間スケール

LAD 分布には葉群の空間スケールが必求められると述べてきた。第 2 章において述べたように、voxel サイズが大きくなるほど、樹冠における放射の吸収・透過の推定精度が低下する。しかしながら、推定精度と voxel サイズの関係は十分に明らかにされていないため、樹冠の再現に求められる空間スケール決めることは難しい。そこで本研究では、日射遮蔽効果の評価のためには木陰の大きさが重要であることから、樹冠の投影面積の算出精度という観点により樹冠の再現に求められる空間スケールを決定する。そのために、航空機 LiDAR の検証用のケヤキの地上型 LiDAR データを用いて検討を行う。以下、地上型 LiDAR データとは 3.4, 3.5 で用いた小規模なケヤキのデータではなく、航空機 LiDAR の検証対象樹木のデータを指すものとする。図 4-2 に解析方法を示す。地上型 LiDAR データを異なるサイズの voxel に分割し、それぞれの voxel モデルを太陽方向から地表面に投影し投影面積を算出する。地上型 LiDAR は 5 mm の精度で距離を測定でき、樹冠の外周部を対象とした場合には葉や枝での遮蔽によるレーザー密度の低下もないため、正しい値として用いることができる。voxel サイズは 2 m × 2 m × 2 m から 0.05 m × 0.05 m × 0.05 m までの 7 種類を用いた。樹冠上部では地上からのレーザーの間隔が 1 cm 程度となるため、それより十分大きいサイズとして 5 cm までとした。太陽高度は 30°, 50°, 70° の 3 通りについて計算を行った。

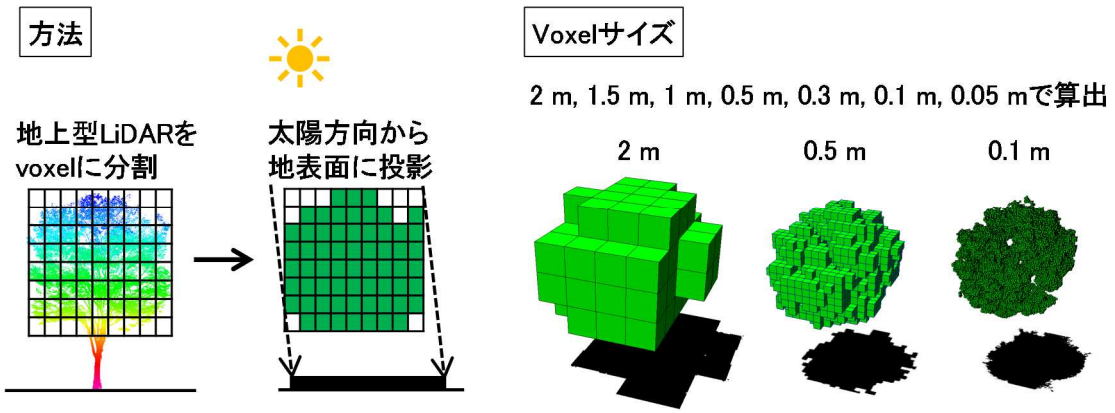


図 4-2　樹冠の投影面の再現に必要な空間スケールの検討方法

図 4-3 に算出結果を示す。voxel サイズ 2 m は、対象樹木の樹冠の幅 8.5 m、樹冠の高さ 7 m に対して大きいため、投影面積は大幅に過大推定されている。voxel サイズが 0.5 m 以下になると投影面積の変化は 20%以内に収まっている。特に日射遮蔽が重要となる太陽高度が高い場合に変化が小さい。また、0.5 m の voxel であれば樹冠内の葉群の分布も表現できると考えられる。

以上から、本研究では、熱環境評価のための樹冠の再現に求められる空間スケールを 0.5 m と位置づける。この値は対象とする樹木の形状や大きさにより異なると考えられるが、本研究で対象とする一般的に都市緑化に用いられるサイズの単木樹またはより規模が大きな並木・群落には適用できると言える。

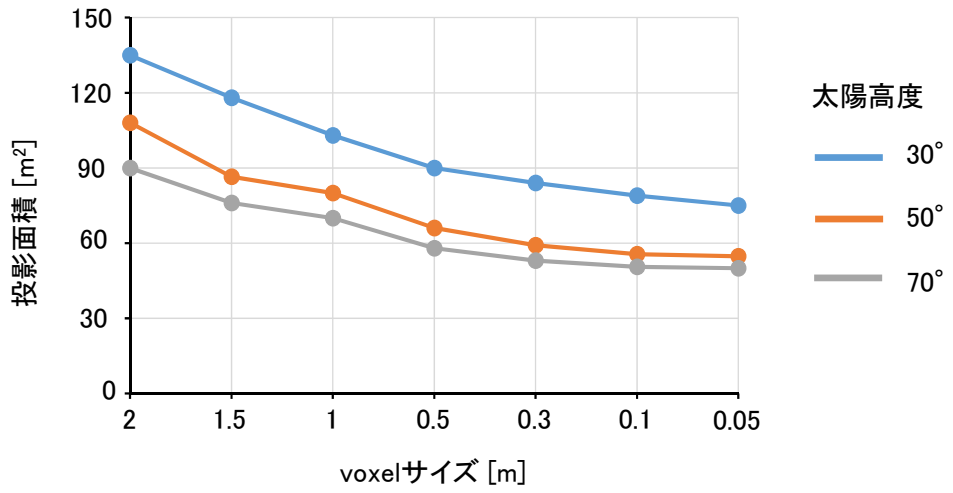


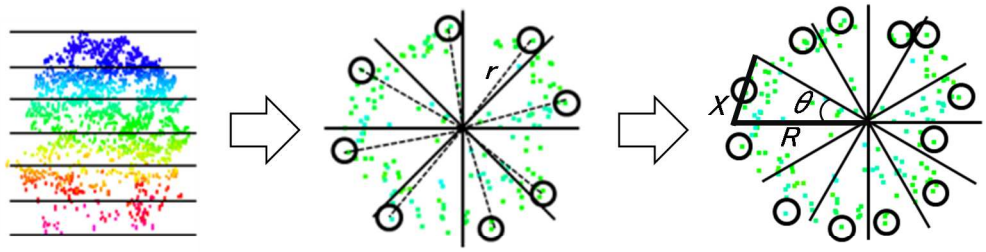
図 4-3　voxel サイズと樹冠の投影面積の関係

4.3　樹冠を構成する航空機 LiDAR 点群の空間精度

航空機 LiDAR 点群からポリゴンを作成することで樹冠形状を再現した既往研究では、点群から作成した標高データを用いた再現 [4-1)]や、凸包により抽出した外周部の点をポリゴンで覆うことによる再現 [4-2)]が行われている。しかしながら、検証箇所が樹冠表面上の代表点に限られていることもあり、点群の空間精度は十分に検証されていない。そこで、点群を voxel 化するに、点群自身が本研究における樹木の 3 次元情報の取得に適した空間精度を有しているかを検証する。この結果と 4.2 の結果を踏まえて、航空機 LiDAR により LAD 分布を推定する際の voxel サイズを決定する。ここでは航空機 LiDAR による点群と地上型 LiDAR による点群を比較することで検証を行う。また、地上型 LiDAR から確実に測定できている樹冠の外周部を対象として比較を行う。

4.3.1　樹冠外周部のレーザー反射点の抽出

航空機 LiDAR データと地上型 LiDAR データから樹冠の外周部の点を抽出し比較を行う。図 4-4 に樹冠の外周部の点の抽出方法を示す。X は分割間隔であり点を抽出する空間スケールを表している。最初に樹冠を構成する点群を厚さ X m の層に分割した（図 4-4 (1)）。そして各層を中心角が θ となるように複数のセグメントに分割し、各セグメントで樹冠中心から最も遠い点を抽出した（Fig.4-4 (3)）。ここで樹冠中心とは、地上型 LiDAR データから求めた幹の中心である。各層における θ は次のようにして決定した（Fig.4-4 (2)）。地上型 LiDAR データを基準として航空機 LiDAR 点群の空間精度を検証するために、地上型 LiDAR データにおける各層を 8 つの領域に分割して各領域で最も外側の点と樹冠の中心点との距離を算出し、各領域の距離を平均してその層の平均樹冠半径を算出した。そして平均



(1) 樹冠の点群を高さ X mの層に分割

(2) 各層を8つの領域に分割。各領域で最も中心から遠い点の中心からの距離(r)を算出し、層の平均半径 $R(=\bar{r})$を算出。

(3) 各層を中心角がθになるように分割。半径Rのときに弧の長さがXになるようにθを設定。各領域で最も外側の点を樹冠の外周部の点として抽出(○)。

図 4-4　樹冠外周部のレーザー反射点の抽出方法

樹冠半径の距離で弧の長さが Xm となるように中心角 θを決定した。既往研究[4-1]では厚さを 0.5 m の層に分割し、中心角 45°に分割して樹冠形状の再現性を検証している。本研究の方法により任意の空間スケールで精度を検証することができる。外周部の点の空間精度を調べるために、X= 2 m, 1.5 m, 1 m, 0.5 m, 0.25 m の 5 通りの分割間隔で点を抽出した。

4.3.2　樹冠の中心点との距離の精度と点を抽出する空間スケールの関係

4.1 で分割した各セグメントにおいて、航空機 LiDAR データから抽出した点と樹冠の中心点との距離 x_a と、地上型 LiDAR データから抽出した点と中心点との距離 x_t の差 Δx (= $|x_a - x_t|$)を算出した。Δx と Xが小さいほど航空機 LiDAR が高精度に樹冠の外周部の位置情報を取得していることになる。図 4-5 に航空機 LiDAR データから点が抽出された全てのセグメントにおける Δx を平均した結果を示す。図 4-6 には Δx の高さによる変化を、3 つの Xについて示す。実際には図 4-6 のように樹冠下部ほど精度が低下していくが、図 4-5 はこれを平均して樹冠全体の精度として示している。大部分のセグメントにおいては $x_a - x_t$ が負であったため、図 4-5, 4-6 に示す距離分だけ航空機 LiDAR データでは樹冠中心からの距離が過少推定されたことになる。

航空機からのレーザーが樹冠の外周部に当たり、センサが検知できるエネルギーをもつ反射パルス（以下、検知パルス）を返した場合、x_a は x_t に比べて、レーザーのフットプリントの中心と外周部との距離の範囲内で過小推定になる場合も過大推定になる場合もある。また、フットプリント内に含まれる葉が少なく検知パルスを返さなかった場合、その葉はデ

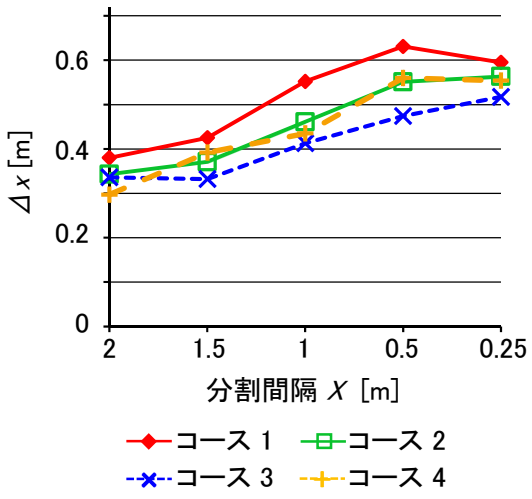


図 4-5　樹冠を分割する間隔と Δx の関係

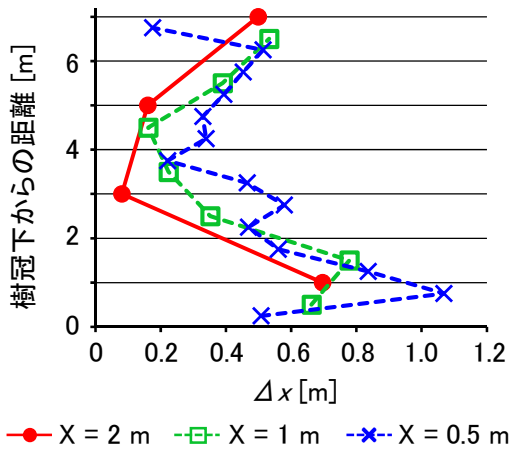


図 4-6　Δx の高さによる変化（コース 3）

ータとして記録されず x_a は x_t に比べて小さくなる。樹冠上部では後者の影響で外形が過少推定されるが、地上型 LiDAR による結果との差 Δx は最大でも 0.5 m 程である。樹冠下部では上部でのレーザーの遮蔽により、センサが検知することができる強度のパルスを返すためのエネルギーが樹冠のエッジ部分に到達しなくなるため精度が低下する。空間スケール X が大きいほど Δx は小さいが、X が小さい場合の Δx も、既往研究における誤差 2 m[4-2)] や相対誤差 0.4[4-1)] と比較すると十分小さい。

4.3.3　天頂付近からレーザーが照射された場合の結果

最もレーザーの天頂角が小さく点密度が大きいコース 3 の結果について詳しく述べる。X が 0.5 m と 0.25 m で地上型 LiDAR による結果との差 Δx が 0.5 m になる。この 2 つの分解能では Δx の変化は小さいが、地上型 LiDAR データからは点が抽出されたにも関わらず航空機 LiDAR データからは点が抽出されなかったセグメントの割合 （以下、未抽出セグメント率）が、X = 0.5 m の場合は 0.3 であるのに対し X = 0.25 m では 0.6 である（図 4-7）。図 4-8 の鉛直分布で見ても、X = 0.25 m の場合は、樹冠上部においても未抽出セグメント率が 0.5 を超える場合もあり、この空間スケールでは点を抽出できていない。X = 0.5 m の場合、樹冠上部ではほとんどの層で未抽出セグメント率が 0.1-0.2 である（図 4-8）。また、図 4-6 から Δx も 0.5 m 以下であることから、天頂付近から高密度にレーザーが照射される条件であれば、航空機 LiDAR は、樹冠上部において 0.5 m の空間精度で樹冠の外周部の位置情報を取得している。一方樹冠下部では、X = 0.5 m では未抽出セグメント率が 0.5 を超える場合があるため、外周部の位置情報を取得する空間精度は 0.5 m ではなく、1 m 程度となる。

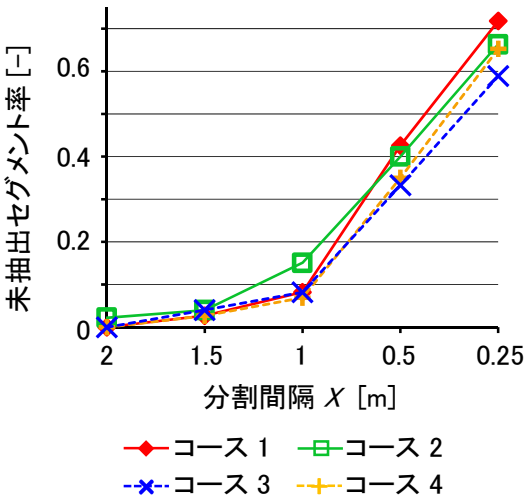


図 4-7　未抽出セグメント率と Δx の関係

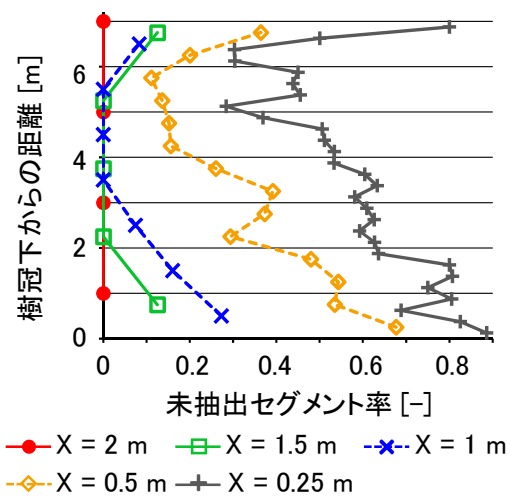


図 4-8　未抽出セグメント率の高さによる変化

4.3.4　レーザーの天頂角とレーザーの入射間隔が精度に与える影響

次に、レーザーの照射条件が精度に与える影響を見るために、観測コース間の差について述べる。点密度が小さいほど、枝葉による遮蔽の影響を受けない部分であっても遮蔽の影響を受ける部分であっても、樹冠の外周部に当たるレーザー数が減り、Δx と未抽出セグメント率が大きくなる。また天頂角が大きくなると、レーザーが樹冠を透過するのに必要な距離が長くなるため、レーザー数が減少しやすくなる。最も天頂角が大きく点密度が小さいコース 1 と最も天頂角が小さく点密度が大きいコース 3 では、0.05 m のレーザーの間隔の違いと 20°の天頂角の違い（図 2-31）があり、それが 0.1-0.15 m の精度の差をもたらしている。さらに、点密度が小さいと点が抽出されないセグメントが増えるため、図 4-7 の未抽出セグメント率において、X が 0.5 m 以下ではコース 1 と 3 の間に 0.1 の差が見られた。コース 4 は天頂角、レーザーの間隔ともにコース 2, 3 に比べて大きいが、図 4-5 に示す Δx はコース 2 と同程度、図 4-7 に示す未抽出セグメント率はコース 3 と同程度である。これは、対象樹木は西側に比べて東側の方が葉密度が大きいため、樹木の東側からレーザーが入射するコース 4 は、コース 2 や 3 からはレーザーが届きにくくなる部分の観測に有利だったことが理由に挙げられる。

天頂付近から高密度にレーザーが照射されれば、樹冠上部において 0.5 m、下部においても 1 m の空間精度で、航空機 LiDAR により樹冠の外周部の位置情報を取得することができた。樹冠の航空機 LiDAR 点群を voxel 化することで取得する情報は、葉一枚一枚の空間スケールの情報ではなく、葉群の空間スケール（数 10 cm～1 m 程度のスケール）の LAD の分布である。これに対し、航空機 LiDAR は上記の精度で樹冠の外周部の位置情報を取得していたため、樹冠の点群は本研究で目指す voxel モデリングに適した空間精度を持っていることが明らかになった。

4.4　航空機 LiDAR により得られる情報の空間スケール

LAD 分布を推定するために樹冠の航空機 LiDAR 点群を voxel に分割する。このとき航空機 LiDAR により抽出できない voxel が多く存在すると、そのサイズの voxel により樹冠が再現されているとは言えない。航空機 LiDAR により抽出できない voxel とは、実際には葉を含む voxel であっても、航空機 LiDAR のレーザー反射点が含まれない voxel のことである。そのような voxel を減らすために、LAD 分布を推定する前に、航空機 LiDAR 側から見た最適な voxel サイズについて検討する。

4.4.1　葉を含む voxel の抽出精度

検証対象のケヤキの各飛行コースの航空機 LiDAR 点群を voxel に分割し、レーザー反射点を 1 点以上含む voxel を葉が含まれる voxel として抽出した。これは、voxel 内の葉面積は考えずに葉群の分布を推定した既往研究 [4-3) 4-4)] と同様の方法である。本研究では voxel サイズを変化させることで、voxel サイズと抽出精度の関係を明らかにする。3 種類の voxel サイズ（0.5 m × 0.5 m × 0.5 m, 0.75 m × 0.75 m × 0.5 m, 1 m × 1 m × 0.5 m）を用いて、voxel への分割と点を含む voxel の抽出を行った。枝が占める voxel は地上型 LiDAR データを用いて手動で検出し解析から除いた。4.2 で熱環境の評価に必要とされた voxel サイズは 0.5 m 以下であり、4.3 では点群の空間精度が最も精度の高い樹冠上部で 0.5 m であったため、最小の voxel サイズを 0.5 m とした。下部では空間精度が 1 m であったため最大は 1 m とした。それより大きな voxel サイズは必要とされるサイズと大きく差があることから設定しない。voxel の高さは航空機 LiDAR の距離方向の分解能 0.5 m を考慮して設定した。次に、地上 LiDAR データに対しても同様に voxel の抽出を行った。ここでは抽出率による

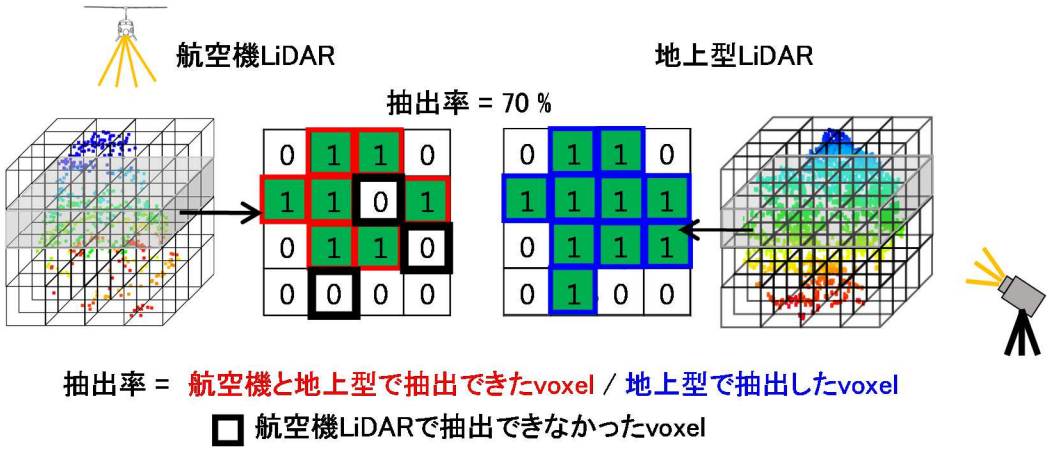


図 4-9　航空機 LiDAR による voxel の抽出率

評価を行う。抽出率とは、$N_{air \cap ter}/N_{ter}$と表される。$N_{air \cap ter}/N_{ter}$は航空機 LiDAR と地上型 LiDAR 両方で抽出された voxel の数である。N_{ter}は地上型 LiDAR で抽出された voxel の数である（図 4-9）。例えば図 4-9 の場合は、抽出率は 70%である。

図 4-10 に航空機 LiDAR データと地上型 LiDAR データを voxel 化した結果の一例を示す。航空機 LiDAR の結果は、最もレーザーの天頂角が小さく点密度が大きいコース 3 を示している。LiDAR 点群を voxel 化することで図 4-10(1)のような 3 次元情報を得た。地上型 LiDAR の結果は 3.6 で算出した LAD 分布である。図 4-1(2)は(1)の三次元分布の上部と下部の一層を上から見たものである。地上型 LiDAR の結果は、LAD が 0 より大きい voxel を全て塗りつぶしている。voxel サイズが 1 m の場合は樹冠上部では航空機 LiDAR による voxel の分布が地上型 LiDAR による分布と高精度に対応している。0.5 m voxel の場合は、分布している領域は一致しているが、抽出できていない voxel も見られる。樹冠下部では葉の分布が大幅に過小推定されている。

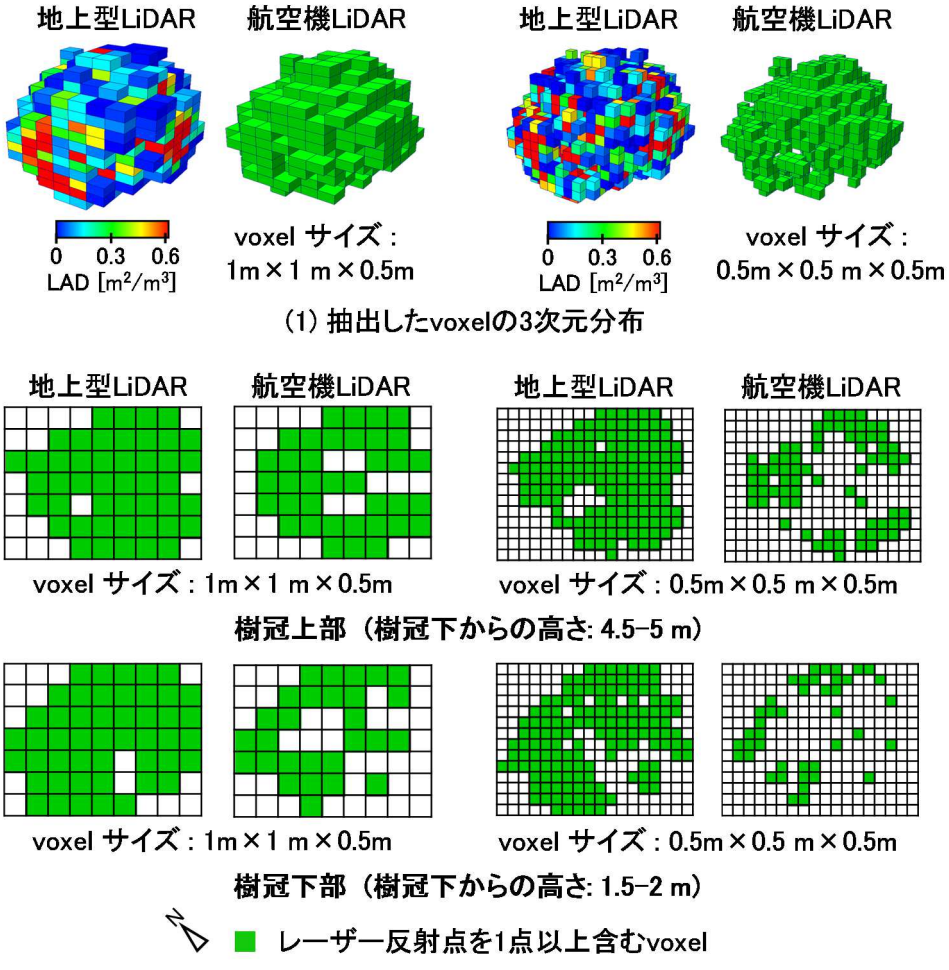


図 4-10　抽出した voxel の分布

以上のような特徴について抽出率により定量的な評価を行う。図 4-11 に最もレーザーの天頂角が小さく点密度が大きいコース 3 の抽出率の鉛直分布を示す。樹冠上部では voxel に多くのレーザーが入射するが、voxel サイズが 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m の場合は抽出率が 40～60%である。これは、レーザーが入射してもセンサが対象物として認識することができる反射強度のパルスを返さないほど葉が少ない voxel の影響と考えられる。抽出率は樹冠下部ほど低下し 40%以下になる。ここでは航空機からのレーザーが葉に入射していない voxel が増えると考えられる。voxel サイズが 0.75 m × 0.75 m × 0.5 m と 1 m × 1 m × 0.5 m の差は樹冠上部の 4 層では小さい。しかしながら、下部へ向けて差が大きくなっていき、20%に達する。voxel サイズが 1 m × 1 m × 0.5 m の場合は下部の 4 層以外では抽出率が 70%以上に保たれている。

表 4-1 に抽出率の樹冠全体での値を示す。全ての飛行コースの結果を示しているが、まずはコース 3 について考える。voxel サイズが 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m の場合は抽出率が 44.2 %である。1 m × 1 m × 0.5 m の場合は 69.3%になる。以上から、voxel サイズが 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m と 0.75 m × 0.75 m × 0.5 m の場合は抽出精度が相対的に低いと判断して、

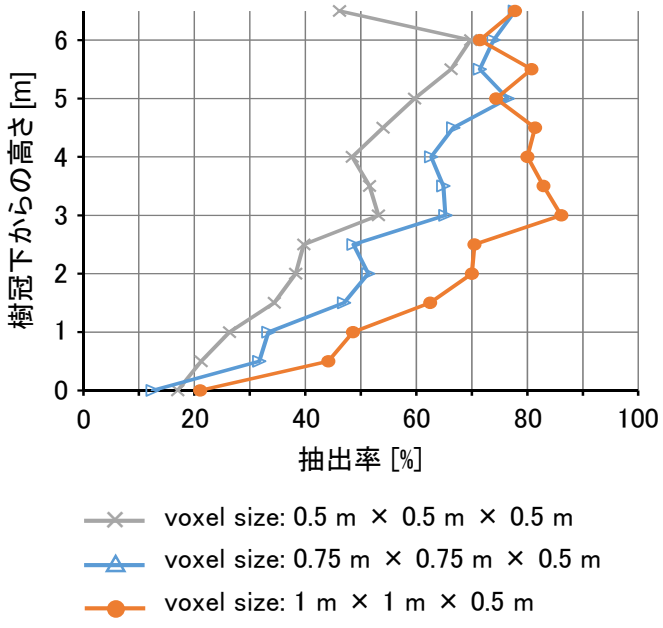


図 4-11　抽出率の鉛直分布（コース 3）

表 4-1　voxel サイズごとの各飛行コースの抽出率

voxel サイズ	コース 1	コース 2	コース 3	コース 4
1m × 1m × 0.5m	61.9	64.6	69.3	62.6
0.75m × 0.75m × 0.5m	44.1	46.8	51.4	45.4
0.5m × 0.5m × 0.5m	31.4	36.2	39.8	34.4

voxel サイズ 1 m × 1 m × 0.5 m を用いる。この場合でも抽出できていない voxel が 30%存在する。抽出できていない voxel が葉を多く含む場合には樹冠の再現性に影響する。しかしながら、抽出できていない voxel 内の葉が少ない場合には影響は小さい。そこで次節では抽出できていない voxel の要因について分析する。

最後に表 4-1 における飛行コースの差について検討する。コース 1 は、対象樹木が観測範囲の端に位置するためレーザーの天頂角及びレーザー間隔が大きくなる。しかしながら、コース 3 との抽出率の差は 8 %であり、熱環境評価への影響は小さいと考えられる。LAD の推定や熱環境評価のための検討（5 章）では、コース 3 のデータだけでなくコース 1 も用いることでレーザーの入射条件の違いについても検討する。

4.4.2　航空機 LiDAR により抽出できない voxel の特徴

分析方法

航空機 LiDAR により抽出できなかった voxel の要因として次の 2 点が挙げられる。voxel 内の葉が少なくレーザーが入射したとしてもセンサが識別可能な反射強度を持つパルスを返さない（voxel A）、voxel 内の葉にレーザーが入射していない（voxel B）である。航空機 LiDAR により抽出できなかった voxel を図 4-12 の手順で voxel A, voxel B に分類した。地上型 LiDAR により算出した LAD 分布を voxel A と voxel B の判別に用いた。地上レーザー入射率（3 章、図 3-2）が 0.8 未満の voxel は voxel A と voxel B の判別ができないため、あらかじめ別のカテゴリとする（voxel C、図 4-12 Step 1）。Step 2 の閾値は voxel と航空機の間に葉や枝などの遮蔽物が存在しない voxel を用いて決定した。この中で航空機 LiDAR により抽出できなかった voxel の LAD の最大値を閾値とし、閾値以下の LAD の voxel は voxel A に分類した。voxel と航空機の間に遮蔽物が存在しないため、抽出できなかったということは、voxel 内の葉が少ないと判断できるからである。航空機 LiDAR により抽出できなかった voxel が存在しても、隣の voxel が抽出できていれば誤差は voxel 1 つ分に収ま

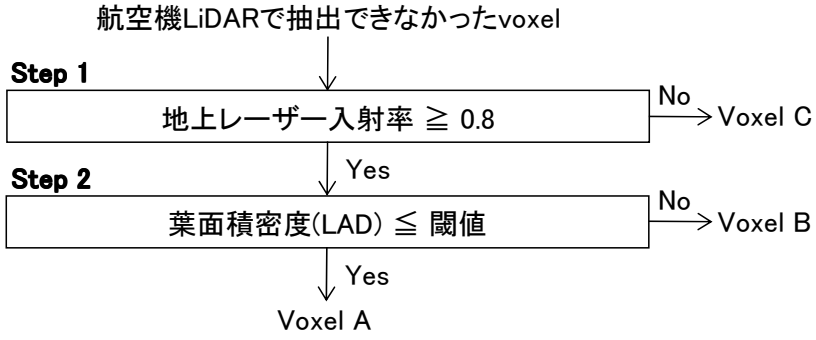


図 4-12　抽出率の鉛直分布（コース 3）

る。特に抽出できなかった voxel が voxel A であれば樹冠の再現性に与える影響は小さい。そこで、voxel A, voxel B, voxel C はさらに隣の voxel が 1 つでも抽出できたものとできなかったものに分類した。

結果

はじめに図 4-12 Step 2 の閾値について述べる。図 4-13 に閾値の決定に用いた voxel、すなわち、航空機との間に葉や枝などの遮蔽物が存在しない voxel の LAD の頻度分布を示す。閾値は抽出できなかった voxel の LAD の最大値であり、その値は 0.064 m^2/m^3 である。抽出できた voxel であってもこの閾値より LAD が小さい voxel も存在するが、これはわずかに航空機 LiDAR データと地上型 LiDAR データが重なっていない影響であると考えられる。しかしながら、大部分の voxel が明確に区別されており解析精度への影響はない。

図 4-14 に航空機 LiDAR により抽出できなかった voxel を voxel A, voxel B, voxel C に分類した結果を示す。コース 1 とコース 3 の結果を示している。天頂付近からレーザーが照射されレーザーの密度も大きいコース 3 では、樹冠上部においては、voxel A が voxel B に比べて多く存在しており、抽出できなかった voxel が樹冠上部の再現性に与える影響は小さい。また、地上型 LiDAR により LAD を算出できない voxel (voxel C)が上部には多いが、航空機からのレーザーは多く入射するため、voxel A が多いと考えられる。また、上部では全ての抽出できなかった voxel において隣の voxel は抽出できている。樹冠下部では、voxel B が増加する。樹冠全体においては、voxel C の未抽出の要因の比は voxel A と voxel B の数の比に等しいと考えると、抽出できた voxel + voxel A（樹冠の再現性に及ぼす影響小）が 83%である。また、樹冠による日射の吸収・透過に影響が大きいと考えられる樹冠上部（樹冠下からの高さ 2～7 m）においては 95%に達した。以上から、航空機 LiDAR により LAD 分布を推定することができる voxel サイズは 1 m × 1 m × 0.5 m であると結論付ける。

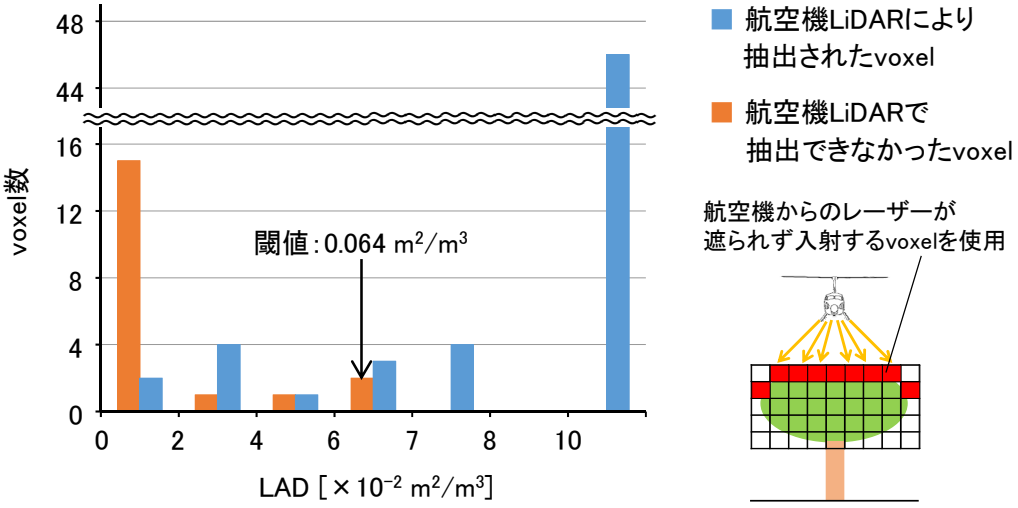


図 4-13　航空機 LiDAR により抽出できた voxel とできなかった voxel の LAD の頻度分布

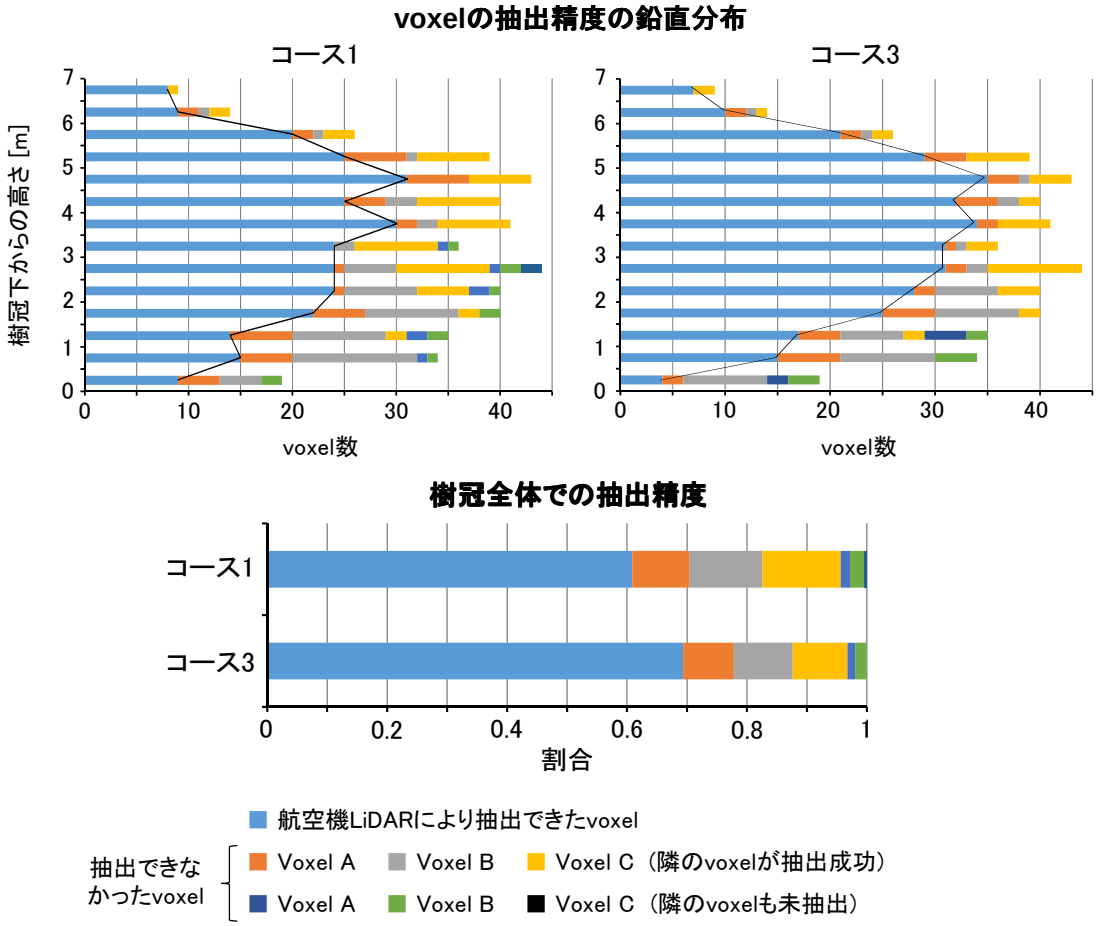


図 4-14　航空機 LiDAR により抽出できた voxel、できなかった voxel（Voxel A, Voxel B, Voxel C）、隣の voxel の抽出の有無の割合

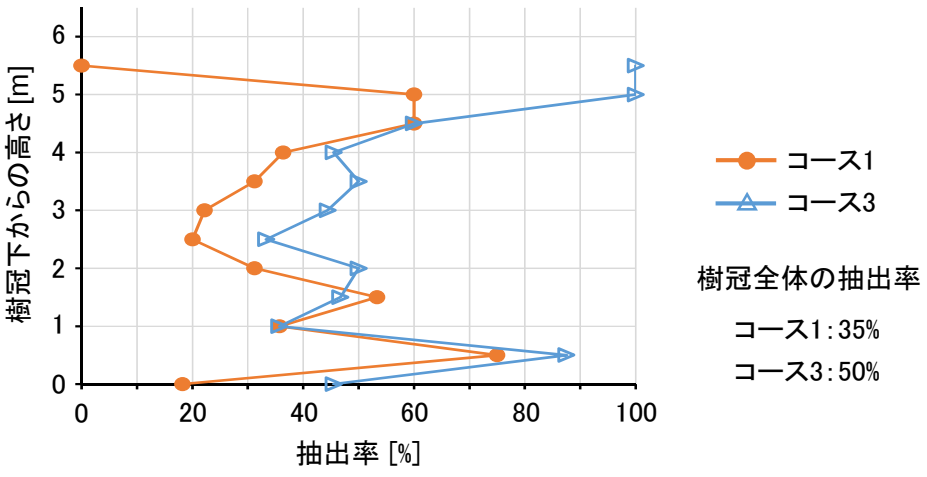


図 4-15　枝の voxel の抽出率

航空機からのレーザーが入射しにくい樹冠の内部には、枝が多く存在している。図 4-15 に枝の voxel の抽出率を示す。コース 3 の結果を見ると、上部を除いては抽出率が低く、樹冠全体の抽出率も葉に比べて 20%低い。枝の voxel は 50%が未抽出である。この 50%と voxel B はレーザーと日射の入射方向の差が小さい場合には樹冠の日射の透過・吸収に及ぼす影響は小さいと考えられる。しかしながら、入射方向の差が大きくなると影響が生じる可能性がある。航空機 LiDAR による LAD の推定精度の検証を踏まえて、このための補正方法の検討を行う。図 4-14 では、全体の抽出率が 8%低いこと以外は抽出できなかった要因も含めて、コース 1 とコース 3 の結果に大きな違いは見られない。しかしながら、枝の抽出率はコース 3 に比べて 15%低い。これはレーザーの天頂角がコース 3 に比べて大きいことから、樹冠の内部に到達するまでに葉の層を通過する距離が長いためと考えられる。

4.4.3　樹冠の投影面をもとにした樹冠外周部の高分解能化

4.2 では目標とする空間スケールを 0.5 m としたが、4.4.1 と 4.4.2 の結果から、実際に得られる情報の空間スケールは 1 m であった。LAD 分布を 1 m の空間スケールで再現することが日射の透過量、吸収量の推定精度に与える影響は、既往研究の結果を見ても明確にはできないが、樹冠の投影面積は明らかに過大推定される。そこで本研究では樹冠内部の葉群の分布は 1 m スケールの voxel により再現可能と仮定し、投影面積の算出に適用できるように樹冠の外形を高分解能化する方法を考える。図 4-16 に地上型 LiDAR データを 0.1 m ×

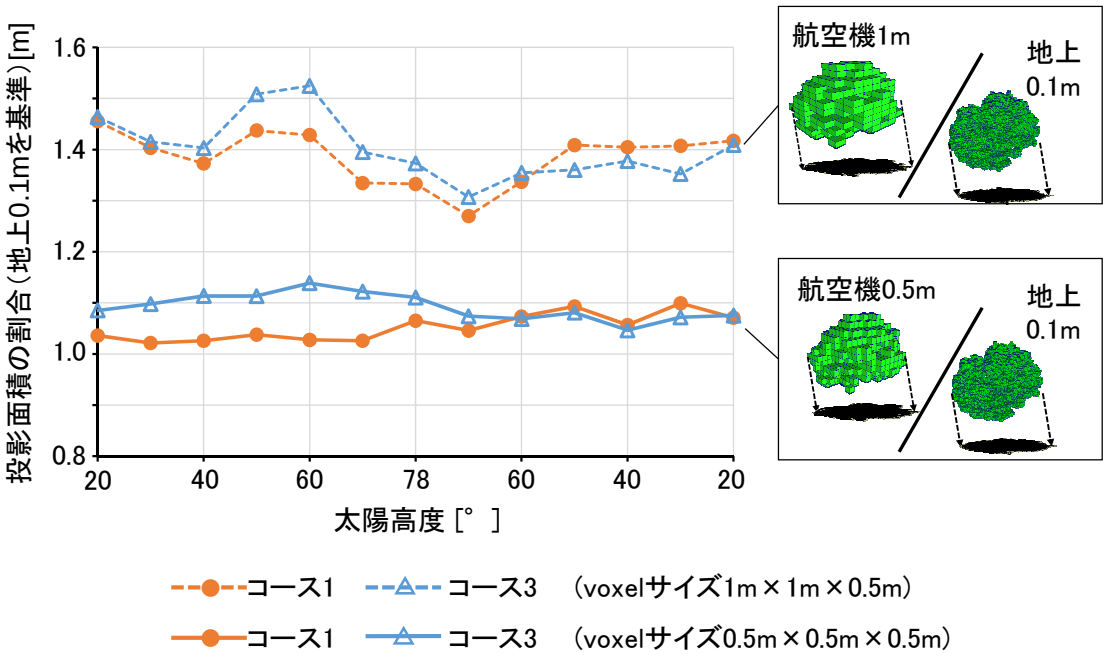


図 4-16　航空機 LiDAR により再現した投影面積の地上型 LiDAR により再現した投影面積に対する割合（航空機 LiDAR は 2 通りの voxel サイズで算出）

0.1 m × 0.1 m の voxel に分割し図 4-2 と同様に算出した投影面積に対する航空機 LiDAR データを 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m と 1 m × 1 m × 0.5 m の voxel に分割し算出した投影面積の割合を示す。横軸は太陽高度であり夏至の日を想定した太陽の動きを表している。1 m × 1 m × 0.5 m の voxel を用いた場合は、投影面積が平均で約 40%過大推定されている。0.5 m × 0.5 m × 0.5 m の voxel を用いた場合には、航空機 LiDAR と地上型 LiDAR の投影面積が太陽高度によらず近い値を示している。葉群の 3 次元的な分布を再現するためには 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m の voxel サイズは小さかったが、投影面の再現には適用できるといえる。これは 0.5 m の voxel により再現を行うと投影面積が過大推定側に算出されることと、航空機 LiDAR では抽出できない voxel があるため投影面積が過小推定側に算出されることが影響しているためである。図 4-17 に樹冠の外周部の voxel に限定した場合の voxel の抽出精度を示す。これは voxel サイズが 1 m × 1 m × 0.5 m の場合の結果を示している。抽出率はコース 1、コース 3 ともに全 voxel を対象とした場合に比べて小さい。抽出できない

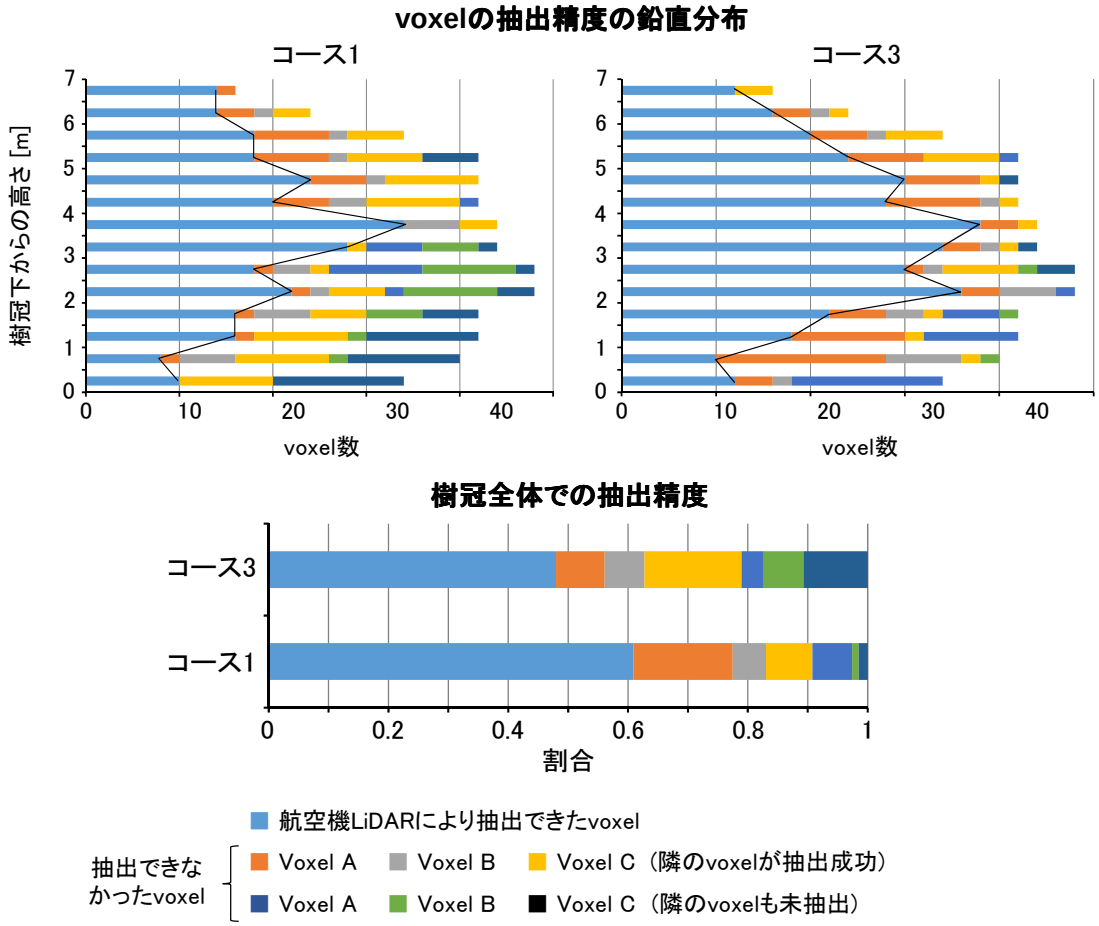


図 4-17　樹冠の外周部の voxel を対象とした場合の航空機 LiDAR により抽出できた voxel、できなかった voxel（Voxel A, Voxel B, Voxel C）、隣の voxel の抽出の有無の割合

voxel が存在しても投影面積の算出精度が低下しないのは、3 次元分布を投影して 2 次元化した場合には各高さにおける voxel の未抽出の影響が小さくなったためである。外周部の voxel を対象とした場合、コース 1 とコース 3 の差が大きくなっており、抽出率には 15%の差が見られる。この差が図 4-17 の午前（図の左側）におけるコース 1 とコース 3 の差につながっている。また、投影面積の算出精度は航空機からのレーザーの入射方向にも影響される。コース 1 は対象樹木の西側であるため、日射とレーザーの入射方向が近くなる午後にはコース 3 の結果と差がなくなっている。以上のように、航空機 LiDAR からのレーザーの入射方向によっても異なるが、誤差は 10%前後の差であり、航空機 LiDAR による 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m の空間スケールの情報は樹冠の投影面の再現には適用できる。

以上を踏まえ、図 4-18 に投影面の再現に適用できるように外形を高分解能化する方法を示す。まず、航空機 LiDAR データから 1 m × 1 m × 0.5 m voxel の LAD 分布を推定する。次に航空機 LiDAR データを 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m の voxel に分割して樹冠の投影面を作成する。この投影面から太陽方向に光線をトレーシングし、1 m × 1 m × 0.5 m voxel の LAD 分布を 4 分割（4 つの 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m の voxel に分割）したものと交点を判定する。光線が入射しなかった voxel は樹冠外と判断し、もとの LAD は樹冠と判断された 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m voxel に均等に分配する。

以上のように、本研究ではまず 1 m × 1 m × 0.5 m の voxel で LAD 分布を推定し、樹冠の投影面の再現に適用できるように樹冠の外周部を高分解能化する。次章では、第 2 章で提案した手法により LAD 分布を推定し、地上型 LiDAR による算出結果を用いて精度を検証する。

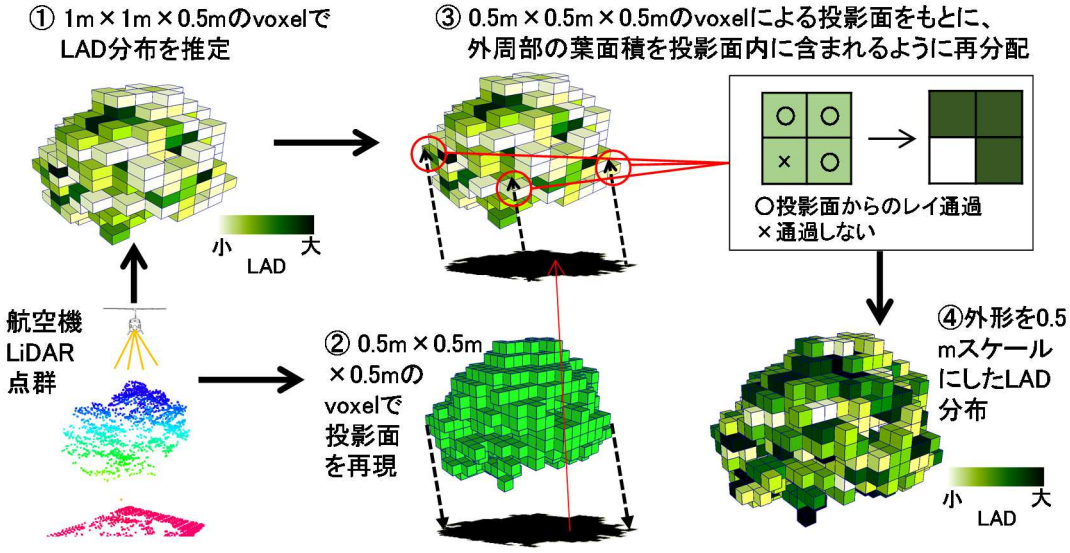


図 4-18　樹冠の投影面積をもとにした樹冠外形の高分解能化

4.5　航空機 LiDAR による LAD 分布の推定精度の検証

2 章で提案した手法により航空機データから検証対象のケヤキの LAD 分布を推定し、3 章で取得した地上型 LiDAR データを用いて推定精度を検証する。4.4 の結果から樹冠の航空機 LiDAR データを 1 m × 1 m × 0.5 m の voxel に分割して推定を行う。

4.5.1　LAD 分布の推定

はじめに、式(2-13)の $G(\theta)$を算出するための葉の傾斜角を設定する。3 章の結果から、葉の方位角については既往研究と同様に一様分布とする。地上型 LiDAR データから上部、中部、下部の葉群を選び葉の傾斜角を読み取った。図 4-19 に傾斜角の頻度分布を示す。3 章の小規模なケヤキと同様に水平な葉の割合は樹冠下部で最も多いが、どの高さも中間的な

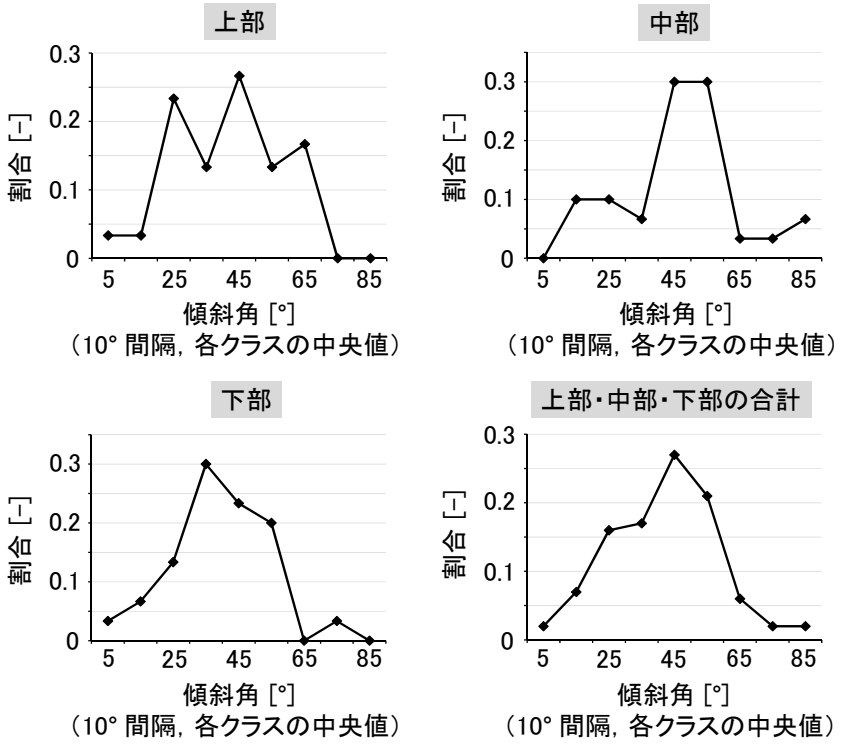


図 4-19　検証対象のケヤキの葉の傾斜角の頻度分布

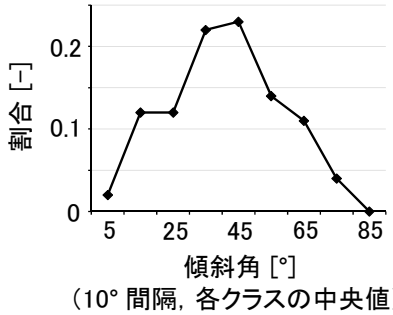


図 4-20　下條ら[4-5)]による街路樹の
ケヤキの葉の傾斜角の実測結果
（文献をもとに図を作成）

傾きを中心に正規分布に近い分布となっている。そこで樹冠全体で上部、中部、下部の平均の分布（図 4-19 右下）を用いることにする。図 4-20 に下條・吉田ら [4-5]による街路樹のケヤキの傾斜角の実測結果を示す。本研究の結果と同様に中間的な傾きの葉が多い。このように、樹木が健康に生育しているときの葉の傾きには樹種ごとに特徴があると考えられ、吉田ら [4-5] [4-6]の研究のように情報が整備されてゆくことで推定の際に使用することができる。また、水平に近い葉が多い、垂直に近い葉が多いなど傾斜角の分布を簡易的に表す経験的な関数 [4-7]やより多くの分布に対応できる楕円関数分布 [4-8]などが提案されている。そのため、図 4-19, 20 のように 10 度ごとの頻度が得られない場合であっても、中間的な傾斜角や分布の広がりなどの情報により樹種の特徴を踏まえて推定を行うことができる。

次に航空機 LiDAR データに対して LAD 分布を推定するための前処理を行った。図 4-21 に 2 章で取得した航空機 LiDAR の一部を示す。これは地表面を示しており、上部にレーザーを遮るものはなく、シングルパルスによる点の分布を示している。航空機 LiDAR の姿勢の変動によると考えられる点密度のむらや、数 cm 間隔と明らかにレーザーの間隔よりも狭い範囲での点の密集が確認できる。後者は 1 つのレーザーに対して複数のシングルパルスが存在しているような状態であった。以上のような状況が樹木においても生じた場合、葉の密度に関係なく点数が変化するため、推定誤差の要因になる。Hosoi et al.[4-9]のように small voxel に分割した上でレーザーのトレーシングを行う場合には点密度のむらの影響は少なくなる。本研究では、距離が 0.1 m 以内に他の点が存在した場合にはもとの点を取り除くことで、点密度が均一なデータを作成した（図 4-21）。このデータと上で設定した葉の傾き

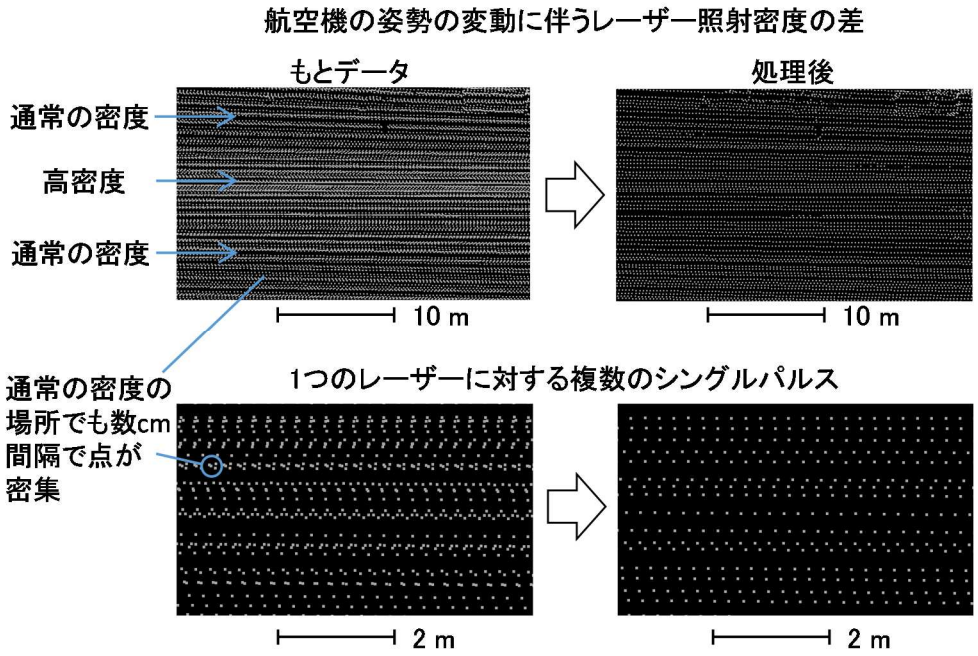
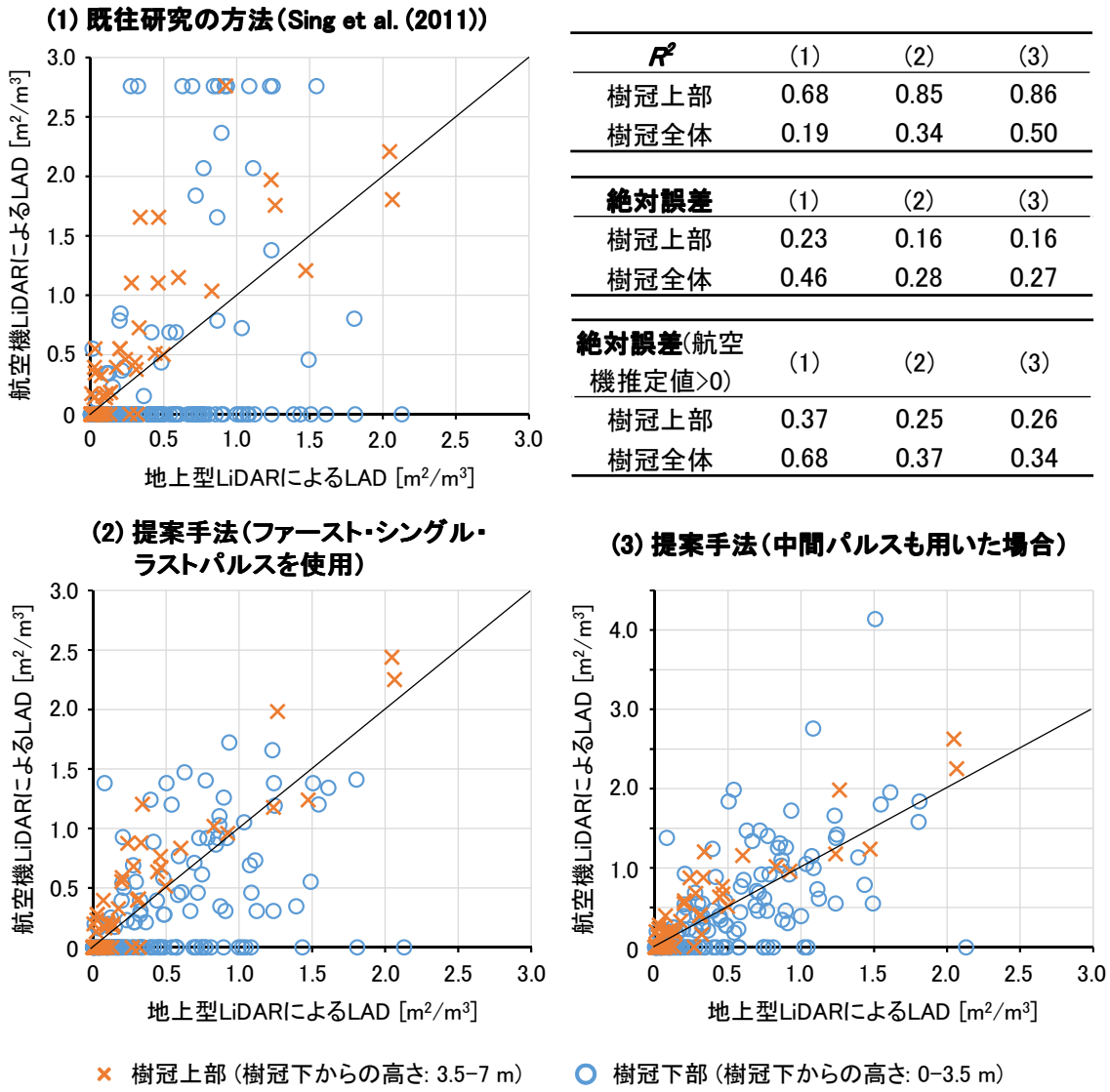


図 4-21　不均一な点密度の補正

を用いて、2.5 で提案した手法により LAD 分布を推定した。voxel 内の層の厚さは Hosoi et al.[4-9]と同様に 0.1 m とした。Hosoi et al.[4-9]の場合は、small voxel のサイズが 0.1 m × 0.1 m × 0.1 m であり、LAD 分布を表現する voxel サイズは 2 m × 2 m × 0.5 m であるため、5 層の 200 × 200 個の samll voxel で voxel が構成されている。また、本研究の推定では葉と枝を区別していない。地上型 LiDAR を用いた研究では落葉期のデータを用いて枝と葉を分離する方法などが用いられている [4-10] [4-11]が、航空機 LiDAR データでは落葉期のデータがあったとしても葉の点と枝の点の分離は難しい。そこで本研究では、plant area density (PAD)の推定を行った既往研究 [4-12] [4-13]と同様に枝と葉の点を区別せずに扱う。レーザーが遮蔽される確率を用いるため原理的には枝も扱うことができるが、枝と葉の傾きや分布の特徴は異なるため、今後の課題として落葉期の航空機および地上型 LiDAR データや常緑樹を真下から測定して枝の分布を捉えた地上型 LiDAR データを用いて枝の扱いを検討する。

4.5.2 提案手法による推定精度改善効果

図 4-22 に航空機 LiDAR により推定した LAD と地上型 LiDAR により算出した LAD の散布図を示す。これは最もレーザーの天頂角が小さく点密度が大きいコース 3 の結果である。3 章の結果から、地上型 LiDAR により高精度に LAD を推定することができる LAD 地上レーザー入射率 0.8 以上の voxel を用いている。(1)は既往研究[4-12]の手法で算出した結果を示しており、(2), (3)は本研究で提案した手法による結果を示している。(2)はファーストパルス、シングルパルス、ラストパルスを用いており、(3)はさらに中間パルスを加えた結果である。横軸の地上型 LiDAR の値は、第 3 章の結果を踏まえて 6%の誤差を補正済みである。散布図の各シンボルが 1 つの 1 m × 1 m × 0.5 m voxel を表しており、樹冠上部と下部でシンボルを分けている。また、図の右上には R^2値と絶対誤差（航空機による推定値と地上型 LiDAR による推定値の差の絶対値)。地上型 LiDAR の値も推定値であるため本来は誤差ではなく地上型 LiDAR との差であるが、地上型 LiDAR の精度は 3 章で確認しているため、ここでは誤差として扱う。(1)の既往研究の手法は樹冠のファーストパルスとシングルパルスの点から航空機の方向へトレーシングを行う Song et al.[4-12]の結果を示している。Hosoi et al.[4-9]の研究では航空機からのレーザーの照射位置の設定方法などが明確に示されていないことと、本研究のデータには各反射パルスにレーザーの発射位置の情報までは含まれていないことから、Hosoi et al.[4-9]の手法では算出しなかった。比較のために Hosoi et al.の論文における結果を図 4-23 に示す。Hosoi et al.の研究は、航空機 LiDAR と地上型 LiDAR の組み合わせにより群落の LAD の鉛直分布を推定手法提案しているものであり、論文に掲載されている結果には地上型 LiDAR による推定値と組み合わせによる推定値も記載されている。ここでは比較のために図を改変し航空機 LiDAR の結果のみを示している。



R^2	(1)	(2)	(3)
樹冠上部	0.68	0.85	0.86
樹冠全体	0.19	0.34	0.50

絶対誤差	(1)	(2)	(3)
樹冠上部	0.23	0.16	0.16
樹冠全体	0.46	0.28	0.27

絶対誤差(航空機推定値>0)	(1)	(2)	(3)
樹冠上部	0.37	0.25	0.26
樹冠全体	0.68	0.37	0.34

図 4-22　航空機 LiDAR と地上型 LiDAR により算出した LAD の散布図

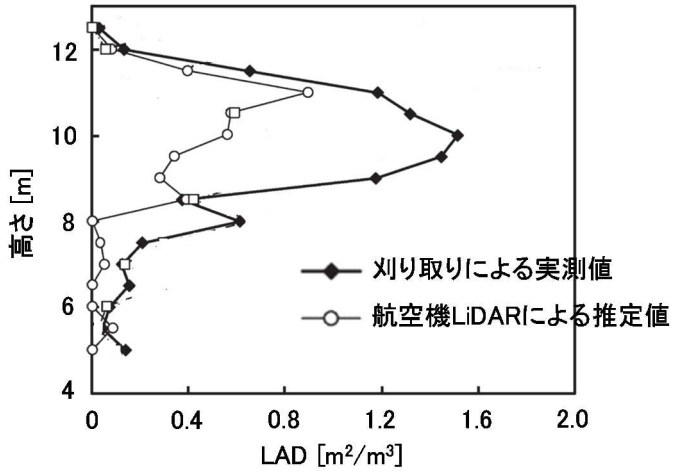


図 4-23　ケヤキ群落における LAD の鉛直分布の推定値（Hosoi et al.[4-9]）

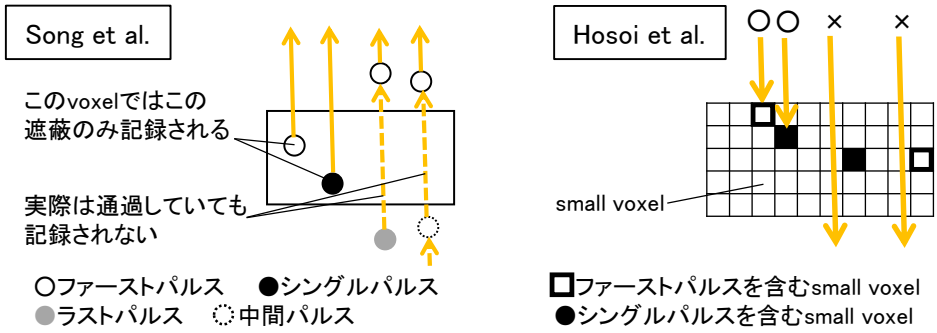


図 4-24　既往研究の推定手法の特徴

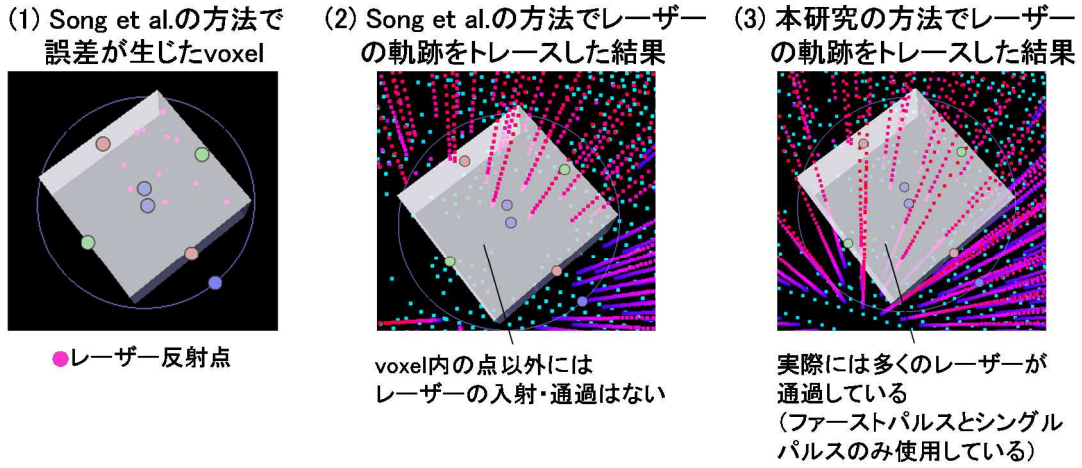


図 4-25　レーザーをトレースする方向が実際と異なることの影響

<u>樹冠上部の結果</u>

図 4-22(1)では、樹冠上部では過大推定されている voxel が多い。これは図 4-24 に示すように、実際には上部でファーストパルスが生じた残りのレーザーが voxel を通過した場合であってもそれは記録されずに、voxel 内のファーストパルスとシングルパルスの数のみがカウントされるためである。また、Song et al.はスキャンラインと飛行コースが直交すると仮定して、トレースする方向を決めている（図 2-19）。このため図 4-25 のように実際には数点のファーストパルスとシングルパルスによる点と、この voxel より下部でファーストパルスやシングルパルスを生じるレーザーの通過が含まれる voxel であっても、トレースの方向が正しくないために、レーザーの遮蔽だけが記録される。これにより式(2-13)の CF が増加し、LAD が過大推定される。これらの要因により、本来航空機 LiDAR による推定が有利な樹冠上部であっても推定値がばらついており、R^2 値は 0.68 である。これに対し、Hosoi

et al. の結果では、樹冠上部であっても過小推定される傾向にある。これは図 4-24 に示すように、実際には葉や枝に遮蔽されるレーザーをトレースしていても、レーザーの反射点を含む voxel にレイが入射せずに、空の voxel を通過して下部へ進んでいくためであると考えられる。Hosoi et al.は 0.26～0.29 m のレーザー間隔に対し 0.1 m × 0.1 m × 0.1 m の small voxel を用いていたため、このような誤差が生じやすかったと考えられる。以上のような既往研究の特徴に対し、本研究で提案した手法では、ばらつきが少なくなり 1 対 1 のラインに近づいている。上部では(2)と(3)の差はほとんどなく、R^2値は 0.85 と 0.86 であり高い相関を得た。また絶対誤差 0.16 m^2/m^3 であり、既往研究の手法による推定誤差を改善している。

樹冠下部の結果

図 4-22(1)では、樹冠下部では大部分の voxel の推定値が 0 になっている。これは樹冠下部の voxel はファーストパルスやシングルパルスを含まないためである。Song et al.の手法を用いた結果では、上部では大幅に過大推定されている voxel が多く、反対に下部では LAD が 0 と推定される voxel が多く、実際の LAD 分布をほとんど表現していない。樹冠全体では R^2値が 0.19 であり、推定値と実際の LAD の間には明確な相関関係が見られない。Hosoi et al.の結果でも同様に中部から下部では大幅に LAD が過小推定されている。これに対し、提案した手法では、まずラストパルスを使うことで、樹冠下部でも多くの voxel が 1 対 1 のラインに近づいている。LAD の絶対誤差は 0.46 m^2/m^3 から 0.28 m^2/m^3 に大幅に改善された。しかしながら R^2値は 0.34 であり、ばらつきが大きい。次に中間パルスも加えると、0 と推定されていた voxel や LAD が小さい voxel において精度が改善され、R^2値は 0.5 まで改善された。LAD が 0 と推定される voxel も存在するが、4.4 で示した通りその voxel の多くは LAD が小さい。航空機 LiDAR による推定値が 0 より大きい voxel を見ると、推定誤差は 0.68 m^2/m^3 から 0.34 m^2/m^3 となっており、ラストパルスや中間パルスを使うことで単に 0 と推定される voxel が減少しただけでなく推定精度自体が改善されている。以上から、ラストパルスと中間パルスを用いた提案手法の有効性を確認した。

提案手法の推定誤差

提案した手法の結果において、樹冠上部では、LAD が小さい領域において過大推定になっている voxel が多い。これは、LAD が小さい voxel であっても大きい voxel であっても、各点を 1 つのレーザーが遮蔽されたとカウントしている（式(2-13)の $n_l(k)$に 1 を加える）ためである。上空から地上を観測しているため、シングルパルスを返したレーザーについてはフットプリント内の葉の量の差は小さい（葉の量が少なくなると下の枝葉や地面でさらなる反射パルスを生じるためシングルパルスではなくなる）。一方で first パルスを返した

レーザーについてはフットプリント内の葉の量はばらつきが大きい。LAD が小さい voxel では、first パルスを返したレーザーのフットプリント内の葉の量は少ないと考えられ、これを LAD が大きい voxel と同様に 1 とカウントすると過大推定につながる。

樹冠下部で推定値のばらつきが多くなっていることは、推定手法の原理を考えるとよく理解できる。過小推定側に働く要因としては、樹冠全体では 2 章で述べたクランピングと言われるように、光線が消散されていくとランダム分布の場合に比べて葉に当たる確率が小さくなることが挙げられる。しかしながら、一部のレーザーは図 3-4(1)のように葉に当たりやすくなっており、voxel を通過するよりも遮蔽される確率が高くなり LAD が過大推定されている。中間パルスを用いた場合に極端に過大推定になっている voxel はこのことが原因である。この過大推定と過小推定のバランスは、樹冠構造によって変化すると考えられる。

提案手法の課題点

提案した手法の今後の課題として、反射強度を用いた手法に改良することが挙げられる。レーザーのフットプリント内の葉の量はレーザーの反射強度に関係すると考えられる。そのため、反射強度を用いることで 1 つのレーザーのフットプリント内の葉の量による誤差を改善できる可能性がある。また、これは樹冠下部での過大推定の改善にも寄与する。反射強度を用いた手法のためには、式(2-13)の $n(k)$と反射強度の対応を検討する必要がある。

4.5.3 推定誤差と航空機からのレーザー入射数の関係

Hosoi et al.[4-9]は、航空機 LiDAR データから誤差が大きくなる voxel を推定できるように laser coverage index Ω を提案した。これは、voxel 内の各層をレーザーのフットプリントが覆う面積や LiDAR の測定方法、voxel に到達するまでの経路により表される指標であり、指標値が小さくなると推定誤差が大きくなるというものである。しかしながら、ラストパルスや中間パルスではレーザーのフットプリントの面積は不明である。また、1 の面積を持つ 2 つのレーザーの方が、2 の面積を持つ 1 つのレーザーよりも推定精度が高いと考えられる。このような点から、voxel へ入射するレーザー数が推定精度を考察する上で重要となる。図 4-26 に航空機からのレーザーの入射数と LAD の推定値の絶対誤差の関係を示す。ファーストパルス、シングルパルス、ラストパルス、中間パルスを用いたときの誤差を示しており、レーザーの入射数の各クラスで誤差を平均している。誤差はレーザーの入射数のクラス 8-11 における 0.2 m^2/m^3 まで急激に低下していき、そこからレーザーの入射数が増えても誤差の変化は小さい。航空機からのレーザーが 1 m × 1 m × 0.5 m の voxel あたり 8 以上入射数するということが推定精度を確保する条件になる。

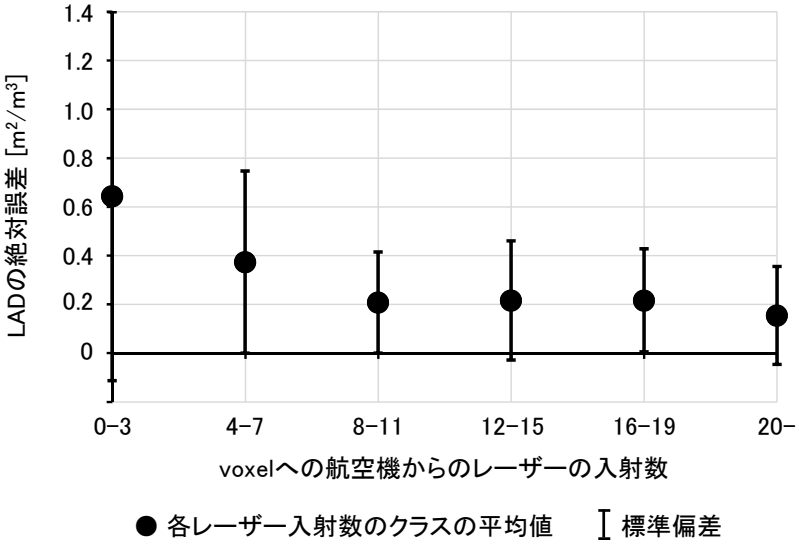


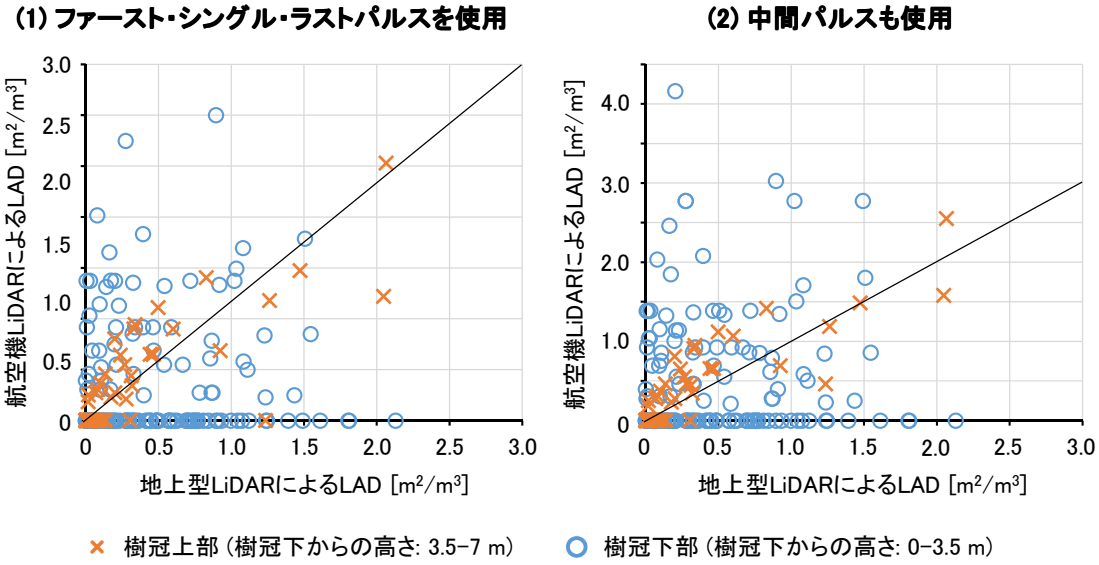
図 4-26　voxel へ入射する航空機からのレーザー数と推定誤差の関係

4.5.4　レーザーの入射条件の違いが推定精度に及ぼす影響

4.5.2 では、天頂付近からレーザーが入射しレーザーの密度も高いという LAD の推定に有利な条件で精度を確認した。次に、最もレーザーの天頂角が大きくレーザーの間隔も広いコース 1 のデータを用いることで、レーザーの入射条件が変わることの影響を検証する。図 4-27 にコース 1 のデータを用いて推定した LAD と地上型 LiDAR による LAD の散布図を示す。図 4-22 の(2), (3)と同様にファーストパルスとシングルパルスにまずラストパルスを加えた場合とさらに中間パルスを加えた場合を示している。コース 1 では、対象樹木に対して入射するレーザーの天頂角が大きくなるため、樹冠の観測コースから遠い側にレーザーが届きにくく、樹冠上部であっても過小推定されている voxel がある。樹冠下部では、コース 3 の結果に比べて、0 と推定される voxel が多いことと、過大推定される voxel が増えるという違いがある。R^2 値や絶対誤差は低下するものの、大きくは変化していない。図 4-28 にはコース 1 からのレーザーの入射数と推定誤差の関係を示す。コース 3 に比べてレーザーの間隔が広がるため、入射数 20 以上の voxel は存在しない。入射数 8-11 のクラスからは誤差の変化が小さいことはコース 3 と同様であり、誤差の値もコース 3 と比べてほとんど変化しない。LAD の推定値よりも抽出できていない voxel が増えていることが熱環境の評価には影響すると考えられる。

4.5.5　他の樹種への適用性の検討

レーザーの入射条件の変化に続いて、樹冠の形状が異なる樹木での精度を確認する。卵形



R^2	(1)	(2)
樹冠上部	0.67	0.76
樹冠全体	0.40	0.45

絶対誤差	(1)	(2)
樹冠上部	0.18	0.17
樹冠全体	0.31	0.33

図 4-27　航空機 LiDAR と地上型 LiDAR により算出した LAD の散布図(コース 1)

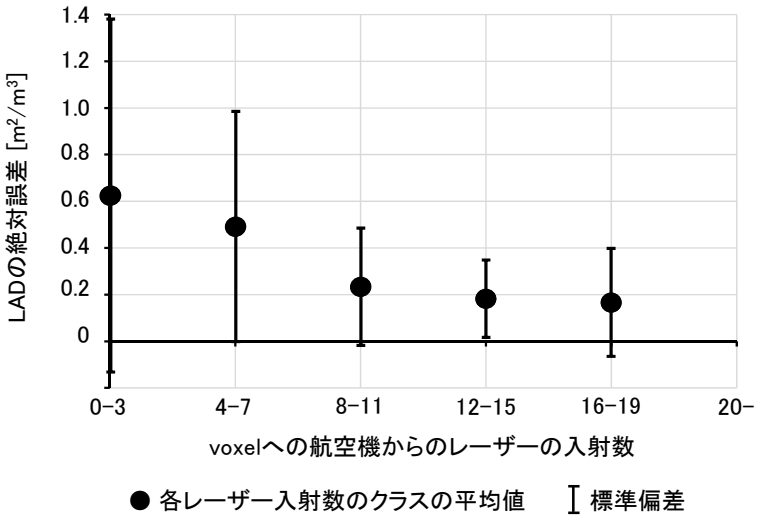


図 4-28　voxel へ入射する航空機からのレーザー数と推定誤差の関係（コース 1）

の樹形でありケヤキとは形状の特徴が異なるクスノキを対象とする。ケヤキと同様に一般的な密度のクスノキを選び解析に用いた。図 4-29 に対象樹木の位置と地上での測定方法を示す。クスノキはコース 2 の直下に存在しており、樹高は 14 m、樹冠高さは 10 m である。

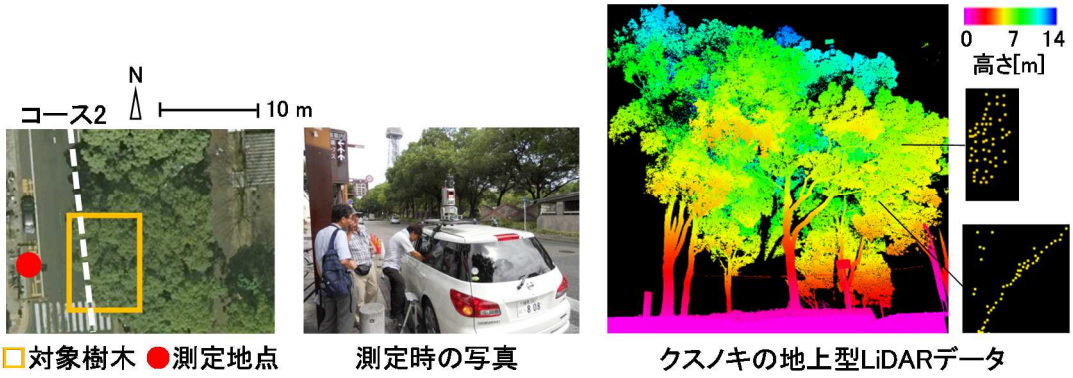


図 4-29　地上型 LiDAR によるクスノキの測定

図 4-29 のように車道からクスノキの並木の一部を測定した。使用したレーザースキャナやレーザーの照射はケヤキと同様である。樹冠全体を測定できる位置にレーザースキャナを設置することができなかったため樹冠下部を主な対象として測定した。これにより航空機 LiDAR による推定が不利になる部分で検証を行うことができる。クスノキについては、地上型 LiDAR の精度を刈り取りにより確認していない。しかしながら、地上からのレーザーの入射条件がよい voxel（地上レーザー入射率 0.8 以上）のみを用いるため、ケヤキと同様に広葉樹であるクスノキでは voxel 内部の葉の分布の差は小さく、推定精度の差も小さいと考えられる。樹冠中部から上部にかけての情報を得ることができなかったため、葉の傾斜角は吉田らのクスノキに対する実測値を使用した [4-5) 4-6)]。

図 4-30 に航空機 LiDAR のコース 2 のファースト、シングル、ラスト、中間パルスを用いてデータを使用して推定した LAD と地上型 LiDAR により算出した LAD の散布図を示す。航空機 LiDAR による推定値が 0、すなわち抽出できなかった voxel の割合がケヤキの結果（図 4-22）に比べて多いが、これは使用した voxel（地上レーザー入射率 0.8 以上）が樹冠下部に多く存在したためである。voxel の抽出率自体は、クスノキの方がケヤキに比べて樹冠が長いにも関わらず、ケヤキと同程度であった（図 4-31）。使用している voxel の位置の差が出ないように航空機 LiDAR で抽出できた voxel でケヤキと比較する。クスノキの結果もケヤキと同様に、既往研究の手法を用いた場合のように推定値がばらつかずに地上型 LiDAR による推定値と対応している。しかしながら、ケヤキに比べると過大推定される voxel が多く、推定誤差は樹冠上部で 0.34 m^2/m^3、全体では 0.41 m^2/m^3 ケヤキに比べてともに 0.07～0.08 m^2/m^3 大きい。図 4-32 の voxel に入射した航空機からのレーザーの数と推定誤差の関係を見ても、ケヤキよりも入射数が多い段階で誤差が増加しており、全体として

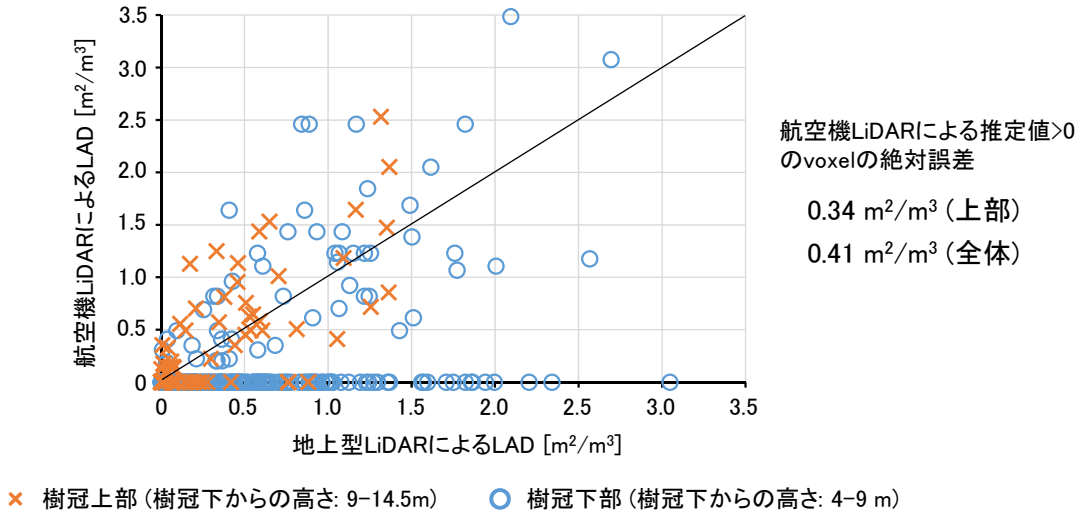


図 4-30　航空機 LiDAR によるクスノキの LAD の推定精度

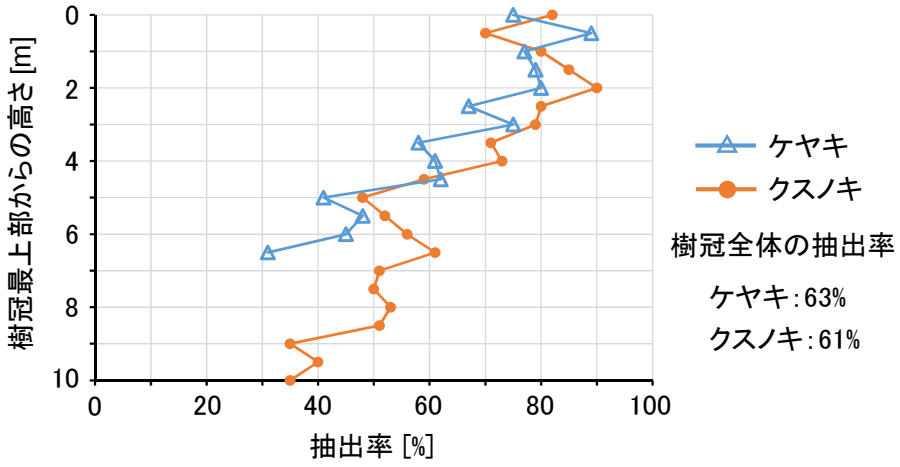


図 4-31　枝葉を含む voxel の抽出率のケヤキとクスノキの比較

も誤差の値が大きい。このような誤差の原因として、クスノキの方がシングルパルスの割合が低く、1 つのレーザーに対する複数の反射パルスを生じやすかったため、反射パルスを返したレーザーのフットプリント内の葉の量の問題（4.5.2 提案手法の推定誤差）で過大推定が多くなったためと考えられる。クスノキにおいて 1 つのレーザーに対する複数の反射パルスを生じやすい理由は、ケヤキは杯型の樹冠で葉が上部に密集しているのに対し、クスノキは卵型の樹形で樹冠全体に葉が分布しており、葉群単位で見るとケヤキに比べて空隙が多いことが影響していると考えられる。2 章で検証対象樹木を選んだときのように、ケヤキ、クスノキ、イチョウ、トウカエデにおいて樹冠に入射したレーザー対して、複数の反射パルスを返したレーザーの割合を調べたところ、クスノキと他の 2 種は 60%であったのに対し

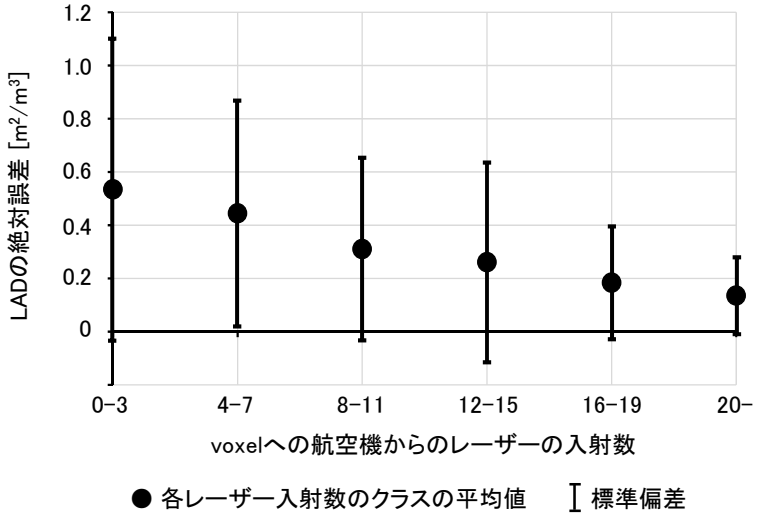


図 4-32　クスノキにおける voxel への航空機からのレーザーの入射数と推定誤差の関係

ケヤキは 55%であった。今回詳細に検証したケヤキだけでなくより多くの樹種に適用していくためにも、反射強度を用いることでレーザーのフットプリント内の葉の量を考慮できる手法について今後研究を行う。

4.5.6　航空機 LiDAR により抽出できなかった voxel の補正

図 4-33 に 4.4 と 4.5 の検証内容のまとめを示す。航空機 LiDAR により葉の voxel のうち 69%を抽出できた。これらについては LAD を推定できており、その推定精度は既往研究の手法に比べて改善された。また、voxel 内の葉にレーザーが入射したとしてもセンサが識別できる強度の反射パルスを返さない、すなわち葉が少なく樹冠の再現に及ぼす影響が小さい voxel（4.4.2 Voxel A）が 14%である。また、枝については抽出できた voxel は 50%である。4.5.1 で述べたように枝については既往研究と同様に扱っており、葉と枝の傾きや分布特性を考慮することは今後の研究の中で地上型 LiDAR による枝の分布や冬季の航空機 LiDAR を用いて検討を行っていく。残りの葉の 17%と枝の 50%についても、航空機からのレーザーと日射の入射方向が近い場合には、樹冠の日射の透過・吸収に及ぼす影響は小さいと考えられる。しかしながら、入射方向に差がある場合には影響が生じる可能性がある。そこで、推定した LAD 分布を用いて、抽出できなかった voxel の補正を行う。図 4-34 に周囲に枝葉を含む voxel が N 個以上存在する voxel のうち、中心の voxel が枝葉を含む確率を示す。N は 1～8 である。ここで枝葉を含むとは地上型 LiDAR のレーザー反射点を含むということである。周囲に 1 つでも枝葉を含む voxel が存在する場合は、その voxel が枝葉

を含んでいる割合は 60%と低いが、周囲に 8 個存在する場合は中心の voxel も必ず枝葉を含んでいることを示している。図 4-34 によると、周囲に枝葉を含む voxel が 5 個以上存在する場合は中心の voxel も 96%が枝葉を含んでいる。このような voxel を補正の対象とし、航空機 LiDAR により抽出できなかった voxel のうち周囲に 5 個以上抽出された voxel が存在する場合補正を行うことにする。葉や枝が多く存在する領域では、抽出できなかった場所にも多くの枝葉が存在すると考え、周囲の LAD の平均値を補正対象の voxel の LAD とする。補正が適用される voxel の半数は枝が占める voxel であった。そのため、枝が占める voxel も含めて地上型 LiDAR データと比較した結果、誤差は 0.35 m^2/m^3 であった。航空機 LiDAR により抽出された voxel での推定誤差（図 4-22）と同程度であったため、この補正を採用することにする。

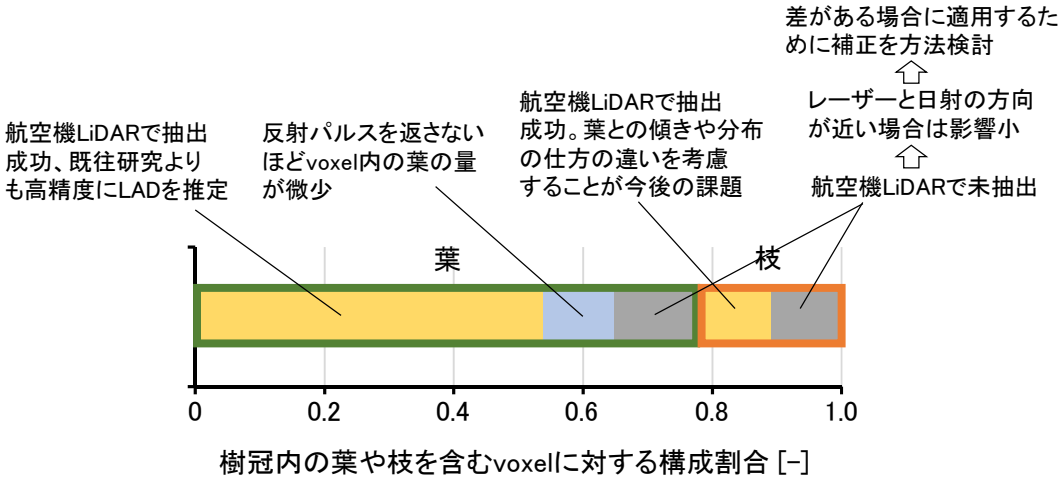


図 4-33　航空機 LiDAR による枝葉を含む voxel の抽出精度

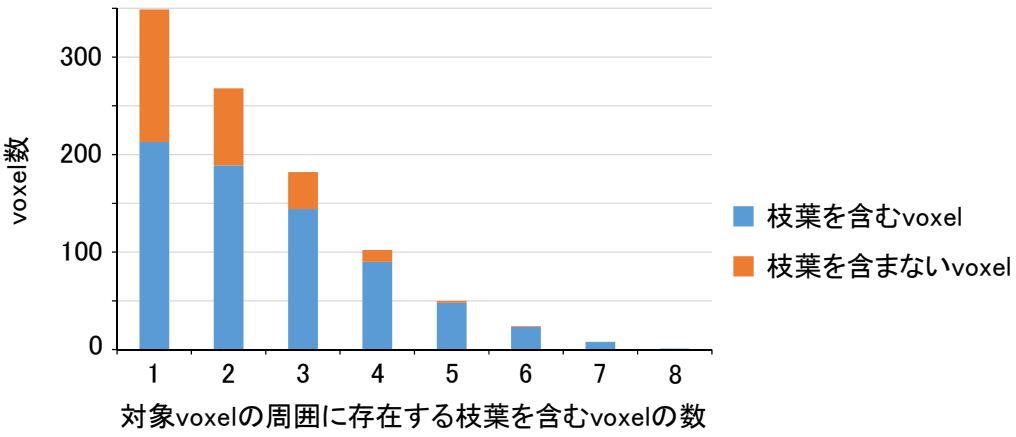


図 4-34　周囲の枝葉を含む voxel の数と中心の voxel に枝葉が含まれる割合の関係

4.5.7　推定したLAD分布の可視化

図 4-35 に提案した手法で推定した LAD の 3 次元分布を示す。検証対象のケヤキとそれに比べ生育状況が良好ではないケヤキ、樹冠下部が剪定され上部に葉が密に存在するケヤキを示した。これらは、1 m × 1 m × 0.5 m の voxel で推定した LAD 分布に対し、4.4.3 で述べた方法により外形を高分解能化した結果である。そのため、樹冠内部は 1 m × 1 m × 0.5 m の voxel で、外周部は場所によっては 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m の voxel で表現されている。図の最上段の 3 次元分布を見ると、(2)では(1)に比べて樹形が乱れている様子が再現されている。(3)は都市のケヤキに多く見られる剪定であり、樹冠下部が刈り揃えられて平坦な樹冠になっている。推定した 3 次元分布でも(1), (2)に比べて樹冠が薄いことが再現されている。鉛直断面図は、voxel 1 つ分の幅（奥行き 1 m）を表している。東西断面を見ると(2)は(1)に比べて分布が不均一になっている。南北断面では樹冠の形状が認識できるが、(1)に比べて密度が小さい voxel が多い。(3)では、樹冠は薄いが葉が密集している状態が再現されている。樹冠も(1), (2)に比べて大きく日射遮蔽効果が期待できることが分かる。水平断面図は樹冠上部の最も密な層を示している。鉛直断面図と同様に voxel 1 つ分の厚さ（0.5 m）を現している。ここでも(2)は(1)に比べて密度が低いことが見てとれる。(3)ではある層と一つ下の層を示している。距離方向の分解能が高いセンサを用いたため 0.5 m の厚さの voxel であっても各層で情報が取得できている。以上のように提案した手法で推定した情報が各樹木の特徴を現していることが確認できた。次章ではこの情報を使って樹木の日射遮蔽効果と蒸散作用の評価を行う。

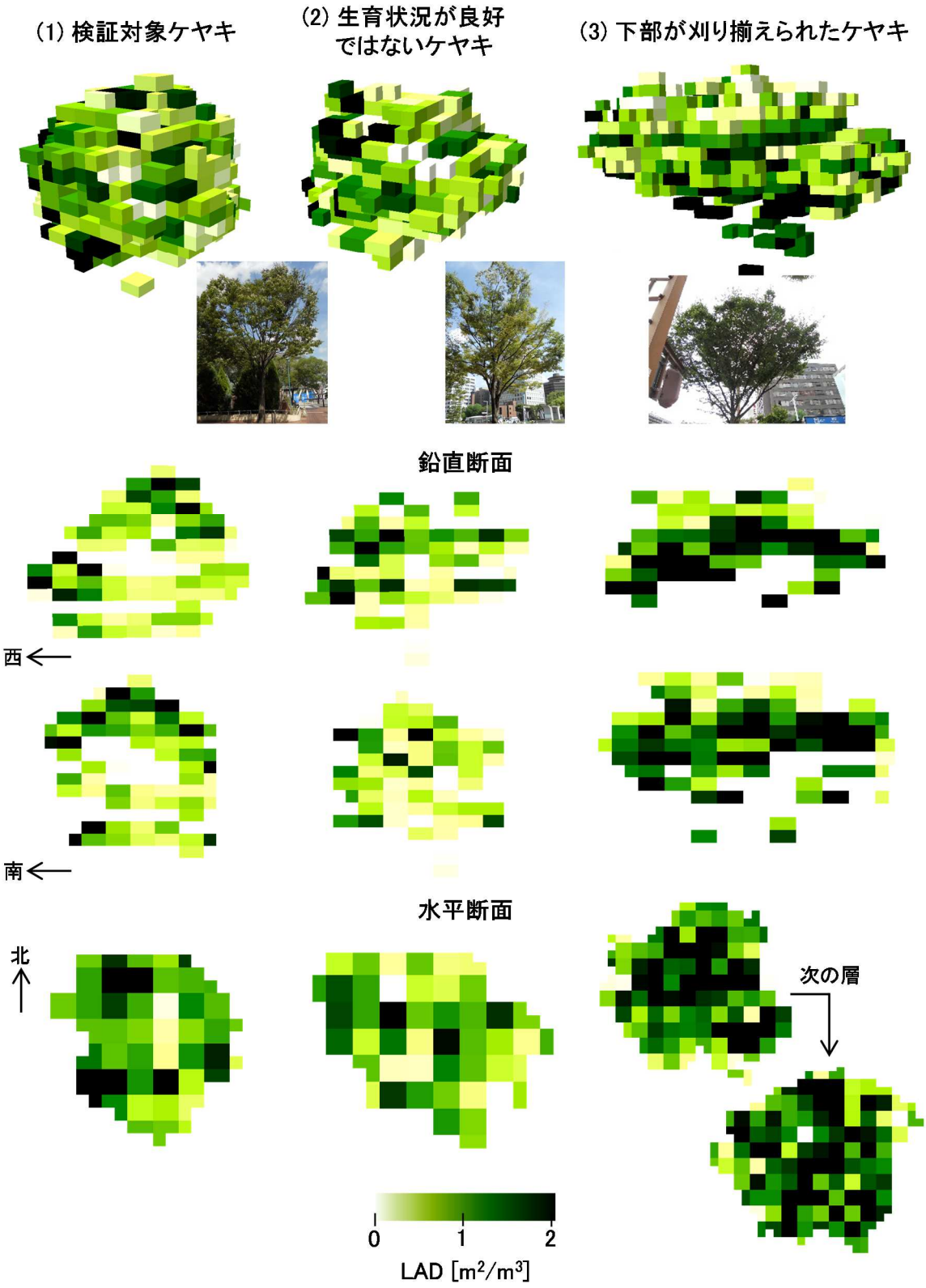


図 4-35　本研究で提案した手法によりで推定したケヤキの LAD の 3 次元分布

4.6 まとめ

2 章で提案した手法により樹木の 3 次元情報を推定し、3 章において検討を行った地上型 LiDAR による方法を用いて推定精度を検証した。

樹木 3 次元情報に求められる空間スケール

はじめに、推定する 3 次元情報に求められる空間スケールについて検討した。日射遮蔽効果の評価の面から、樹冠の投影面の再現性をもとに求められる空間スケールを決定した。地上型 LiDAR データを用いて投影面を再現した結果、0.5 m を 3 次元情報に求められる空間スケールとした。この値は対象とする樹木の形状や大きさにより異なると考えられるが、本研究で対象とする一般的に都市緑化に用いられるサイズの単木樹またはより規模が大きい並木・群落には適用できると考えられる。

航空機 LiDAR により得られる情報の空間スケール

voxel 化を行って 3 次元情報を推定する前に、航空機 LiDAR データ自身が推定に適した空間スケールを有しているかを確認した。航空機 LiDAR と地上型 LiDAR の点群を比較した結果、天頂付近から高密度にレーザーが照射される条件では、樹冠上部において 0.5 m の空間精度であった。樹冠下部では 1 m であったため、航空機 LiDAR により得られる情報の空間スケールを検討する際には 0.5 m だけでなく 1 m の voxel サイズも用いた。航空機 LiDAR データと地上型 LiDAR データを voxel に分割し、点を含む voxel の分布の比較を行い、航空機 LiDAR データから樹木の 3 次元情報を推定するためには 1 m × 1 m × 0.5 m の voxel サイズが適していることを示した。このとき抽出できていない voxel も存在したが、その多くは voxel 内の葉にレーザーが入射してもセンサが認識可能な反射パルスを返さないほど葉が少ない voxel であった。しかしながら、目標となる 0.5 m の voxel サイズの情報を得ることは難しいため、まず、1 m × 1 m × 0.5 m の voxel で LAD 分布を推定し、その後、樹冠の投影面の再現に適用できるように外形を高分解能化する方法を用いることにした。

LAD 分布の推定精度

1 m × 1 m × 0.5 m の voxel で LAD 分布を推定し、地上型 LiDAR と比較して精度を検証した。樹冠上部では R^2 値が 0.86 という高い相関を得た。樹冠全体でも、既往研究の手法による推定誤差 0.46 m^2/m^3 から 0.27 m^2/m^3 に精度が改善した。中間パルスも用いることで

R^2 値も 0.5 まで向上した。以上から、提案した手法により既往研究の手法よりも高精度に LAD 分布を推定できることを明らかにした。レーザーの天頂角が大きくなると樹冠全体での誤差が増加したが、これが熱環境評価に与える影響は次章で検討する。クスノキについても、航空機 LiDAR による LAD が地上型 LiDAR による LAD と対応したが、樹冠上部、下部ともにケヤキに比べて誤差が 0.06～0.07 m^2/m^3 大きかった。これはクスノキの方が樹冠内の空隙が多いという樹冠構造の違いによると考えられる。また、推定した LAD 分布を用いて、航空機 LiDAR により抽出できなかった voxel の補正を行うこととした。

LAD の推定手法に関する今後の課題

推定手法としての改良点：レーザーのフットプリント内の葉の量の違いによる推定誤差の改善が挙げられる。レーザーのフットプリント内の葉の量はレーザーの反射強度に関係するため、推定手法に反射強度を組み込む方法を検討する。また、これは樹冠下部での過大推定の改善にも寄与する。反射強度を用いた手法のためには、式(2-13)の $n(k)$ と反射強度の対応を検討する必要がある。今回は可能な限り樹冠全体を捉えるように測定した地上型 LiDAR データを用いたが、樹冠内の一部に限定してより詳細に葉や枝の分布と傾きを捉えたデータを用いた検証などが考えられる。

本研究では枝については、既往研究と同様に葉の点と枝の点を区別せずに扱った。実際には傾きや樹冠内での分布の特徴は葉と枝で異なると考えられる。また、蒸散作用に大きく影響する葉による光合成有効放射の吸収量を推定するためにも葉と枝を分けておく必要がある。落葉期の航空機および地上型 LiDAR データや常緑樹の真下から測定し枝の分布を捉えた地上型 LiDAR データなどを用いて枝の扱いについて検討を行う。

手法の適用範囲：本研究では、平均的な樹冠の形態の特徴を持ったケヤキを対象に検証を行った。そのため、提案した手法により精度を改善できることや得られた推定誤差のオーダーは一般的な広葉樹に適用できると考えられる。反射強度を用いた手法を検討する際には、より葉が密な樹木や疎な樹木に対しても適用できることや、樹種ごとの樹冠構造の違いによる樹種間の推定精度の違いも改善できることを示すことができるように、検証対象の樹木を選定する必要がある。また、樹冠構造が異なる針葉樹を対象とした検証も今後の課題となる。

引用文献

4-1) 伊藤拓弥, 松英恵吾, 内藤健司:航空機LiDARによる樹冠の再現性, 日本森林学会誌, 91(5), pp.326-334, 2009.

4-2) A. Kato, M. Moskal, P. Schiess, E. Swanson, D. Calhoun and W. Stuetzle：Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne lidrar data, Remote Sensing of Environment, 113, pp.1148-1162, 2009.

4-3) Y. Wang, H. Weinacker and B. Koch：A LiDAR point cloud based procedure for vertical canopy structure analysis and 3D single tree modeling in forest, Sensors, 8, pp.3938-3951, 2008.

4-4) T. Sasaki, J. Imanishi, W. Fukui, F. Tokunaga and Y. Morimoto：Fine-scale replication and quantitative assessment of forest vertical structure using LiDAR for forest avian habitat characterization, Forest Science and Technology, 8(3), pp.145-153, 2012.

4-5) 下條正貴, 吉田伸治, 大岡龍三 ：街路樹の樹冠についての工学的深さ, 葉面積密度, 入射角度特性の実測, 日本建築学会 2003 年度大会（東海）学術講演梗概集, D-1 環境工学 I , pp.609-610, Sep. 2003.

4-6) 吉田伸治, 中井敦, 大岡龍三 ： 樹木の成長, 樹種の違いが樹冠の葉面積密度・光学的深さに及ぼす影響－実測に基づく街路樹の日射遮蔽効果の評価手法に関する研究－, 日本建築学会環境系論文集, (605), pp.103-110, 2006.

4-7) N. Bunnik：The multispectral reflectance of software radiation of agricultural crops in relation with their morphological and optical properties, Mededelingen landbouwhogeschool, Wageningen, 1978.

4-8) A. Kuusk：A fast, invertible canopy reflectance model, Remote Sensing of Environment, Vol.51, pp.342-350, 1995.

4-9) F. Hosoi, Y. Nakai and K. Omasa：Estimation and error analysis of woody canopy leaf area density profiles using 3-D airborne and ground-based scanning lidar remote sensing techniques, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48(5), pp.2215-2223, 2010.

4-10) F. Hosoi and K. Omasa：Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44(12), pp.3610-3618, 2006.

4-11) F. Hosoi and K. Omasa：Factors contributing to accuracy in the estimation of the woody canopy leaf area density profile using 3D portable lidar imaging, Journal of Experimental Botany, 58(12), pp.3463-3473, 2006.

4-12) Y. Song, M. Maki, J. Imanishi and Y. Morimoto：Voxel-based estimation of plant area density from airborne laser scanner data, Proceedings of the ISPRS Workshop Laser Scanning, Calgary, Canada, XXXVIII-5/W12, pp.209-212, 2011.

4-13) T. Takeda, H. Ogura, T. Sano, Y. Yone and Y. Fujimura：Estimating the plant area density of Japanese larch (Larix kaempferi Sarg.) plantation using a ground-based laser scanner, Agricultural and Forest Meteorology, 148(3), pp.428-438, 2008.

第 5 章

都市空間における樹木の熱環境緩和効果の評価

5.1 はじめに

本章では、本研究で提案する手法により推定した樹木の 3 次元情報を用いて、実際の都市空間における樹木の熱環境緩和効果を評価する。葉の粗密や樹種の違い、樹木周辺の建物の影響を考慮して日射遮蔽効果と蒸散作用を評価することで、本研究により整備が可能となる樹木の 3 次元情報の有用性を示す。

日射遮蔽効果と蒸散作用を評価するために、航空機 LiDAR により推定した樹木の 3 次元情報と既往の植生の放射伝達シミュレーションを用いる。植生の放射伝達シミュレーションは、樹木の形態情報から日射遮蔽効果の評価に必要な日射透過率と、蒸散作用の評価に必要な樹冠による光合成有効放射（PAR)の吸収量（APAR)を算出するものである。第 4 章では、提案した手法により既往研究の手法に比べて高精度に LAD 分布を推定できることを示した。しかしながら、本研究の目的である「環境の評価のための樹木の 3 次元情報の整備」という観点からは、精度を改善した結果の LAD 分布が都市熱環境の評価に耐え得るものでなければならない。森林では、数 10m スケールのプロットにおけるサンプル調査により樹高や LAI など樹木の形態情報と生産量の関係を得ておき、航空機 LiDAR などのリモートセンシングによる広範囲の樹高や LAI から森林の機能を評価している。森林を対象とした場合、必要な樹木の形態情報は LAI や樹高であることが多く、地上でのサンプル調査の蓄積も豊富であるため、リモートセンシングによる推定において目標となる精度は経験的に決まっている。しかしながら、LAD 分布という単木の具体的な形態を再現して、樹冠による日射の吸収量・透過量を推定する場合には、求められる精度は明らかではない。そこで本研究では、検証対象ケヤキの樹冠下における光環境を実測することで、提案した手法による樹木の 3 次元情報と既往の植生放射伝達シミュレーションによる、樹冠における日射の透過量・吸収量の予測精度を検証する。その上で、3 次元情報と放射伝達シミュレーションを用いた方法を実在街区に適用し、樹木の日射遮蔽効果と蒸散作用を評価する。

5.2　熱環境緩和効果の予測・評価方法

5.2.1　熱環境緩和効果の評価項目

図 5-1 に航空機 LiDAR により推定した樹木の 3 次元情報を用いて熱環境緩和効果を予測する方法を示す。日射遮蔽効果の評価は、樹冠の日射透過率を用いて行う。樹冠を透過してくる日射には、直達日射、天空日射、反射日射の 3 成分と、それぞれ樹冠の空隙を抜けた成分と樹冠内で散乱された成分がある。2 章で述べたように、日射遮蔽効果の評価には第一には樹冠の空隙を通過する成分を考えることが重要であるため、本研究では空隙の通過を扱うこととする。現行の樹木の評価では、日陰の面積が重要視されている。そこで本研究でも直達日射を対象とし、従来の評価に、樹木の形態の差異による日射透過率の違いという要素を加えて日射遮蔽効果を評価する。都市の中では建物壁面からの反射日射も問題となる。3 次元の LAD 分布は様々な方向からの日射に対応できるため、反射日射の評価に有効である。しかしながら、反射日射の評価には、壁面の材料や反射の指向特性の情報が必要である。このような情報の整備方法やそれを用いた評価方法については今後研究を行っていくこととし、本研究では最も影響が大きく樹木の形態だけで決まる直達日射の遮蔽を考える。以上から、日射遮蔽効果の評価は空隙を通過する直達日射をもとに行う。蒸散作用の評価は蒸散量により行う。蒸散量を予測するためには既往の蒸散モデルを用いる。蒸散モデルを用いた計算には、個々の樹木の光合成有効放射吸収量(APAR)が必要である。

個々の樹木の日射透過率と APAR を求めるために、航空機 LiDAR により推定した樹木の 3 次元情報と既往の植生の放射伝達シミュレーションを用いる。

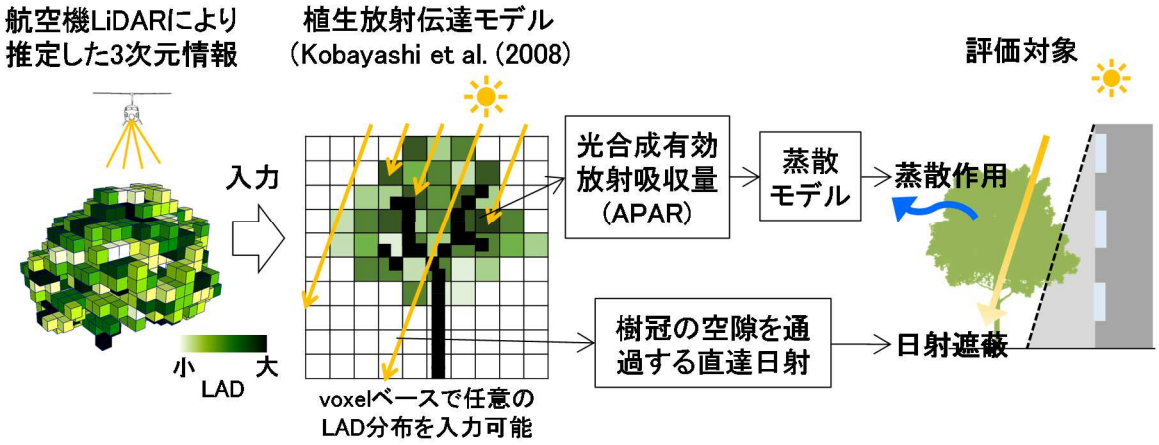


図 5-1　航空機 LiDAR により推定した樹木の 3 次元情報を用いた熱環境緩和効果の評価方法

5.2.2　解析に用いる植生の放射伝達モデル

voxel ベースで LAD を入力し樹冠による日射透過率や APAR を予測するためのシミュレーションモデルとして、Kobayashi et al.によるモデル [5-1]（forest light environmental simulator (FLiES)）の voxel version（forest light environmental simulator for voxel data (FLiESvox)）を用いる。FLiES は、モンテカルロレイトレーシングに基づき、大気と樹冠内での太陽放射の散乱過程を物理則に基づき精緻に扱うモデルである。FLiESvox は樹冠構造を考慮した APAR の予測のために、放射の散乱過程を簡易化し、樹木には voxel により任意の LAD 分布を与えることができるモデルである。本研究では、日射の透過は樹冠の空隙を通過する成分を扱うため、PAR だけでなく日射に対しても FLiESvox で予測を行うことができる。以下に FLiESvox の概要を示す。

図 5-2 に Fliesvox の樹冠における PAR の透過・吸収の計算方法の概念図を示す。樹木の領域には任意の LAD 分布を入力することができる。LAD 分布を表現する voxel サイズは 0.1 m, 0.3 m, 0.5 m, 1.0 m, 2.0 m から選択可能である。枝は放射が透過しない voxel として与えることができる。図 5-2 の①や②の voxel のように、voxel の内部により小さな voxel (irregular voxel)として葉や枝の voxel を設定することができる。計算範囲は 200 voxel × 200 voxel × 100 voxel の範囲である。すなわち、voxel サイズが 0.1 m の場合は 20 m × 20 m × 10 m であり、voxel サイズが 2.0 m の場合は 400 m × 400 m × 200 m である。また、voxel 内の葉の傾きは、Bunnik の葉の傾斜角分布関数 [5-2]の中から、極座標球面上一様分布、水平葉型、鉛直葉型の 3 種類を選択することができる。

各 voxel の PAR の直達成分の吸収量は式(5-1)で算出される。

$$APAR_{dir}(\theta_s) = I_0 u \frac{G(\theta_s)}{cos\theta_s}\left(1 - f_{dif}\right)\exp\left(-\sqrt{\mu}\tau(\theta_s, \varphi_s)\right) \qquad (5-1)$$

$APAR_{dir}$：直達 PAR の吸収量 [W/ m²]、θ_s：太陽天頂角 [°]、φ_s：太陽方位角 [°]、I_0：樹冠上端における PAR フラックス [W/ m²]、u：LAD [m²/ m³]、$G(\theta_s)$：G 関数（太陽方向から見た単位面積の葉の投影面積）、f_{dif}：PAR の散乱成分の比率 [-]、μ：葉の PAR 吸収率 [-]

$\tau(\theta_s, \varphi_s)$は太陽方向の光学的深さであり、式(5-2)で表される。

$$\tau(\theta_s, \varphi_s) = \sum G(\theta_s) s(\theta_s, \varphi_s) u \qquad (5-2)$$

$s(\theta_s, \varphi_s)$, $G(\theta_s)$, u：太陽方向に存在する各 voxel の通過距離、G 関数、LAD

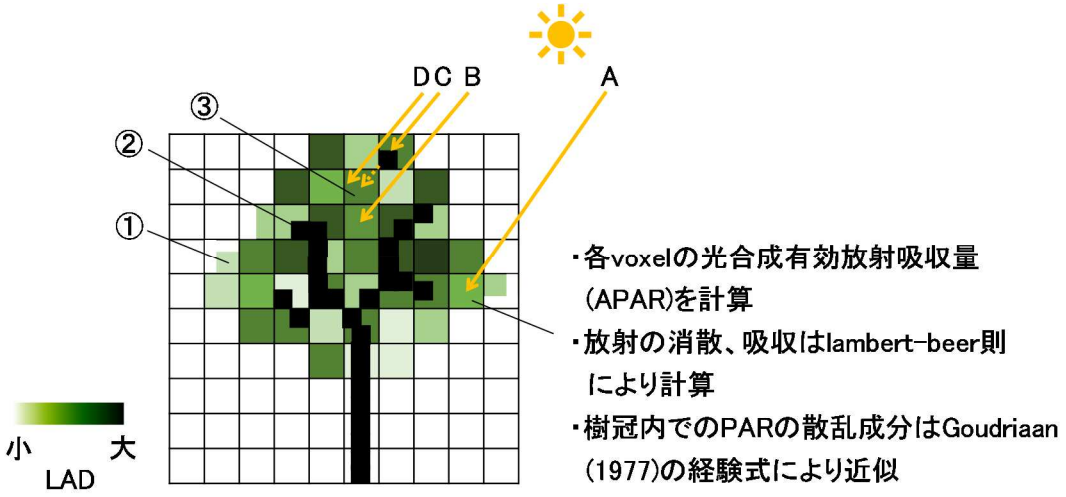


図 5-2　FLiESvox における APAR の計算方法の概念図

このように、各 voxel にける PAR の消散・吸収過程は、第 2 章で述べた lambert-beer 則により表されている。通常の beer 則と異なる点として、式(5-1)の exponential の成分に葉の PAR 吸収率の平方根$\sqrt{\mu}$が含まれていることである。これは樹冠内での PAR の散乱成分の吸収量を近似する経験式であり Goudriaan により提案された[5-3]。この近似式は、次の仮定に基づき提案されている。すなわち、植生内での放射の減衰が lambert-beer 則によく従うことをもとにして、様々な放射の入射方向・葉の傾き・葉の散乱係数に対する放射の減衰を理論的に解析した結果、葉での散乱も考慮した場合の消散係数を葉での散乱がないと仮定した場合の消散係数を用いて高精度に近似できたことに基づいている。Goudriaan の式は、植生の放射伝達の解析に広く用いられている。式(5-2)により光学的深さの計算を行う経路は、各 voxel の中心と太陽を結ぶ経路である（図 5-2 A, B の光線）。図 5-2 C のように光線が枝に当たる場合は、voxel③の APAR は 0 となる。実際には、図 5-2 D の光線のように voxel③には放射が入射してくる。しかしながら、voxel の中心を基準として計算を行うため、APAR が 0 と算出される。本研究では、葉と枝のレーザー反射点は区別せずに用いていることから、図 5-2②のような枝の irregular voxel は設定していないため、各 voxel の中心を基準として計算を行うことの誤差は小さいと考える。PAR の天空成分は、式(5-1)を半球方向に積分した形で式(5-3)により算出される。

$$APAR_{dif} = I_0 u f_{dif} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{G(\theta_s)}{cos\theta_s} \exp(-\sqrt{\mu}\tau(\theta_s, \varphi_s)) w(\theta, \varphi) cos\theta sin\theta \, d\theta d\varphi \quad (5-3)$$

$APAR_{dir}$：PAR の天空成分の吸収量 [W/ m²]、$w(\theta, \varphi)$：PAR の天空成分の異方性を表す関数

PAR 領域においては、葉の吸収率が約 0.8 と高いが、太陽放射の全波長帯においては 0.5 程度になるため、Goudriaan の近似[5-3]を用いることはできない。しかしながら、本研究では日射は空隙を通過する成分のみを考えるため上記の式で算出することができる。すなわち、葉の吸収率を 1 として計算を行い、樹冠下における PAR の透過率を算出することで、空隙を通過する直達日射の透過率を求めることができる。

5.2.3 解析に用いる蒸散モデル

モデルの概要

水蒸気の拡散過程（蒸散）は気孔と葉面境界層を抵抗とする電気回路のアナロジーとして表せる（式(5-4)）。

$$E = \frac{g_{bw} g_{sw}}{g_{bw} + g_{sw}} (W_i - W_a) \qquad (5-4)$$

E：蒸散速度[mol/m²･s]、g_{bw}：水蒸気拡散に関する葉面境界層コンダクタンス[mol/m²･s]、g_{sw}:水蒸気拡散に関する気孔コンダクタンス[mol/m²･s]、W_i:細胞間隙水蒸気濃度[mol/mol]、W_a：大気水蒸気濃度[mol/mol]

境界層コンダクタンスは風速と葉の大きさにより求められる。気孔コンダクタンスは Leuning のモデル[5-4]により求める。

$$g_{sc} = a_1 \frac{A_n}{(C_i - \Gamma^*)} \frac{1}{(1 + D/D_0)} + g_{scmin} \qquad (5-5)$$

A_n：純同化速度[μmol/ m²･s]、C_i：細胞間隙二酸化炭素濃度[μmol/mol]、Γ^*：CO_2 補償点[μmol/ mol]、D：飽差[hPa]、a_1, D_0, g_{scmin}：パラメータ

純同化速度 A_nは Collatz et al.の光合成モデル[5-5]により推定する。

$$A_n = min\{J_E, J_C, J_s\} - R_d \qquad (5-6)$$

J_E：光制限下の同化速度 [μmol/ m²･s]、J_C：Rubisco 制限下の同化速度 [μmol/ m²･s]、J_s：ショ糖制限下の同化速度 [μmol/ m²･s]、R_d：呼吸速度[μmol/ m²･s]

このモデルは、光合成速度は、光エネルギーから NDAPH と ATP を合成する光化学反応過程（J_E），NDAPH と ATP を用いて CO_2 と H_2O から糖を合成するカルビン回路過程（J_C），

生成物を細胞質に輸送するショ糖合成過程のうち（J_s）、最も遅い過程により決まることに基づいている。このうち J_E には葉の PAR の吸収量（APAR）が影響する。J_C、J_s における酵素の働きは温度に依存するため、葉温と酵素の温度依存性の情報が必要となる。

本研究での各パラメータの扱い

式(5-6)における葉の APAR は 5.2.2 の FLiESvox により求める。式(5-4)の境界層コンダクタンスの算出に必要な風速は、評価対象日の対象時間の代表風速を用いる。風が弱い典型的な夏季晴天日を考えた場合は、この扱いで妥当であると考えられる。しかしながら、CASBEE において樹木の蒸散量の芝生に対する掛け率を決める際には、樹木がまとまって存在する場合は風速が低下し蒸散量も少なくなることの影響を加味するかが議論されていた [5-6]。実際には単木、並木、公園のまとまった樹木など都市の樹木の配置は様々である。周辺の建物の配置によっても風の性状は変化する。本研究で推定した樹木の 3 次元情報や航空機 LiDAR で得られる地物の 3 次元形状は、このような評価にも有効であると考えられ、今後応用を行ってゆく。式(5-4)の W_i や式(5-6)の酵素が関わる反応速度を求めるために必要な葉温は評価対象日の対象時間の気温と等しいと見なす。葉の熱収支を考えると葉温は気温に近いと言われるように 1 次近似としてはこの扱いで十分であると考える。しかしながら、夏季の気温は式(5-6)の酵素の働きに対して最適な温度に近いため、葉温が気温より数度上がると光合成能力が低下することになる。葉温は周囲の葉や枝、周辺の建物などの空間形態とそれらの温度、風速、蒸散量などにより決まるため、上記の風速と同様に、推定した樹木の 3 次元情報を用いた評価方法を今後検討してゆく。式(5-6)の酵素の温度依存性に関するパラメータは Collatz et al.の計算値を使用する。Leuning のモデルにおける 3 つのパラメータは、単木の重量計測により求めた蒸散量 [5-7]を用いて算出した。

5.3　熱環境緩和効果の予測方法の精度検証方法

都市空間において樹木の熱環境緩和効果を評価する前に、航空機 LiDAR による樹木の 3 次元情報と植生放射伝達モデルによる日射透過率と APAR の予測精度を検証する。本節では検証のための実測について述べる。

5.3.1　精度検証の考え方

検証には、LAD の推定精度が明らかになっている 4 章で検証対象としたケヤキを用いる。図 5-3 に検証の考え方を示す。APAR を直接測定することは困難であるため、樹冠の下で PAR の強度を測定することで検証を行う。このとき測定値に含まれる要素は図 5-3(1)の通りであり、樹冠の空隙を通過した①直達成分と②天空成分、枝葉で散乱された③直達成分と④天空成分、⑤樹冠外からの天空成分、⑥周囲の樹木で散乱された成分、⑦周囲の樹木で散乱された成分の対象樹木での散乱成分、⑧地表面での散乱された成分の対象樹木の散乱成分がある。対象樹木の周辺には建物は存在していないため、建物からの反射成分はない。また、樹冠下または周囲に高反射性の材料はないため、⑧は無視できるとする。⑦も小さいと考え扱わない。⑤⑥には他の樹木の LAD の推定精度や計算モデルにおける天空日射の分布の再現精度など、検証対象樹木以外の要因が関係している。これらを含んだ状態では、検証対象樹木の LAD の推定精度と PAR の透過量の予測精度の関係は議論できない。

そこで、樹冠外からの成分を取り除く遮蔽板を設置することで樹冠を透過してセンサに入射する成分と、樹冠外からセンサに入射する成分を分けて測定する（図 5-3(2)）。このとき、晴天日で樹冠に入射する PAR の直達成分の割合が大きい場合には、樹冠を透過してくる成分の大部分は直達成分であると考えられる。入射する PAR の天空成分が増えると上述のように対象樹木の再現性のみを考慮した検証が難しくなる。そこで、快晴日に実測を行う。

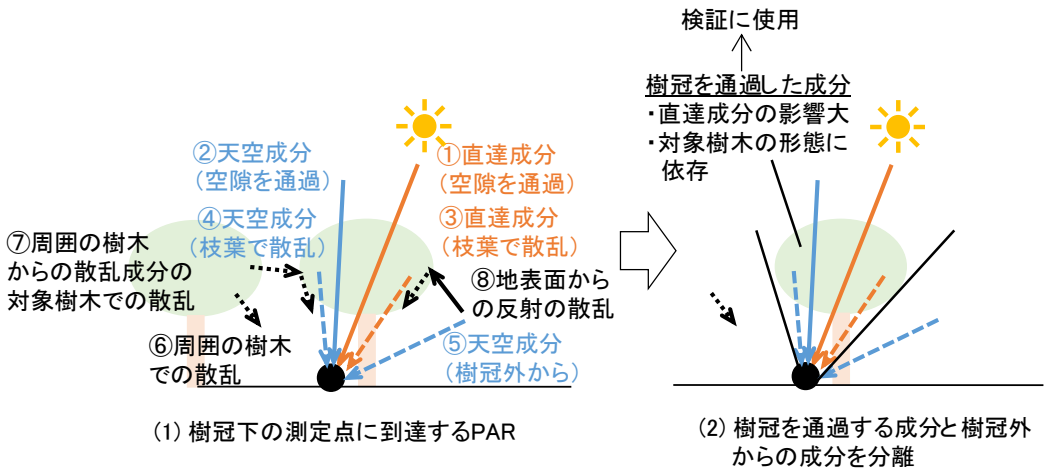


図 5-3　検証方法の概念図

樹冠に入射した直達日射は、①樹冠の空隙を通過して地表面に達する成分と、②枝葉で散乱されて樹冠から様々な方向に射出される成分、③樹冠により吸収される成分に分かれる。②の成分があるため、樹冠下での測定値と計算値が一致していても、厳密には③の計算値が正しいか分からない。しかしながら、葉は PAR の吸収率が高く樹冠内で散乱される成分は少ないため、樹冠下での測定値と計算値の比較により樹冠での吸収量を検証できると考える。樹冠を透過した直達 PAR を精度よく計算することができれば、航空機 LiDAR により推定した情報と放射伝達モデルによる予測が妥当な方法であると判断し、空隙の通過を考えた場合の日射透過率(式(5-1)における Goudriaan の経験則の PAR の吸収率を 1 とした場合)の予測にも適用できるとする。

5.3.2　実測に用いる測定装置

図 5-4 に木陰の写真を示す。一様に薄暗い影になるわけではなく、直達日射が葉や枝で遮られる場所と直接照射される場所ではっきりとした濃淡ができている。単木の日射透過率を実測した既往研究では、この木漏れ日を無視しているものも見られる。丸田らの実測 [5-8] では、樹冠の外側から入り込む天空日射と、葉を透過する日射を合わせたものを、樹影内の数点で測定し、日射透過率の分布として算出している。また、吉田らの実測 [5-9] でも、木漏れ日は無視し、樹冠部から透過する日射のみを樹影内の代表 1 点で測定し、単木の日射透過率としている。実際の木陰を見ると木漏れ日も影の部分も考慮しなければならないのは明白であるが、従来測定に用いられている日射計や PAR フラックス計ではその設置位置によって結果が左右されるため、検証のためのデータを得ることはできない。

そこで、植物群落 PAR 分布測定装置 (SunScan (Delta-T 社製)) を用いる。図 5-5 に PAR 分布測定装置を用いた測定の概要を示す。PAR 分布測定装置は 1 m のプローブに 64 個の光量子センサが埋め込まれており、プローブの長さ方向は高分解能に PAR の分布を測定で



図 5-4　実際の木陰における木漏れ日の分布

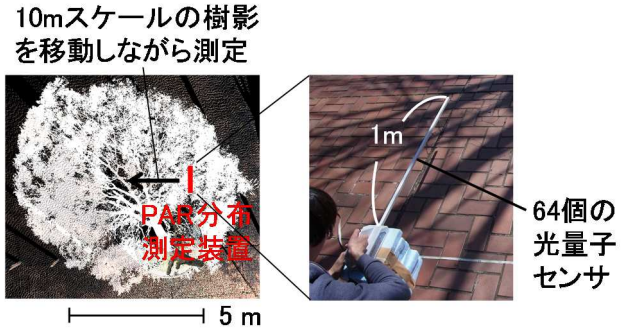


図 5-5　PAR 分布測定装置による樹影の測定

きる。そしてこのプローブを横に移動しながら測定することで PAR の面的な分布を捉えることができる。測定ボタンを押すことで測定を行う方式であるが、応答時間が早いため連続測定に適している。この装置はエネルギー量ではなく光量子量を測定する。FLiESvox はエネルギー量を算出する。樹冠の空隙を通過した PAR についてはスペクトルが変化しないため、樹冠外で測定した入射光量子量に対する割合を透過率とすることができる。葉を透過すると入射時とスペクトルが変化するため、厳密には光量子量だけではエネルギーベースの透過率は分からない。しかしながら、葉の分光反射率・透過率の情報を用いてエネルギーベースと光量子ベースの葉の反射率と透過率を比較した結果差は見られなかったため、樹冠外で測定した入射光量子量に対する樹影内の測定値の割合を、エネルギーベースの透過率と比較することができる。

PAR 分布測定装置を用いた研究例としては、森林において LAI の季節変化の調査に用いた研究[5-10]も見られるが、多くは、大豆畑の LAI を調査した研究[5-11]、草原における PAR の吸収率実測方法を検討した研究[5-12]、トウモロコシ畑の LAI の推定精度検証した研究[5-13]など植生高の低い群落を対象としている。測定した PAR の透過量をもとにした LAI の推定には、低く一様な植生が適しているとされているが、本研究での PAR の分布の測定には問題にならない。

5.3.3　検証対象ケヤキの樹冠下における PAR 分布の実測

5.3.2 で選定した PAR 分布測定装置を用いて、検証対象ケヤキの樹冠下において PAR の面分布を測定した。4 章で述べたように、日射と航空機からのレーザーの入射方向が異なる場合は、航空機 LiDAR により抽出できなかった voxel の影響が生じる可能性がある。太陽高度による精度の差を検証するために、太陽高度が異なる条件で測定を行った。太陽高度が高い条件での測定を 2013 年 8 月 27 日（11 時～11 時 30 分、太陽高度 63°）に、太陽高度が低い条件での測定を 2013 年 9 月 18 日の朝に行い（8 時 45 分～9 時 20 分、太陽高度

40°）、中間的な高度として同日の昼に実測を行った（11 時～11 時 30 分、太陽高度 55°）。航空機 LiDAR による観測を行ったのは 2010 年 9 月であるため、測定日とは 3 年の差があるが、現地での目視調査や現地撮影写真の比較によって大きな変化はなかったことを確認した。以下に測定の詳細を示す。

PAR 分布測定装置による測定方向

地上型 LiDAR データにより対象ケヤキの投影面を再現し、実測方法を検討した。どの測定日も樹影は西から東に平行して動いた（図 5-6(1)）。図は最も樹影の動きが大きい 9 月 18 日の朝を表しており、測定時間の間に 2.5 m 移動している。そのため、図 5-6(1)①のように南北方向に移動して測定すると投影面の動きを追うことになり、樹冠の同じ部分が投影されたものを測定したり、また、時間がかかることになる。そこで、②のように東西方向に移動して測定を行った。航空機 LiDAR データと FLiESvox による PAR の透過率の計算を、

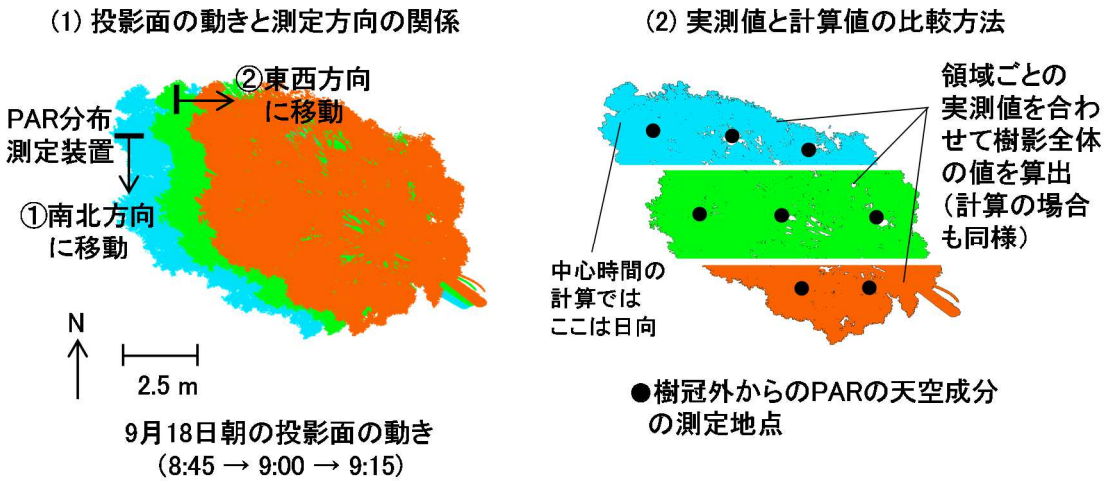


図 5-6　樹影が動くことに対する測定時と検証時の対応

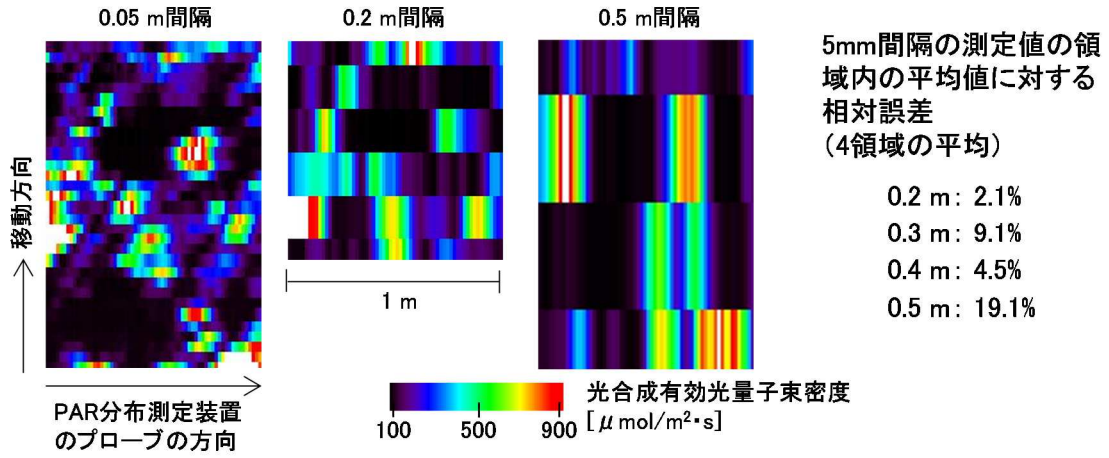


図 5-7　PAR 分布測定装置による測定間隔の検討

測定時間帯の中心時間で行うと、投影面が動くために比較が難しくなる。図 5-6(2)のように樹影を 3 つの領域に分けて測定し、それぞれの測定値と計算値を採用して樹影の透過率を算出し、比較を行うことで樹影が動くことの影響を少なくした。

PAR 分布測定装置による測定間隔

PAR 分布測定装置は 1 m のプローブの方向は高分解能に測定できる。それと直交する方向には手動で一定間隔ずつ移動しながら測定することになる。この間隔を決定するための予備実測を 8 月 27 日の測定よりも前にあらかじめ実施した。対象ケヤキの樹影において東西方向に 1.5 m 南北方向に 1 m の領域を設定し、PAR 分布測定装置による測定を行った。このとき東西方向に移動する間隔を 0.05 m, 0.2 m, 0.3 m, 0.4 m, 0.5 m の 5 通りに設定し測定した。この測定を樹影内の木漏れ日が多い場所や少ない場所を含めて 4 箇所で行った。全ての間隔での測定は 3 分程度で完了したため、それぞれの測定間隔同士での樹影のずれはない。図 5-7 に測定結果の一例と 0.05 m 間隔の測定値の領域内での平均値に対する各測定間隔の相対誤差を示す。相対誤差は 4 箇所の測定地点の平均値である。0.5 m の結果でも分布の特徴は表現されているが、実際には小さい木漏れ日を過大推定することで誤差が大きくなっている。0.2 m 間隔であれば誤差は 2%であったため、0.2 m 間隔で測定を行うことにした。またこの実測の際に、樹影全体の測定も行い、測定に要する時間を把握した。

樹冠を透過した PAR と樹冠外からの PAR の分離

対象ケヤキ以外の要因を除いて検証を行うため、樹冠を通過してセンサに入射する成分と樹冠外から入射する成分を分離した。図 5-6(2)に示すように樹影内の複数の地点で樹冠外からの成分を測定し、PAR 分布測定装置を東西方向に移動して測定した樹影全体の各測定値から、最も近い樹冠外からの成分の測定地点の値を引くことで、樹影全体において樹冠を通過した成分を算出した。樹冠外からの天空成分は場所により異なるが、本研究では樹影内の透過率の分布ではなく樹冠全体の平均的な透過率を対象としているため、図 5-6(2)のように樹影内を複数地点において偏りなく測定しておけば誤差は少ないと考えられる。測定に要する時間を考慮して地上型 LiDAR データから再現した各領域の樹影により測定地点をあらかじめ決定した。そして、地上型 LiDAR データを用いて各測定地点から見た樹冠の形状の遮蔽板を作成した。樹冠外からの成分の測定も PAR 分布測定装置を用いて行っており、プローブの先端から見て樹冠が遮蔽版で覆われるようにして測定した。

測定の実施

図 5-8 に測定手順を示す。はじめに、樹影の外の開けた場所で基準となる PAR を測定した（図 5-9(1)）。一般的に用いられる直達日射計と同様の立体角で太陽を覆う遮蔽ボールを用いて、直達成分と天空成分を分離した。この測定も PAR 分布測定装置で行い、先端のセ

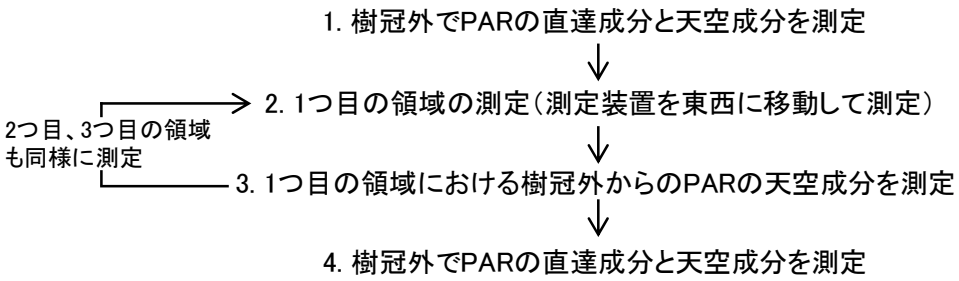
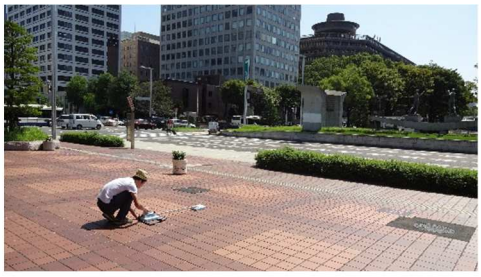


図 5-8　測定手順



(1) 基準のPARの直達成分と天空成分の測定



(2) PAR分布測定装置による実測



(3) PAR分布測定装置の測定位置を示すメジャー



(4) 各測定点から見た樹冠形状を再現した遮蔽版を用いた樹冠外からの成分の測定

図 5-9　検証対象ケヤキの樹冠下における PAR 分布の測定

ンサに対して太陽が遮蔽ボールで覆われるようにして測定した。続けて 1 つ目の領域（図 5-5 (2)）の測定を行った。図 5-9 (2)に示すように PAR 分布測定装置を高さ 0.3 m の台に載せ、移動するごとに水平になるように調整した。PAR 分布測定装置の移動は樹冠の下に設置したメジャーに従って行った（図 5-9(3)）。1 つ目の領域が終わった後に、樹冠形状の遮蔽板を用いてその領域における樹冠外からの天空成分を測定した（図 5-9(4)）。そして 2 つ目の領域、3 つ目の領域も同様に測定を行い、最後に樹冠外で基準となる PAR を測定した。

測定結果

図 5-10 に測定したデータを示す。樹冠外からの成分は引かずに測定データをそのまま示

している。図の右上に示すように、幅 0.2 m、長さ 1 m の情報を得ており、長さ方向は 64 個のデータから構成されている。0.2 m 間隔で測定したため、太い枝の分布とその周りの空隙が認識できる。また、葉の部分もほとんど透過していないが分かる。太陽高度が 63° と 55° の場合（方位はほぼ南から入射）は、55° の方が北側に投影されていること以外近い分布となっている。しかしながら、太陽高度が 40° で東北東から日射が入射する場合は異なる分布になっている。西側の高透過率の領域がなくなり、東側で透過率が高い領域が生じている。以上のように、従来の日射透過率の測定では困難であった、木漏れ日も含めた分布の情報を取得することができた。次節ではこのデータを用いて、航空機 LiDAR と植生放射伝達シミュレーション FLiESvox による APAR と日射透過率の予測精度を検証する。

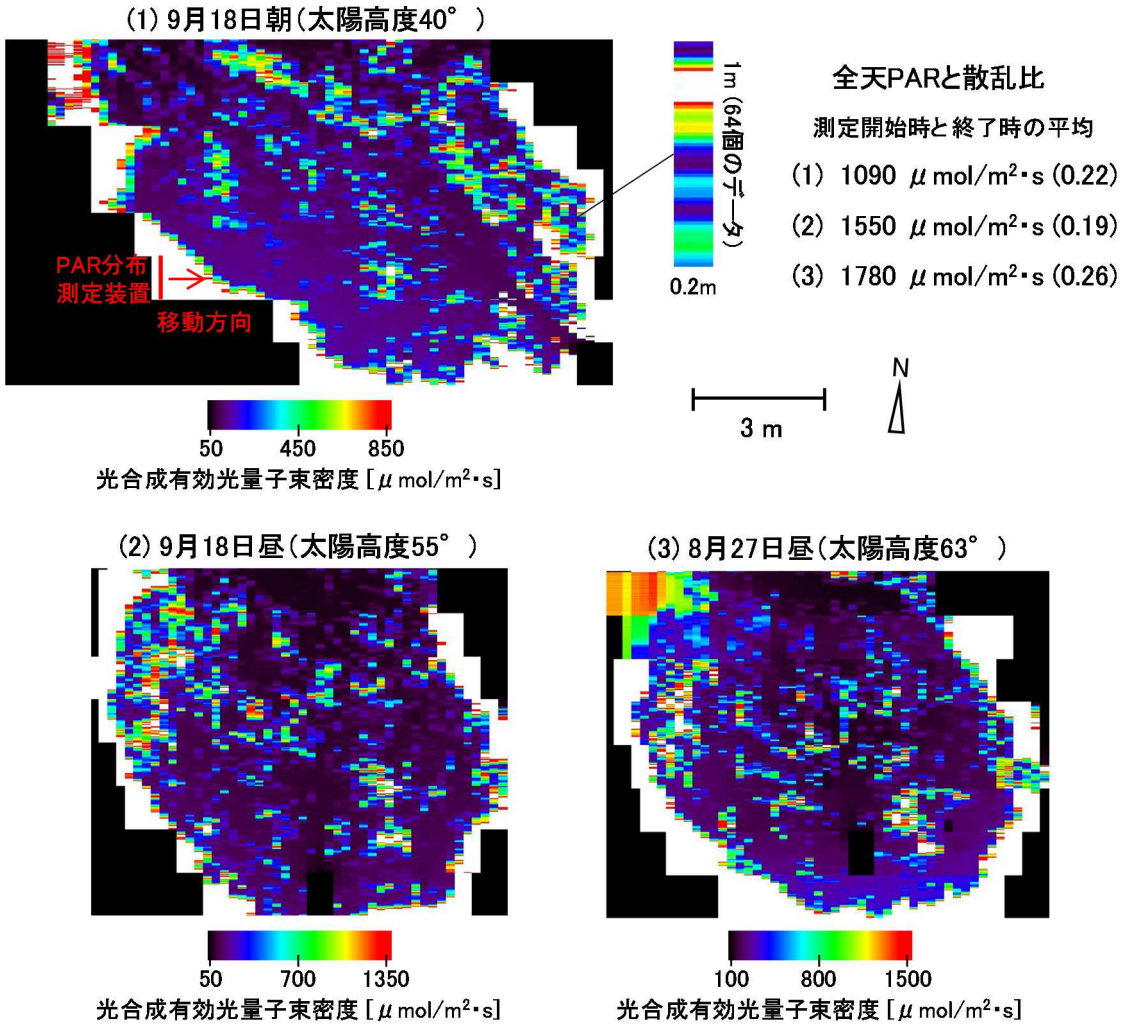


図 5-10　PAR 分布測定装置による樹冠下の PAR 分布

5.4　航空機 LiDAR と植生放射伝達モデルを用いた日射透過率と APAR の予測精度

5.2 で示した方法と 5.3 で取得したデータを用いて、航空機 LiDAR と FLiESvox を用いた方法による、樹冠の日射透過率と APAR の予測精度を検証する。

5.4.1　植生放射伝達モデルの入力条件

表 5-1 に FLiESvox により PAR の透過率を算出するために必要なパラメータと本研究での取り扱いを示す。各 voxel に入力する LAD は航空機 LiDAR により推定した値を入力する。天頂付近から高密度でレーザーが入射するコース 3 のデータを用いて、本研究で提案した手法により推定した LAD を用いた。比較用にコース 1 のデータを用いた場合と Song et al.[5-14]の手法で推定した LAD（コース 3 のデータ使用）も用いた。4.4.3 に示した方法により、樹冠の外周部を高分解能化した結果を用いるため、voxel サイズは 0.5 m である。irregular voxel（図 5-2 ①,②）は設定していない。また、葉と枝のレーザー反射点群は区別せずに用いているため、枝の voxel も設定していない。PAR の分布の実測結果と比較するために、PAR 分布測定装置の向きが y 軸と平行になるように航空機 LiDAR データの座標を変換した上で LAD を推定した。FLiESvox の計算もこの座標系で行われる。

各 voxel の葉の傾斜角分布関数（この分布関数と光線の方向により式(5-1)～(5-3)の $G(\theta_s)$ が算出される）は、検証対象のケヤキの地上型 LiDAR データから読み取った分布を用いた。FLiESvox では、傾斜角分布関数は極座標球面上一様分布、水平葉型、鉛直葉型の 3 種類が利用可能である。しかしながら、検証対象のケヤキの分布（図 4-19）とは異なるため、検証対象ケヤキの分布を表す関数の設定を行った。葉の反射率と透過率は、第 3 章で地上型 LiDAR による検証方法の検討に用いた小規模なケヤキにおいて、分光放射計（FieldSpec

表 5-1　FLiESvox の入力条件

各voxelのLAD	←	航空機LiDARによる推定値（提案手法（コース3、コース1）、Song et al.の手法（コース3）で推定）
葉の傾斜角分布関数	←	対象ケヤキの地上型LiDARデータから読み取った分布
葉の透過率・反射率	←	分光放射計による分光反射率・透過率と晴天日の太陽放射スペクトルからの算出値
太陽高度・方位	←	各領域の実測時の値
入射照度・散乱比	←	直達成分を扱うため散乱比は0、入射照度は結果に影響しないが実測値を使用

(ASD 社製)) を用いて測定した分光反射率・透過率と PAR 領域の太陽放射スペクトルを用いて算出した。使用した分光放射計は人工光源を用い、葉を光源と反射率 1 の白板で挟んだ場合と反射率 0 の黒板で挟んだ場合の測定値から反射率と透過率を算出するものである。反射率 1 の白板の測定値を基準としたときの各材料の測定値の割合を反射率としているため、正確には相対反射率である。これは積分球などを用いた場合に取得される本来の反射率とは異なるものの、強い指向性がない物体であれば、反射率として妥当な値が取得できる。そこで本研究では、これを反射率として扱う。PAR 領域の太陽放射スペクトルは、Bird モデル[5-15]により夏季の快晴日のスペクトルを再現して用いた。太陽高度・方位は、図 5-6 のそれぞれの領域の測定時の値を用いた。また、PAR の直達成分を扱うため、散乱比率は 0 とした。透過率を算出対象とするため、入射照度の設定は結果に影響しないが、太陽高度・方位と同様に、各領域の測定時の値を用いた。

5.4.2 計算値と実測値の比較

図 5-11～5-13 に 5.3 の PAR 分布測定装置を用いた実測による PAR の直達成分の透過率と、航空機 LiDAR で推定した LAD 分布と FLiESvox を用いて算出した透過率を示す。図

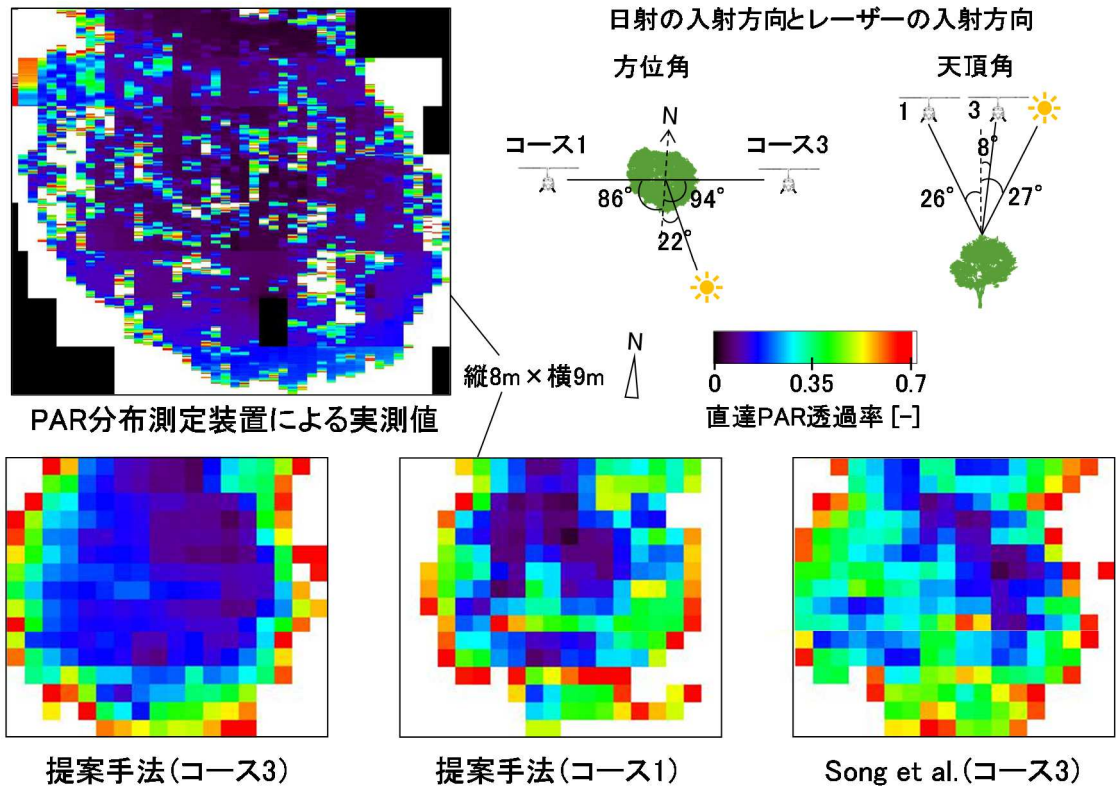


図 5-11　PAR の直達成分の透過率(太陽高度 63°)

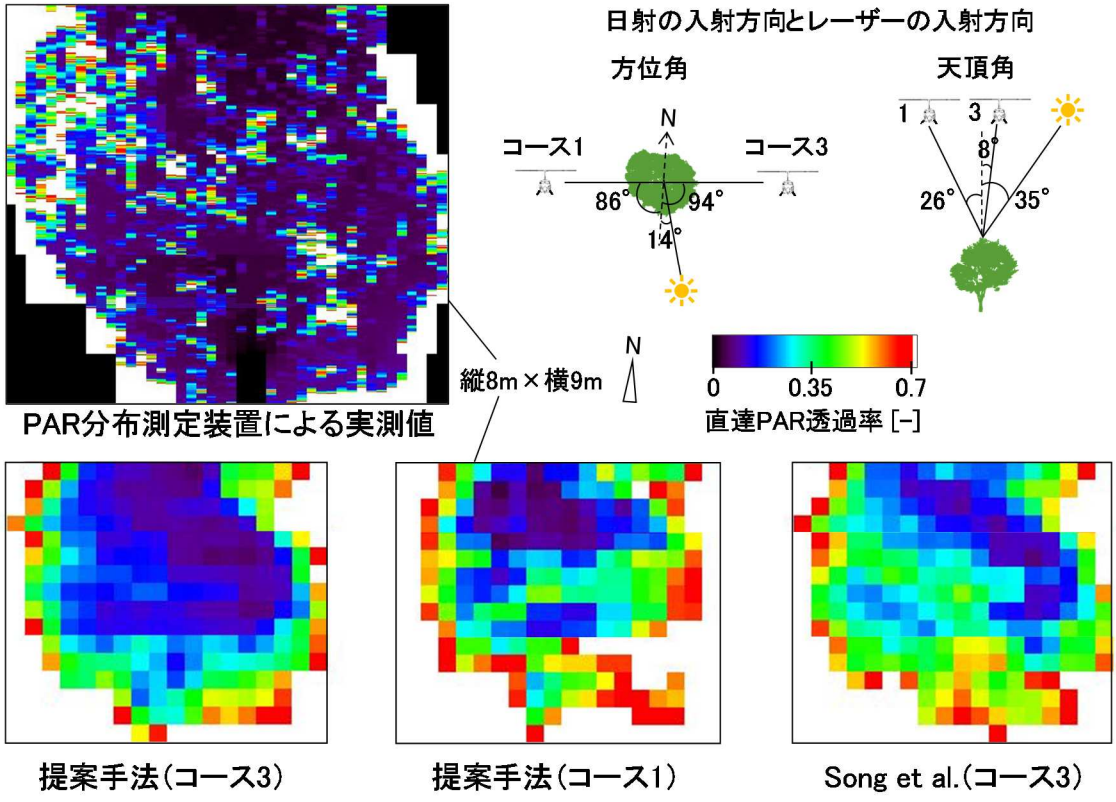


図 5-12　PAR の直達成分の透過率(太陽高度 55°)

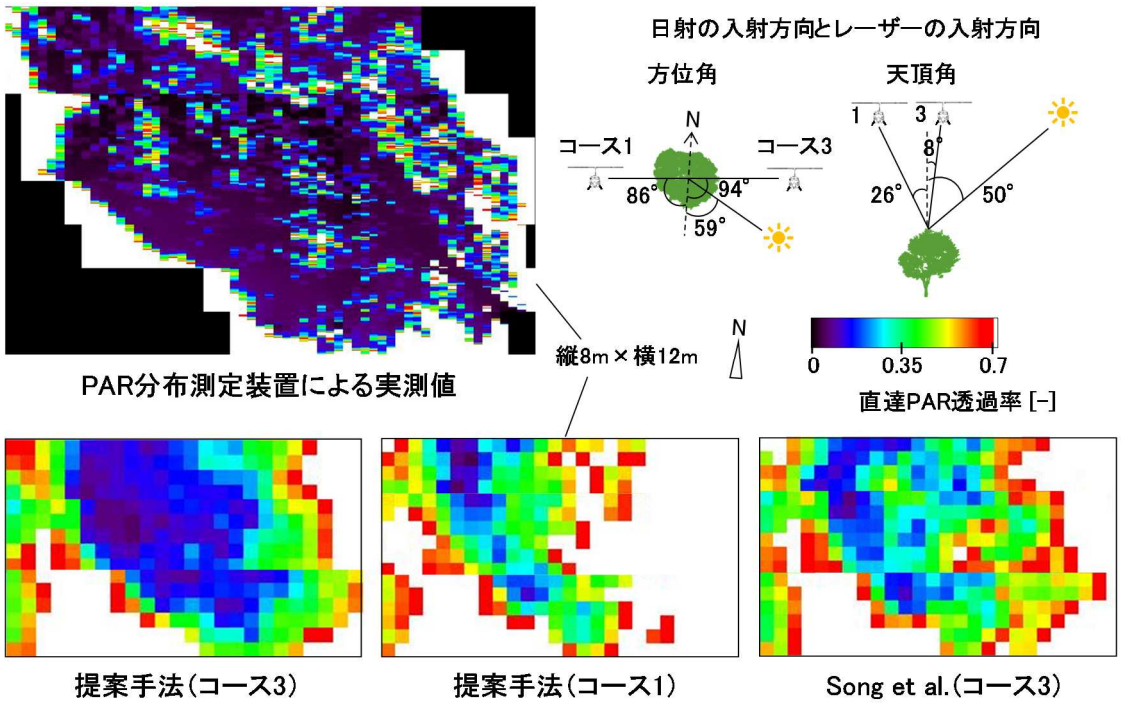


図 5-13　PAR の直達成分の透過率(太陽高度 40°)

5-11 は最も太陽高度が高い 8 月 27 日の結果で、図 5-13 は太陽高度が低い 9 月 18 日の結果を示している。航空機 LiDAR と FLiESvox による結果は、3 通りの LAD 分布を用いた結果を示しており、それぞれ航空機 LiDAR 観測の飛行コース 3 またはコース 1 のデータを使用して本研究で提案した手法により推定した LAD 分布と、コース 3 のデータを使用して Song et al.[5-14]の手法により推定した LAD 分布である。図 5-14 には、各太陽高度に対する樹影内の透過率の平均値を示す。はじめに、レーザーの天頂角に近いため最も高精度な予測が可能であると考えられる太陽高度 63° （8 月 27 日）の結果について述べる。図 5-11 において、コース 3 のデータを用いた提案手法による透過率の分布は、樹影の北から東側に透過率の低い領域があることや西側に透過率が高い領域があるなど、実測値の分布の傾向をよく表現できている。樹影全体の透過率の誤差も 0.03 であり、高精度に PAR の透過を再

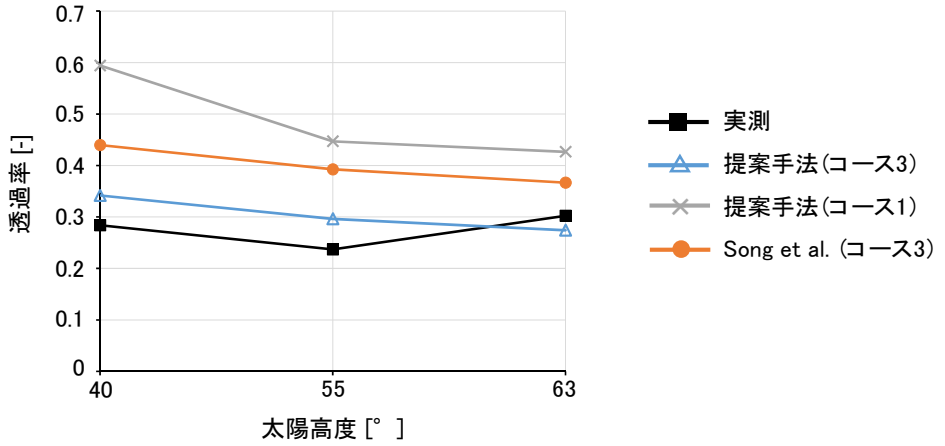


図 5-14　樹影内の直達 PAR 透過率の平均値

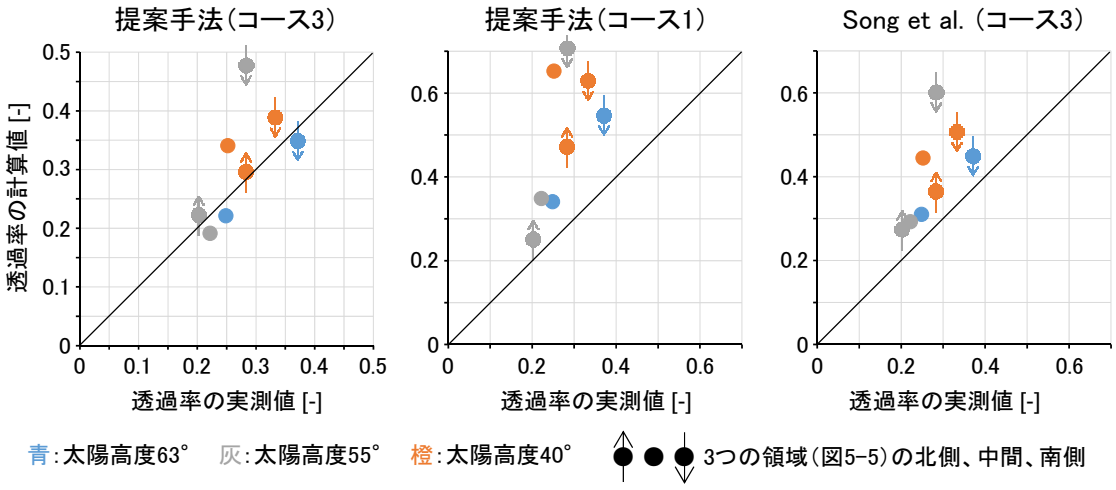


図 5-15　樹影内の各領域（図 5-5）における実測値と計算値の散布図

現している。図 5-6 に示したように樹影全体の透過率は各領域の透過率から算出している。8 月 27 日の測定では北側の領域の測定時に小さな雲が太陽にかかり PAR の入射量が変化したため、北側の領域は除いて結果を算出している。各領域での実測値と計算値の関係を図 5-15 に示す。中間の領域と南側の領域ともに実測値との差が小さく、この太陽高度であれば航空機 LiDAR で抽出できていない領域の影響は小さい。同様にコース 3 のデータを使用した Song et al.の手法による結果では、透過率の分布の特徴は表現されているが、西側で透過率が過大推定されている。これはファーストパルスとシングルパルスのみを用いているためである。一方で、4 章で示したように大きく過大推定される voxel もあるため、樹影全体の誤差は 0.06 に収まっている。入射天頂角が大きくなりレーザー間隔も広がるコース 1 では、抽出できない voxel が増える影響により投影面の再現性が低下している。透過率が 0.1 以上過大推定されている。

次に太陽高度 55°の場合について考察する。実測値によると太陽高度 63 度の場合に比べて透過率は低下する。コース 3 の結果では、東側の透過率が低い領域や西側の透過率が高い領域は再現されているが、南側において透過率が過大推定されている。図 5-15 によると、南側の領域では透過率が 0.15 以上過大推定されており、このときに最も誤差が大きくなっている。これは、航空機 LiDAR により抽出できなかった voxel の影響であると考えられる。図 5-16 に対象ケヤキの航空機 LiDAR データと地上型 LiDAR データ及び日射の入射角を示す。図 5-16 は、太陽高度が 63 度の場合には上部の葉で日射が遮られるため航空機 LiDAR で抽出できない領域の影響は小さかったが、55 度になると影響が生じることを意味している。この結果から、4.5.6 の補正もできていないと言える。このとき北側の領域と中間の領

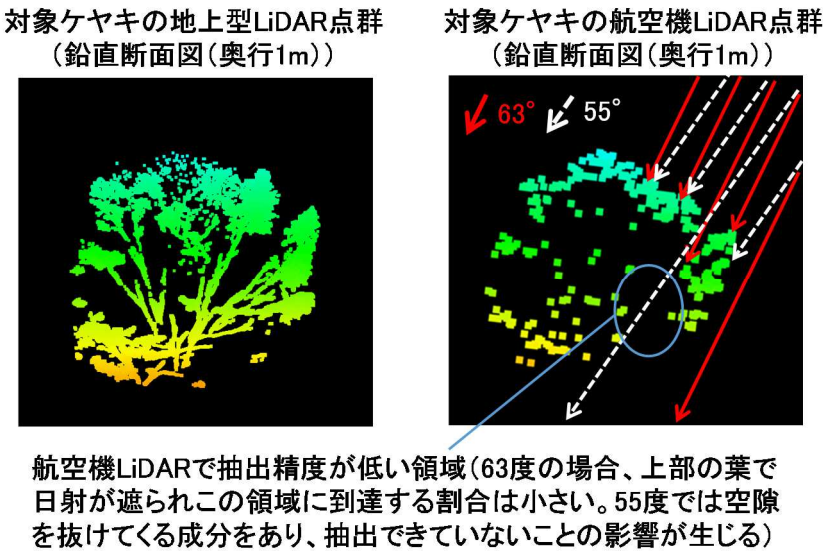


図 5-16　航空機 LiDAR で抽出できない領域の影響

域の誤差は小さく（図 5-15)、全体では 0.06 の誤差（図 5-14）であるため、環境の評価に用いるためには十分な精度であると考える。しかしながら、太陽高度とレーザーの天頂角に差が出てくるとこのような誤差も含まれることを考慮して航空機 LiDAR を用いる必要がある。Song et al.の手法の場合も、コース 1 を用いた場合も同様に過大推定となる。Song et al.の手法を用いた場合は樹影全体の透過率が 0.15 過大推定されており、提案した手法の有用性が示されている。

最後に太陽高度が 40 度の場合について考える。このとき太陽の方位が大きく変わっており、東南東から入射する（図 5-13)。そのため、投影面の特徴も変化しており、実測値を見ると、東側に透過率が高い領域が、西側に透過率が低い領域が形成されている。コース 3 の結果ではこの特徴がよく再現されている。航空機 LiDAR で抽出できていない部分の影響が生じるため、図 5-15 によると南側の領域と中間の領域で透過率が過大推定されているが、誤差は大きくない。樹影全体の誤差は 0.06（図 5-14）であり、Song et al.の手法を用いた場合の誤差 0.16 を大幅に改善している。南側の領域において、太陽高度が 55 度の場合に比べて誤差が小さくなっているのは、樹冠内の透過経路が変化し再現性の良い部分も通過するようになったためと考えられる。図 5-13 のコース 1 の結果を見ると、太陽高度が 63°と 55°の場合に比べてさらに再現性が低下している。これにはレーザーの入射方向が影響している。太陽高度が 40 度の場合は東南東から日射が入射するため、コース 1 からのレーザーの入射方位とは 140～150°の差がある。このため、コース 1 からのレーザーが入射しにくい部分が投影され、透過率が過大推定された。

本節で得られた知見を以下にまとめる。

・本研究で提案した手法により推定した LAD 分布と植生放射シミュレーションを用いることで､太陽高度が 40°以上の場合に 0.06 以内の誤差で PAR の透過率を予測可能である。このことから、環境の評価に対して十分な精度で樹冠の PAR の吸収量と空隙を通過する日射量を予測できると言える。

・既往研究の手法で推定した LAD 分布を用いた場合は、太陽高度が 55°と 40°の場合に透過率が 0.15 以上過大推定された。このことから、本研究で構築した樹木の 3 次元情報の推定手法の有用性が確認できる。

・レーザーの天頂角が 26°、すなわち対象樹木が航空機 LiDAR の観測幅の端に位置する場合、太陽高度が高い場合であっても透過率が過大推定される。太陽の方位によっては 2 倍以上過大推定することもあるため、天頂に近い位置からレーザーが照射されるように観測する必要がある。

5.5　樹木の形態や周辺の空間形態が樹木の熱環境緩和効果に及ぼす影響

前節において、提案した手法により航空機 LiDAR データから推定した樹木の 3 次元情報と既往の植生の放射伝達モデルにより、日射遮蔽効果や蒸散作用の評価に必要な空隙を通過する直達日射の割合や光合成有効放射吸収量（APAR）を高精度に予測できることが確認できた。次に、5.2 で示した方法を用いて、樹木の効果が期待できる実際の都市空間として久屋大通において樹木の熱環境緩和効果の評価を行う。久屋大通は中央の公園側にクスノキ並木が、舗装側にケヤキ並木が存在しており、主にこの 2 樹種を評価対象とする。この 2 樹種は 4 章において LAD の推定精度を確認している。評価対象日は夏季晴天日とする。

5.5.1　解析条件

空間情報

FLiESvox の計算範囲は 200 × 200 × 100 メッシュであるため、本研究で用いる 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m voxel では計算範囲は 100 m × 100 m × 50 m となる。大通りに沿ってより広範囲で評価を行うために範囲を拡張し 400 m × 400 m × 100 m とした。FLiESvox はオープンソースであるためこのような変更が容易である。この範囲において本研究で提案した手法により各樹木の LAD 分布を推定した。樹冠の抽出精度を議論する必要がないように、航空機 LiDAR データから手動で樹木領域を抽出した上で推定を行った。各樹木において最もレーザーの入射天頂角が小さくなる飛行コースの推定値をコース 1, 2, 3 の中から選択した。FLiESvox の計算時に入力できる葉の傾きは、spherical（極座標の球面上に一様に分布する確率密度）、planophile（水平に近い葉の割合が多い）、 erectrophile（垂直に近い葉の割合が多い）の 3 種類である。4.5 で示したようにケヤキには中間的な傾きの葉が多かった。そこで、図 4-19 に示した検証対象ケヤキの樹冠全体の値を Kuusk の楕円分布関数[5-16)]で表し、FLiESvox をそれを読み込めるように設定した。FLiESvox は植生を対象としているため、建物の設定などはない。5.2 で述べたように本研究では反射日射は扱わないため、樹木を除いた航空機 LiDAR データを voxel に分割することで建物の形状を再現した。建物には大きな LAD を与えることで透過がないように設定した。図 5-17 に FLiESvox の入力モデルを示す。提案した手法によって街区スケールにおいて個々の樹木の LAD 分布を整備している。建物は航空機 LiDAR データを直接 voxel 化しているだけであるが、建物の外形だけでなく屋上設置物なども再現されている。

気象条件

蒸散作用の評価に必要な気温、相対湿度、風速は、拡張アメダスデータの中から、夏季晴

天日である 2000 年 8 月 5 日のものを使用した。屋外熱環境が特に問題となる昼間で、5.4 で精度を確認できた太陽高度の範囲である 8 時から 16 時を評価対象とした。また、Bird モデルにより夏季晴天日の PAR の直達成分と天空成分の照度を再現して解析に用いた。図 5-18 に入力する気象条件を示す。

以上の入力条件により、日射遮蔽効果の評価に必要な直達日射透過率（空隙通過）、蒸散作用の評価に必要な光合成有効放射吸収量（APAR）とそれをもとに既往の蒸散モデルによる蒸散量を、1 時間おきに算出した。図 5-19 に算出結果の一例を示す。voxel あたりの蒸散量の単位は kg/m²･h であり、voxel の水平投影面積を基準としている。

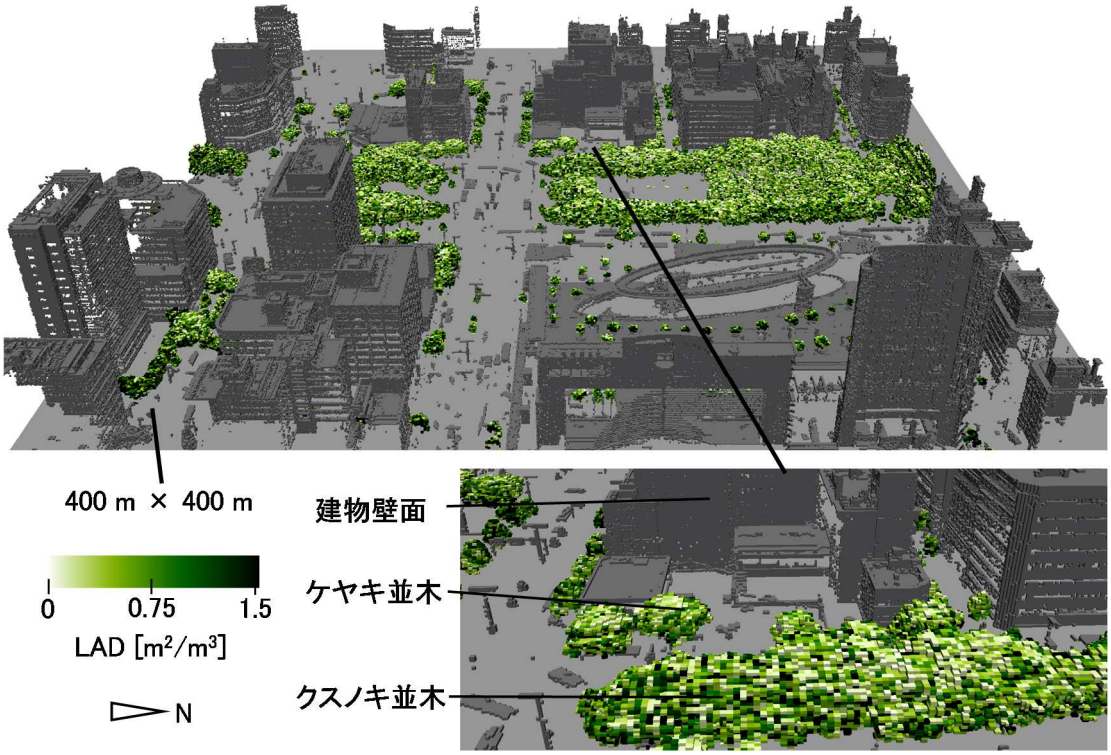


図 5-17　街区スケールの評価における FLiESvox の入力モデルーLAD 分布と建物形状

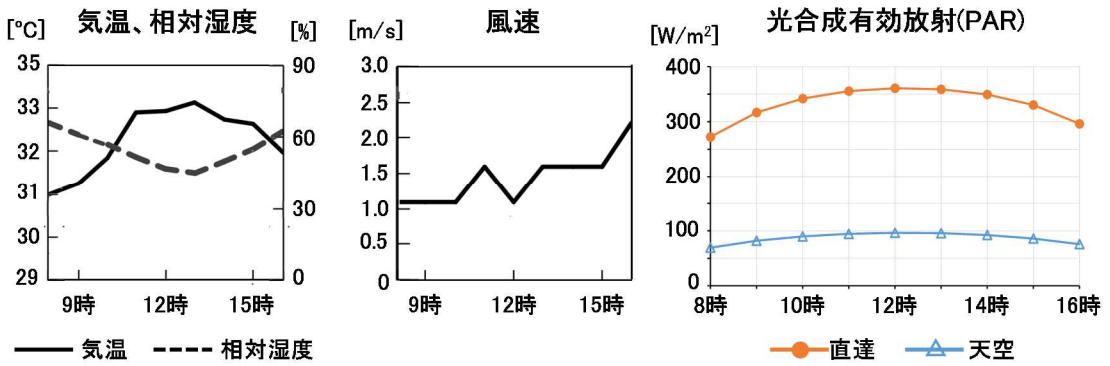


図 5-18　計算に用いた気象条件

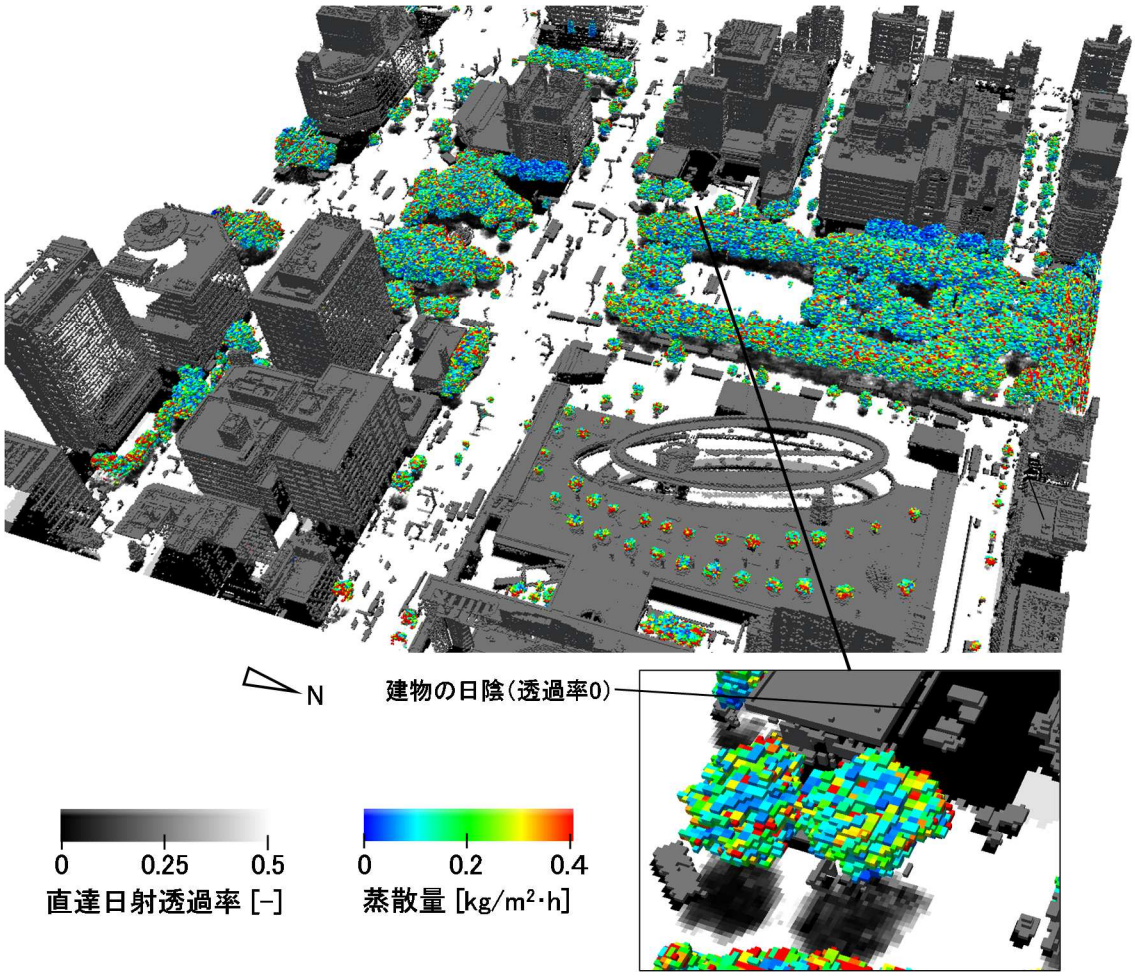


図 5-19　日射透過率と蒸散量の算出結果（15 時）

5.5.2　ケヤキとクスノキの樹冠における PAR の吸収の特徴

はにめに、本研究で評価対象とするケヤキとクスノキの特徴について述べる。図 5-20 に生育状況が良いケヤキとクスノキの樹冠における光合成有効放射吸収量（APAR）の分布を示す。同図は、図 5-19 に示したような 3 次元分布の鉛直断面であり、奥行は voxel 1 つ分の 0.5 m である。APAR の単位は W/m^3 であり、voxel あたりの PAR の吸収量を表している。図に黒丸で示した通り、クスノキは葉群が球状に分布し、それぞれが太陽の方向に応じて PAR を取得している様子が再現されている。また、樹冠に空隙が多いため樹冠の内部でも PAR を取得していることが見て取れる。クスノキの西側の樹冠下部には東側と異なり葉が分布していないが、西側が車道であるため剪定されているためと考えられる。ケヤキは、逆円錐状の樹冠であり上部に葉が集まっているため、どの時間帯でも上部の薄い層で PAR を吸収している。ケヤキの樹冠上部の 1.5～2 m の層は平均的に APAR が大きく、このような層はクスノキには見られない。航空機 LiDAR で推定した LAI（LAD を鉛直方向に積算）

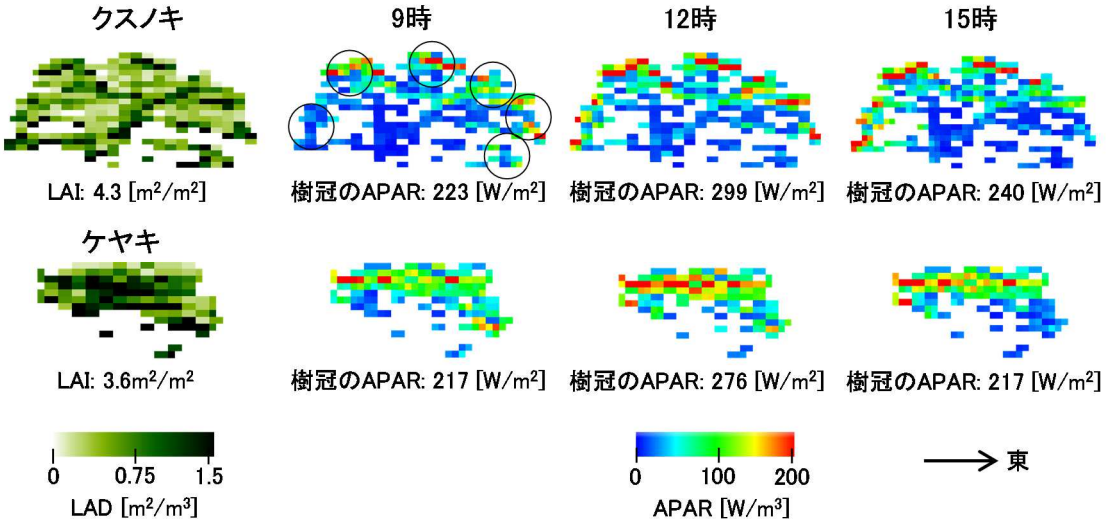


図 5-20　ケヤキとクスノキの樹冠における APAR の分布

はクスノキが 4.3 m²/m²、ケヤキが 3.6 m²/m² であるが、ケヤキは樹冠が低く LAD が大きい。そのため、ケヤキとクスノキの APAR の差は小さい。

5.5.3　植栽間隔が異なる街路の日射環境

次に、久屋大通における典型的な街路形態である、ケヤキ並木とクスノキ並木の日射環境を評価する。図 5-21 に大通西側のケヤキ並木を有する歩道と、大通中央部公園内のクスノキ並木の下の通路の直達日射透過率の分布を示す。図の左上の写真に示すように、公園内の通路は連続してクスノキの樹冠に覆われている。一方、歩道側には間隔を空けてケヤキが植栽されている。また、図の右上は対象の歩道または通路の直達日射到達率の平均値の時間変化を示している。直達日射到達率とは、街路全体に直達日射が照射される場合に 1 であり、照射されない場合（街路全体が建物の日陰で覆われる場合など）に 0 である。

歩道側のケヤキは日射透過率が低い。しかしながら、植栽間隔が広く、北側から 2 本目と 3 本目の樹木のように樹冠が小さな個体も存在するため、15 時までの全ての時間帯で歩道における直達日射透過率は約 0.5 であり（図 5-21 右上）、建物の影が生じる 16 時に最も透過率が低くなっている。図の下側には、LAD の 3 次元分布と直達日射透過率を、歩道を見通す視点で示している。日射遮蔽の必要性が高まる 12 時であっても、樹影で覆われる面積が少ないことを視覚的に確認することが可能である。以上のように、商店などが並び人通りの多い歩道であるにも関わらず、日射遮蔽が十分にされていない。

水平投影面によるとクスノキの樹冠に覆われる通路であっても、午前 8 時には日射遮蔽効果を得られていない。しかしながら、太陽高度が高くなるに従い、樹影で覆われる面積が増加し正午には一面が濃い影で覆われ、この状態は午後 4 時まで持続されている。12 時以

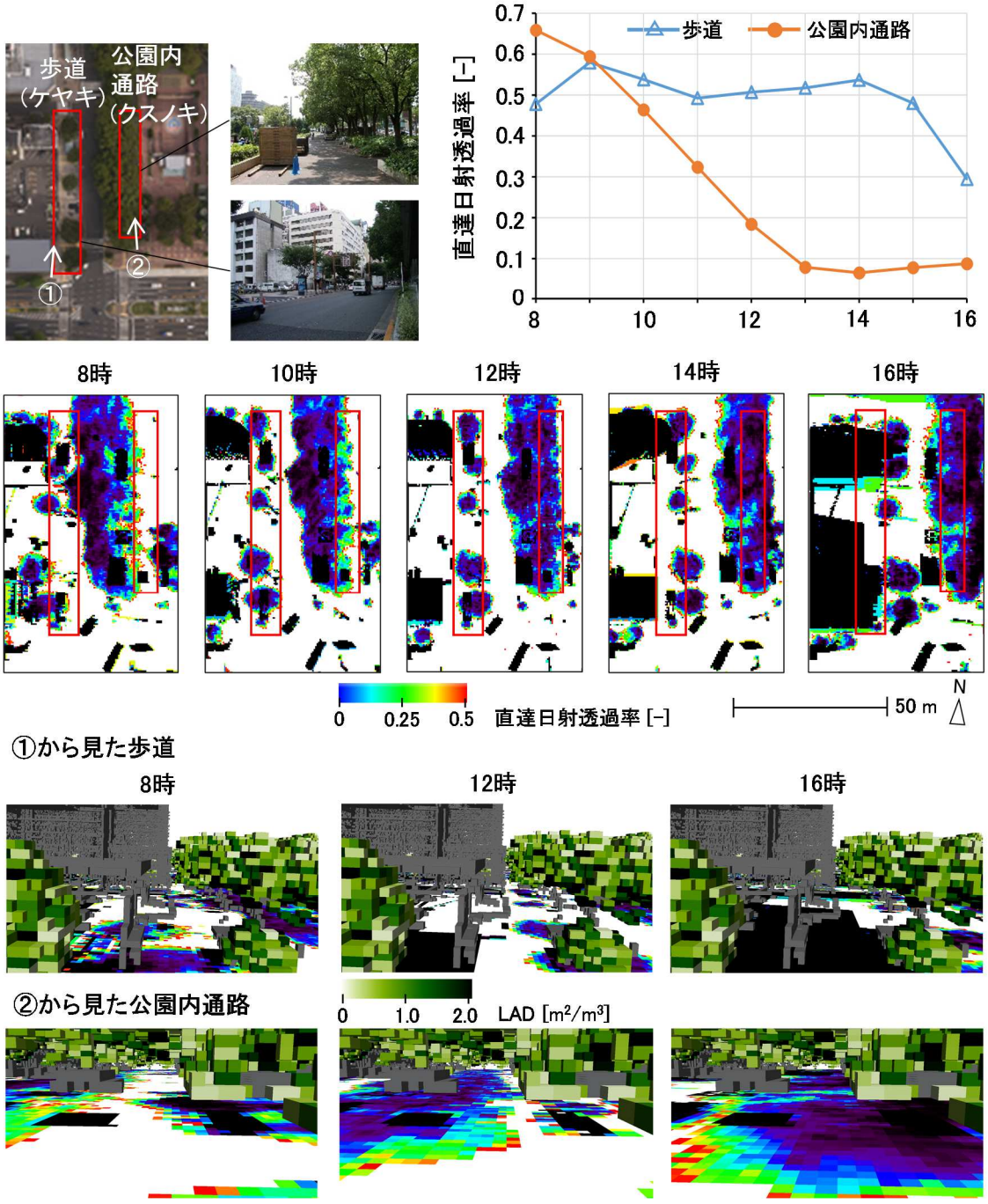


図 5-21　植栽間隔が異なるケヤキ並木とクスノキ並木を有する街路の日射透過率分布

降は通路の大部分において直達日射透過率が 0.1 以下である。図の右上に通路全体における直達日射到達率を示す。8 時には透過率が 0.6 以上であったが午後には 0.1 以下となっており、通路に良好な日射環境を形成していることが分かる。図の下側の 3 次元分布を見ても、通路が濃い樹影に覆われてゆく様子を視覚的に確認することができる。従来のように日陰

または日向と 2 値化した評価では、日射透過率が低い樹木も高い樹木も同一に評価される。本研究で提案した手法により、上述のクスノキのように日射遮蔽効果が高い樹木を区別して、かつ定量的に評価を行うことができる。

5.5.4　樹木の生育状況の違いが熱環境緩和効果に及ぼす影響

5.5.3 の結果から、久屋大通のクスノキ並木は高い日射遮蔽効果を有していると考えられる。しかしながら、全てのクスノキが同様な状態に保たれているわけではない。図 5-22 の上側に、テレビ塔より南側を望み撮影した写真を示す。クスノキが樹冠全体の葉の量が変わ

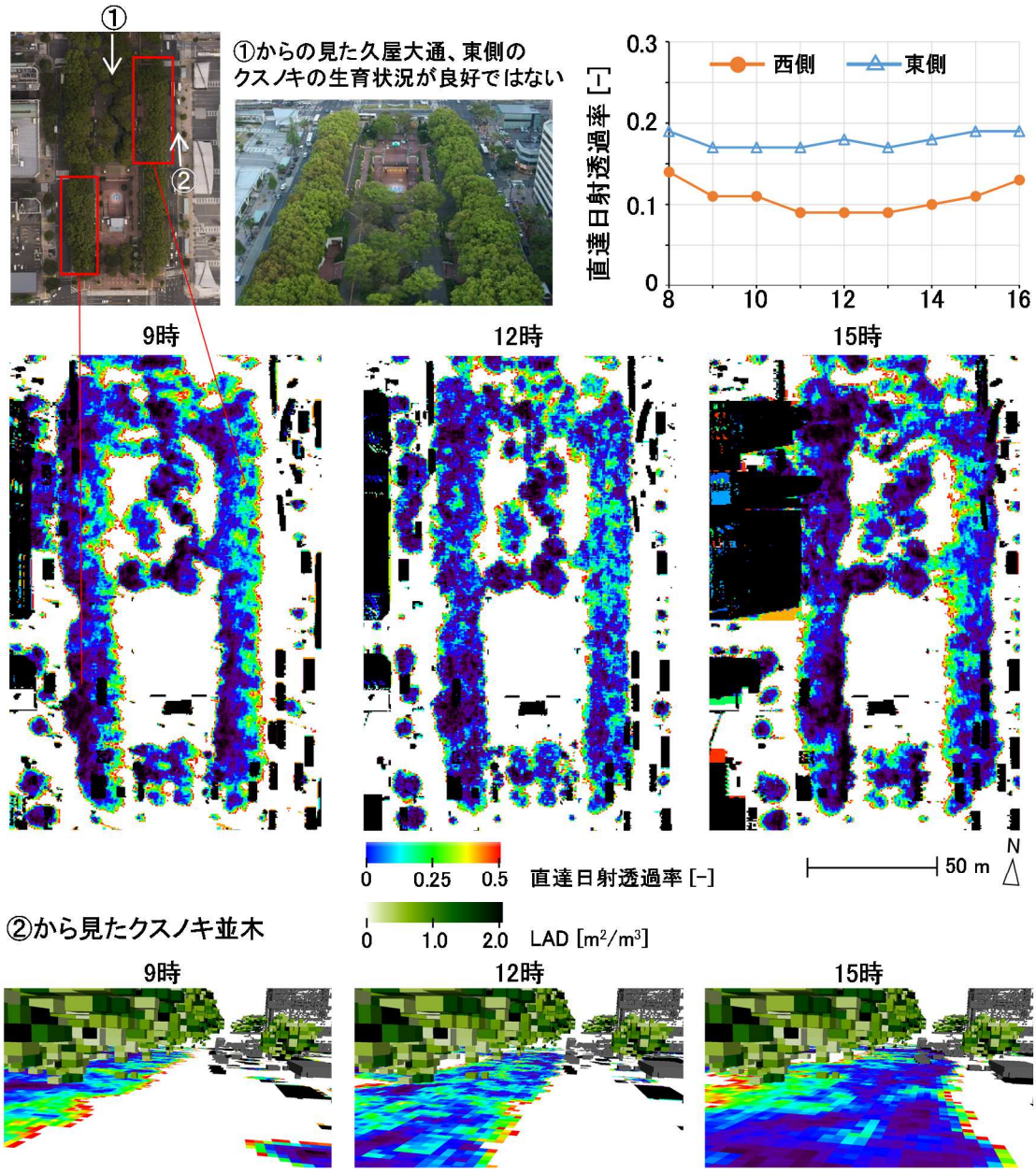


図 5-22　生育状況が異なるクスノキの日射遮蔽効果の違い

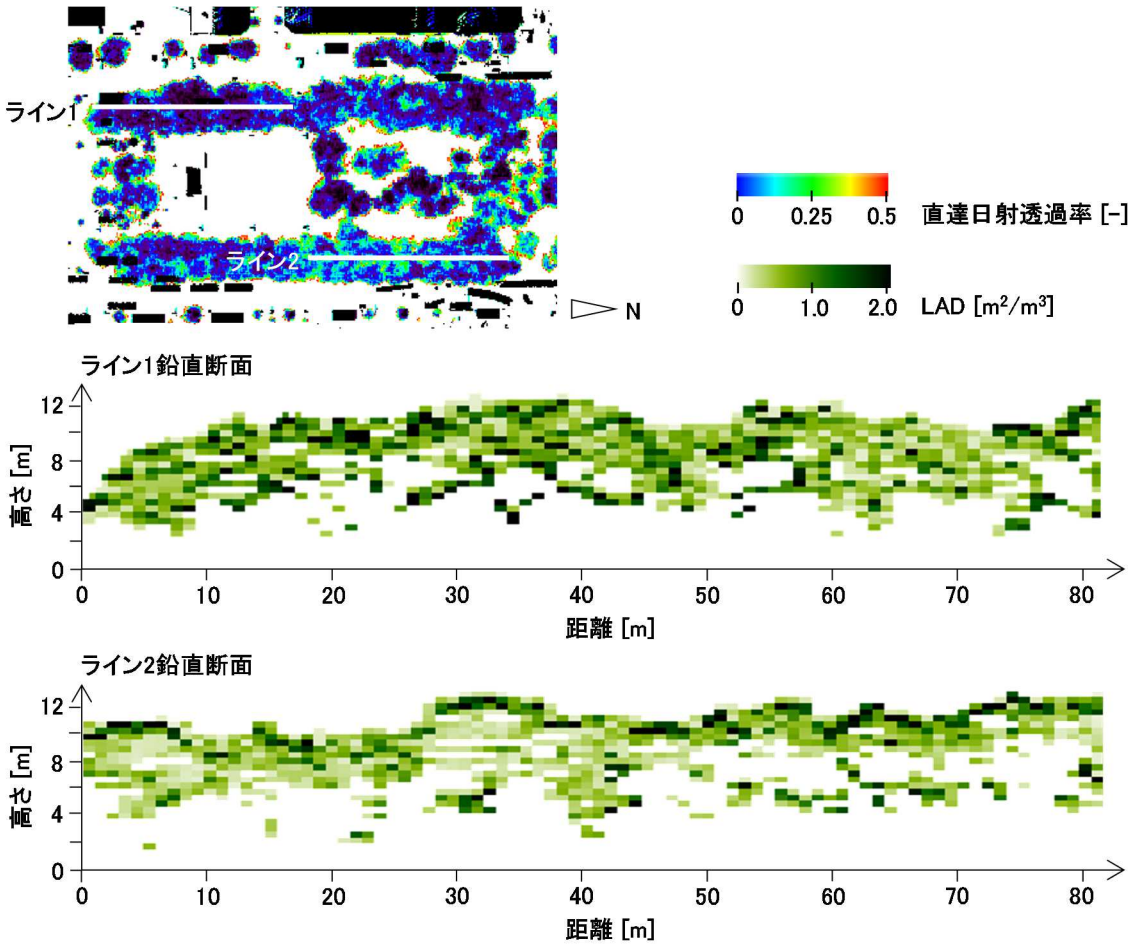


図 5-23　生育状況が異なるクスノキの LAD 分布

るほど剪定された様子や枯れている様子は見られない。しかしながら、東側の一部に葉が茶色がかった領域が見られ、生育状況が良好ではないと考えられる。図 5-23 に、5.5.3 で対象とした西側のクスノキ並木と、東側の生育状況が良好ではない並木の LAD 分布の鉛直断面を示す。西側と東側の並木では明確に LAD の差が確認できる。東側においては、上部にのみ葉が分布する個体や、樹冠の内部に葉が分布していても LAD が小さい個体が多い。同様の樹種で同様の場所に分布する樹木であっても、樹冠内部の構造は大きく異なることが分かる。このような状況が樹木の熱環境緩和効果に及ぼす影響について考察する。

図 5-22 左上の航空写真において、赤枠により囲んだ領域のうち西側の領域が 5.5.3 において対象としたクスノキ並木である。この領域の樹木は各時刻において直達日射透過率が小さい。しかしながら、その北東側には透過率の大きい領域が存在する。これは図の上部の写真に示す生育状況が良好ではない領域と一致する。直達日射透過率を見ると、西側の並木においてはほとんど見られない透過率が 0.2 以上の場所が多く存在している。図 5-22 の右

上には、5.5.3 で対象とした西側のクスノキ並木と、生育状況が良好ではない東側のクスノキ並木の直達日射透過率の日変化を示している。西側の並木は、正午前後に直達日射透過率が 0.1 以下となるが、東側の並木では西側に比べて 0.08～0.09 大きい。図 5-22 の下側には特に直達日射透過率が大きい部分の LAD の 3 次元分布と透過率の分布を示す。同じクスノキ並木の樹冠下の空間であるにも関わらず、一面が透過率の低い樹影で覆われていた図 5-21 とは大きく異なっていることが分かる。

以上のように生育状況が異なる樹木において直達日射透過率が異なったが、図 5-23 に示すような樹冠構造の違いは樹冠による光合成有効放射の吸収量（APAR)、すなわち樹木の蒸散作用にも大きく影響する。図 5-24 に、西側と東側のクスノキ並木の APAR の分布の鉛直断面を示す。東側の並木では、樹冠最上部においては APAR が大きいが、樹冠内部に分布する葉の量が少ないため樹冠全体の吸収量は少ないと考えられる。一方、西側の並木では樹冠内部にも葉が分布しているため、各層で PAR が吸収されていることが分かる。

図 5-24 の下側では、西側の並木の中で特に葉が多い領域（航空機 LiDAR による LAI の推定値は 4.1 m^2/m^3）と、東側の並木の中で特に葉が少ない領域（航空機 LiDAR による LAI の推定値は 2.7 m^2/m^3）の APAR とそれにより算出される蒸散量を比較している。各時刻において、葉が多い部分の APAR が 10～15%大きい。これにより蒸散量には 20%の差が生じている。重量計測を用いた単木樹木の蒸散量の測定結果[5-7]から、本研究で解析を行っている時間帯における蒸散量を一日の蒸散量の 80%と見なすと、一日あたりの蒸散量は葉の多い部分と少ない部分でそれぞれ 9.1 kg/m^2･day と 7.1 kg/m^2･day である。既往研究における蒸散量の実測結果には、以下のものが挙げられる。これらは、CASBEE-HI における樹木の蒸散作用の評価の点数を決定する際にも参考にされている。

・イチョウ：9.5 kg/m^2･day, 5.4 kg/m^2･day, 14.3 kg/m^2･day[5-17) 5-18)]
・プラタナス：20.0 kg/m^2･day, 22.0 kg/m^2･day , 18.2 kg/m^2･day[5-17) 5-18)]
・ケヤキ：43.5 kg/m^2･day [5-19)]
・ケヤキ：5.6 kg/m^2･day [5-7)]
・コウライシバ：3.6 kg/m^2･day[5-20)]

一般的にクスノキは蒸散量が多いと言われる樹種であるが、本研究での算出値は既往研究の値に比べて小さい。この理由の 1 つとして、既往研究における測定方法の問題が挙げられる。樹液流量に基づく方法や樹冠の一部で測定した値を樹冠全体に適用する方法などが用いられていたと考えられ、既往研究の値が正しいとは言えない。また、本研究では実際の都市の樹木と同様に、潅水・排水経路や根を張ることができる範囲が制限された状態での単木の重量計測結果をもとに蒸散モデルのパラメータを決定している。そのため、既往研究

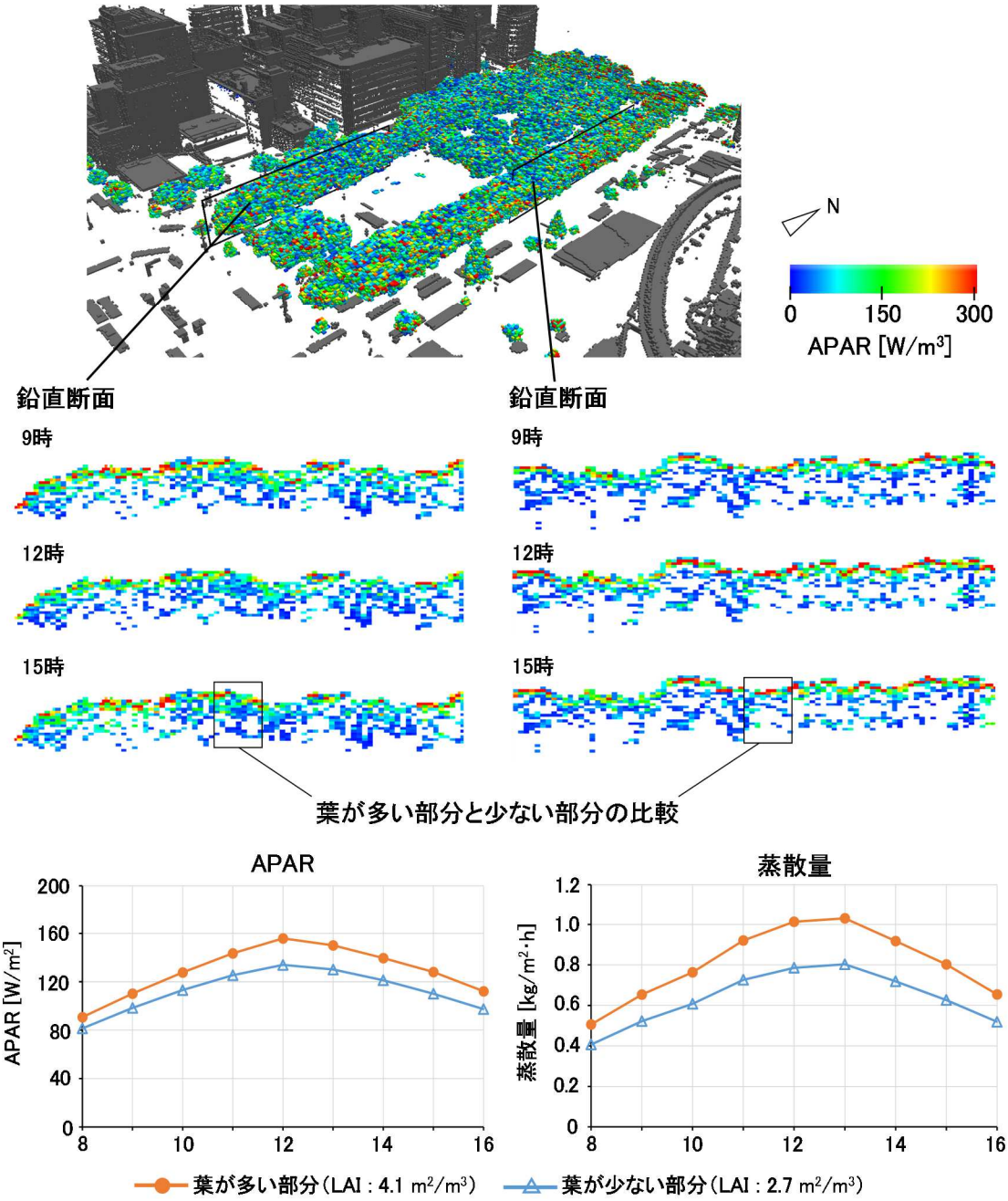


図 5-24　生育状況が異なるクスノキの APAR と蒸散量

の値に比べて小さいことは、実際の都市の樹木が置かれた状況を表していると考えられる。また、5.5.2 で述べた通り樹冠全体の葉の量が変わる剪定ではないものの、交通などのための部分的な剪定により、樹冠のボリュームが少ない（LAI が小さい）ことも影響している。

本節では生育状況が異なるために、同様の場所に分布する同様の樹種であっても熱環

環境緩和効果に明らかな差があることを示した。今後は樹冠全体の葉の量が変わるような剪定や樹木が枯れた状態など、より熱環境緩和効果に差が生じる状況においても評価を行い、問題点を指摘してゆく。また、冬季においてはケヤキのように葉が落葉し、樹冠の下を通行する人物や滞在する人物が日射を取得できることが望まれる。4 章で述べた航空機 LiDAR による枝の情報取得のための課題に取り組み、冬季の熱環境評価も行ってゆく。

5.5.5 周辺の建物の日陰が樹木の蒸散作用に及ぼす影響

都市空間においては、樹木の形態が同様であっても周辺の空間形態によって蒸散量が異なる。図 5-25 に、西側に高さ 30 m の建物が存在する場所のケヤキ並木の APAR と蒸散量の日変化を示す。図の上側は、各 voxel の APAR と蒸散量を午前 10 時から 2 時間おきに示している。午前 10 時と正午においては画像内のケヤキとクスノキで大きな差は見られない。しかしながら、14 時においては APAR が大幅に減少し、それにより蒸散量も低下している。これは西側から日射が入射する午後になると、ケヤキ並木が建物の日陰になるためである。図 5-25 の下側はこれを定量的に示しており、図 5-25 上部の赤線で囲んだ 5 本のケヤキに対する APAR と蒸散量である。比較のために、建物が存在しない場合に樹木が取得できる PAR と蒸散量も示している。午前は建物の影響はないが、13 時の APAR の直達成分は建物が存在しない場合の 50%であり、14 時からは天空成分よりも小さくなっている。0 ではなのは建物の間から入射する成分が存在するためである。蒸散量の変化を見ると、建物が存在しない場合には、5.5.4 で対象とした葉の多いクスノキと同程度の蒸散量が期待できるが、午後にはその半分以下に減少する時間帯もある。一日の蒸散量は建物が存在しない場合には 9.4 kg/m²･day である。実際には 7.0 kg/m²･h であり、建物の影響により 25 %減少している。午後に限定すると 48 %の減少であり、建物を考慮しなければ蒸散量を 2 倍に過大推定することになる。

一般的にケヤキは蒸散量が多いといわれるが、5.5.4 のクスノキと同様に、本研究での算出値は既往研究の蒸散量よりも少ない。都市のケヤキは下部が剪定されているものが多く、上部は葉が密であり日射遮蔽効果は高いが、樹冠全体の葉の量は少ないため蒸散量は既往研究で述べられている値に比べて小さいと考えられる。

5.5.6 従来の評価方法との差異

最後に、従来の樹木の日射遮蔽効果と蒸散作用の評価と本研究で提案した手法による樹木の 3 次元情報を用いた場合の評価の差について述べる。図 5-26 に示す久屋大通内の 3 つの街路に対して評価を行う。従来の評価方法において基準となる樹冠の水平投影面積（緑

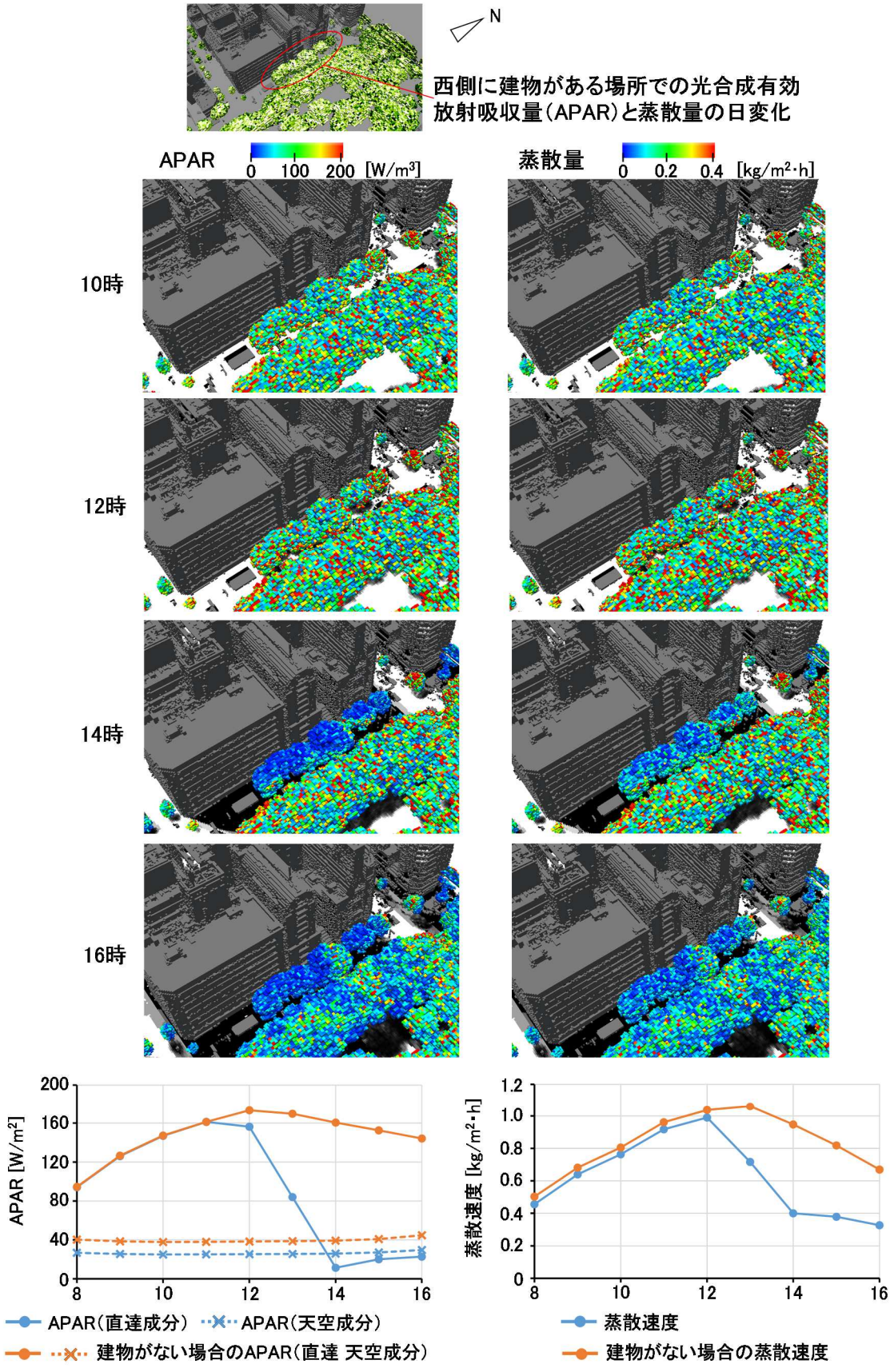


図 5-25　建物の日陰におけるケヤキの蒸散量

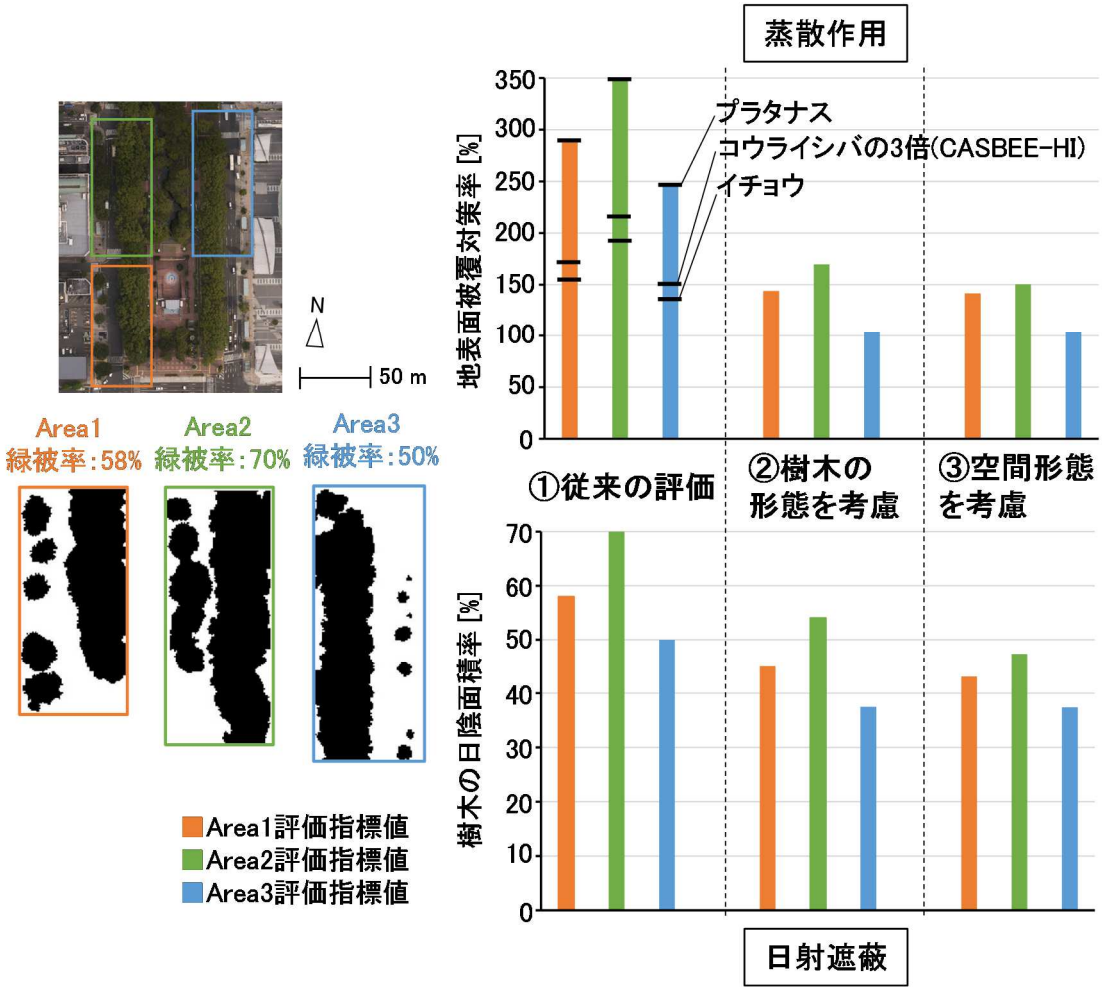


図 5-26　従来の評価方法と本研究による評価の違い

被率）はそれぞれ 58%, 70%, 50%である。図の右側には緑被率に基づく従来の評価指標値と本研究で提案した手法により推定した樹木の 3 次元情報を用いた場合の指標値、航空機 LiDAR を用いることで可能となった建物など周辺の空間形態を考慮した評価指標値を日射遮蔽効果と蒸散作用について示している。日射遮蔽効果については、緑被率をそのまま使用していた。しかしながら、実際には樹木は日射を全て遮っているわけではない。また、5.5.4 で述べた通り個々の樹木によって日射透過率が異なるため、従来の評価方法では日射透過率が低くより快適な木陰空間を形成する樹木を評価することができない。本研究で提案した手法による情報を用いることで、図 5-26 の①から②のように実際に樹冠を透過する日射量や個々の樹木の透過率の違いを評価可能である。CASBEE-HI における評価では 10%ごとに評価レベルが変わることから①と②の差は大きいと言える。Area 3 のクスノキは生育

状況が良好ではないため①から②への減少率が大きい。剪定やより明らかな生育不良がある場合にはさらに①から②で減少すると考えられ、今後はそのような対象の評価も行ってゆく。また、航空機LiDARを用いることで樹木周辺の建物の形状情報も得ることができる。そのため、建物の日陰になる場所は樹木による日陰とは区別して扱うことも可能である。

蒸散作用については、従来の評価指標として既往研究による実測結果を記載した。縦軸はCSBEE-HI の評価と同様にコウライシバが一面を覆っている状態を 100%としている。既往研究で報告されている値にはばらつきがあるが、これは測定方法の違いや樹木の特徴の違いによるものである。都市空間の樹木は樹種・剪定・生育状況などにより個々の樹木で形態が異なるため、あらかじめ基準を設定して評価することは難しい。図の①から②のように、本研究による蒸散量は既往研究の値に比べて小さくなった。重量計測に基づく蒸散モデルのパラメータを用い、本研究で提案した手法により樹冠形状と LAD 分布を考慮したため実際の都市空間の樹木の特徴を表現していると言える。本研究の方法により葉の量の差による蒸散量の差も評価が可能であり、Area 3 においては従来の評価指標に対する減少率が最も大きく、既往研究において蒸散量が少ないイチョウに対しても 70%ほどの蒸散量である。また、建物の日陰により蒸散量が減少することも評価可能であり、Area 1 と Area 2 は従来の評価では差が見られるが、本研究による評価では差は小さい。

以上、本研究の方法により樹木の形態や周辺の空間形態などの実態を踏まえた評価が可能となった。その場合の評価指標値は従来の評価方法による値と大きく異なることから、本研究で提案した航空機 LiDAR を用いた樹木の 3 次元情報の推定手法の有用性を確認することができた。

5.6 まとめ

本章では、本研究で提案した手法により航空機 LiDAR データから推定した樹木の 3 次元情報と既往の植生放射伝達モデルを用いて、実際の都市空間において樹木の日射遮蔽効果と蒸散作用を評価した。植物群落 PAR 分布測定装置により樹冠下で PAR の分布を測定し検証に用いることで、航空機 LiDAR による 3 次元情報と植生放射伝達モデルによる樹冠の直達日射の透過率と PAR の吸収量の予測精度を検証した。そして、航空機 LiDAR データの建物データを直接 voxel に分割して高 LAD の領域として入力することで、既往の植生放射伝達モデルを都市環境の評価に用いた。本章では以下の知見が得られた。

航空機 LiDAR と植生放射伝達モデルによる日射透過率と APAR の予測精度の検証

(1) 提案手法による LAD 分布と既往の植生放射伝達モデルを用いることで、太陽高度が 40° 以上の場合に 0.06 以内の誤差で PAR の透過率を予測可能である。樹影内の各位置における実測値と予測値の相関も高いことから、環境の評価に対して十分な精度で空隙を通過する日射量と樹冠の PAR の吸収量を予測できると言える。

(2) 既往研究の手法により推定した LAD 分布を用いた場合は、太陽高度が 55° と 40° の場合に透過率が 0.15 以上過大推定された。提案手法による誤差は 0.06 であり、その有用性を確認した。

(3) 対象樹木が航空機 LiDAR の観測幅の端に位置する場合、太陽高度が高い場合であっても透過率が過大推定される。太陽の方位によっては 2 倍過大推定することもあるため、天頂に近い位置からレーザーが照射されるように観測する必要がある。

都市空間における樹木の日射遮蔽効果と蒸散作用の評価

(4) 直達日射の透過率が 0.1 以下の樹影で覆われる街路が確認された。一方で、同様の樹種、植栽間隔であっても、生育状況にともなう葉の密度の差により、2 倍の日射を透過する並木も存在した。提案手法によりこれらの違いを定量的に評価することが可能となった。

(5) 西側に建物が存在する街路樹では、建物の日陰の影響により、建物が存在しないと仮定した場合に比べて午後における蒸散量が半分に減少していた。航空機 LiDAR は樹木だけでなく建物も含めた 3 次元の空間情報を取得することができるため、樹木周辺の空間形態も考慮して樹木の効果を評価することができる。

(6) 樹冠下部における剪定など実際の都市の樹木の形態と、都市緑化に見合う樹木の水収

支を踏まえた蒸散特性を考慮した結果、既往研究において指摘されている蒸散量の50%～70%程度であった。植物側のパラメータ（生理特性など）の整備が進むと、本研究の方法を用いることで、あらかじめ一定の蒸散量を仮定することなく評価することが可能である。

(7) 日陰面積率や芝生緑化に対する蒸散量の割合を用いて、日射遮蔽効果と蒸散作用を評価した結果、本研究の方法を用いた場合の評価指標値と従来の評価指標値の間には、評価レベルが大きく変わるほどの差が生じていた。このことから、本研究により整備が可能となった樹木の 3 次元情報の有用性が示された。

以上から、提案手法により推定される樹木の 3 次元情報と植生放射伝達モデルにより、個々の樹木の形態や周辺の空間形態を考慮して、日射遮蔽効果と蒸散作用を評価可能であることが示された。

引用文献

5-1) H. Kobayashi, and H. Iwabuchi：A coupled 1-D atmosphere and 3-D canopy radiative transfer model for canopy reflectance, light environment, and photosynthesis simulation in a heterogeneous landscape, Remote Sensing of Environment, 112, pp.173-185, 2008.

5-2) N. Bunnik：The multispectral reflectance of software radiation of agricultural crops in relation with their morphological and optical properties, Mededelingen landbouwhogeschool, Wageningen, 1978.

5-3) J. Goudriaan：Crop micrometeorology: a simulation study. Computer simulation in agriculture and its supporting scrience, Pudoc, Wageningen, 1977.

5-4) R. Leuning：A critical appraisal of a combined stomatal- photosynthesis model for C3 plants, Plant, Cell & Environment, 18(4), pp.339-355, 1995.

5-5) G. T. Collatz, J. T. Ball, C. Grivet, J. A. Berry：Physiological and environmental regulation of stomatal cond uctance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer, Agricultural and Forest Meteorology, 54, pp.107-136, 1991.

5-6) 手代木純, 輿水肇：CASBEE-HI 作成過程における緑の環境改善効果をめぐる論点, ランドスケープ研究, 74(5), pp.721-726, 2011.

5-7) 浅輪貴史, 梅干野, 清水克哉, 久保田光政：大型重量計を用いた単木樹木の蒸散量の計測法とその精度確認, 日本緑化工学会誌, 38(1), pp.67-72, 2012.

5-8) 山田宏之, 丸田頼一：樹木の日射軽減作用に関する研究, 造園雑誌, 51(2), pp.81-94, 1987.

5-9) 吉田伸治, 中井敦, 大岡龍三：樹木の成長, 樹種の違いが樹冠の葉面積密度・光学的深さに及ぼす影響－実測に基づく街路樹の日射遮蔽効果の評価手法に関する研究－, 日本建築学会環境系論文集, (605), pp.103-110, 2006.

5-10) E. Y. Ogunbadewa：Using SunScan canopy analyzer to assess seasonal changes in vegetation biophysical parameters in the northern England, Journal of Agricultural Science and Application, 1(1), pp.17-25, 2012.

5-11) Z. Conghui, Z. Shujuan, W. Fenghua, J. Dengfei and Z. Haihong：Spatial structure of LAI of spring soybean based on sunscan canopy analysis system and geo-statistic, Proceedings of the IEEE World Automation Congress 2010, pp.91-94, 2010.

5-12) L. Liu, D. Peng, Y. Hu and Q. Jiao：A Novel in Situ FPAR Measurement Method for Low Canopy Vegetation Based on a Digital Camera and Reference Panel, Remote Sensing, 5(1), pp.274-281, 2013.

5-13) P. G. Oguntunde, O. J. Olukunle, J. T. Fasinmirin and O. A. Abiolu：Performance of the Sun Scan canopy analysis system in estimating leaf area index maize, Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 14(3), pp.1-7, 2012.

5-14) Y. Song, M. Maki, J. Imanishi and Y. Morimoto：Voxel-based estimation of plant area density from airborne laser scanner data, Proceedings of the ISPRS Workshop Laser Scanning, Calgary, Canada, XXXVIII-5/W12, pp.209-212, 2011.

5-15) R. E. Bird：A simple, solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance, Solar Energy, 32(4), pp.461-471, 1984.

5-16) A. Kuusk：A fast, invertible canopy reflectance model, Remote Sensing of Environment, Vol.51, pp.342-350, 1995.

5-17) （社）日本造園学会編：造園ハンドブック, 技術堂, 1978.

5-18) 東京農工大学農学部田崎忠良研究室：街路樹の水分代謝に関する調査－特に水分代謝機構からみた樹勢診断, 1974.

5-19) 野島義照：都市における植生からの蒸散による夏季の温熱環境改善力に関する研究, 京都大学博士

論文, 1998.
5-20) 小野芳, 柳雅之, 工藤善, 手代木純, 輿水肇 ：屋上緑化における植物の蒸発散量, 日本緑化工学会誌, 32(1), pp.74-79, 2006.

第 6 章

結論

6.1 本研究の総括

樹木の熱環境緩和効果を活かした街づくりのため、樹種・剪定・生育状況などにより異なる個々の樹木の形態（樹冠の形状や葉の密度分布）を考慮して日射遮蔽効果と蒸散作用を評価できるように、航空機 LiDAR により樹木の 3 次元情報を推定する手法について研究を行った。樹木の 3 次元情報とは、従来から扱われてきた樹高や枝張だけでなく、樹冠形状や LAD 分布を含めた樹木の形態情報である。次の 2 点を軸として研究を実施した。(1)樹木の 3 次元情報を推定する手法を提案しその精度を検証することで推定手法の構築を行うこと、(2)提案手法により推定される 3 次元情報が、熱環境評価へ応用可能であることを示すことである。各章で得られた知見は以下の通りである。

第 2 章「樹木の環境調整効果評価のための航空機 LiDAR による三次元情報の推定手法」では、航空機 LiDAR により樹木の 3 次元情報を推定する手法を提案した。はじめに、樹木の環境調整効果の評価に必要な情報を整理し、熱環境緩和効果の評価には樹冠形状や LAD 分布も含めた 3 次元情報が必要であることを示し、環境調整効果の評価のための情報における位置づけを明確にした。次に、樹木の 3 次元情報を整備する観測方法について検討し、広域において樹冠内部も含めて高分解能な 3 次元空間情報を取得することができる方法として、航空機 LiDAR を採用した。既往研究を調査した結果、LAD 分布を推定するためには、正確なレーザーの軌跡のトレース方法、ラストパルスや中間パルスも用いた方法が課題であることを明らかにした。そして、1 つのレーザーに対する複数の反射パルスは連続して記録されることを利用して、ある反射点から対応する反射点までレーザーをトレースすることで、樹冠の内部構造を考慮して LAD 分布を推定することができる手法を提案した。

第 3 章「地上型 LiDAR による精度検証方法」では、第 2 章で提案した手法により航空機 LiDAR データを用いて推定した情報の精度を検証する方法について検討した。既往研究における地上での実測方法を整理し、高精度な 3 次元空間情報を航空機 LiDAR データとの位置のずれが少なく得ることができる地上型 LiDAR を用いることとした。地上型 LiDAR を用いた LAD 分布の推定手法には、既往研究において課題が残されていたため、刈り取りが可能な小規模なケヤキを用いて精度の改善方法を検討した。地上型 LiDAR による測定時に対象のケヤキをシートで覆うことで、既往研究の推定手法とその改善手法の精度検証を行った。また、voxel サイズ、測定距離、レーザーの照射密度が推定精度に及ぼす影響を調査することで、航空機 LiDAR の検証への適用性を検討した。その結果、各 voxel において地

上レーザー入射率が最大の測定地点のデータを用いることで、既往研究の手法による精度を改善できることを明らかにした。平均的な LAD が 3 m^2/m^3 を越える密な層では、レーザーの入射数が確保されていても葉面積が過小推定されることを示した。このような密な層における検証は今後の課題となる。地上レーザー入射率が 0.8 以上確保されていれば、10 m の測定距離であっても LAD を推定できることを明らかにし、この条件で都市空間の樹木を対象に航空機 LiDAR の検証用データを取得した。

第 4 章「航空機 LiDAR による三次元情報の推定と精度検証」では、第 2 章で提案した手法により樹木の 3 次元情報を推定し、第 3 章で検討した地上型 LiDAR による方法を用いて、推定精度を検証した。はじめに、地上型 LiDAR データを用いて樹冠の投影面を再現することで、日射遮蔽効果の評価のためには 0.5 m の空間スケールの情報が必要であることを示した。次に、地上型 LiDAR と航空機 LiDAR の点群の比較、点群を voxel 化した場合の voxel の分布の比較を行い、航空機 LiDAR で得られる情報は 1 m の空間スケールであることを明らかにした。そこで、1 m の空間スケースで LAD 分布を推定し、樹冠の投影面の再現に適用できるように樹冠の外形を高分解能化する方法を用いることとした。提案した手法による LAD 分布の精度を地上型 LiDAR による LAD 分布を用いて検証した結果、提案手法により既往研究の手法による推定誤差を改善できることを明らかにした。

第 5 章「都市空間における樹木の熱環境緩和効果の評価」では、第 4 章で精度を確認した本研究で提案した手法により推定した樹木の 3 次元情報と既往の植生放射伝達モデルを用いて、実際の都市空間において樹木の日射遮蔽効果と蒸散作用を評価した。はじめに、PAR 分布測定装置を用いることで樹冠下の PAR 分布を実測し、航空機 LiADR による樹木の 3 次元情報と植生放射伝達モデルによる日射透過率と光合成有効放射吸収量の予測精度を検証した。既往研究の手法により推定した樹木の 3 次元情報を用いた場合、太陽高度が低くなることで誤差が大きくなったが、本研究で提案した手法により太陽高度によらずに日射透過率と光合成有効放射吸収量を予測できることを明らかにした。また、観測方法としては、天頂に近い位置からレーザーが照射されるようにすることが有効である。次に、航空機 LiDAR データの建物データを voxel に分割して高 LAD の領域として入力することで、既往の植生放射伝達モデルを都市環境の評価に用いた。同地区にある同樹種の並木であっても、2 倍日射透過率が異なることや、既往研究における蒸散量をもとに評価を行うと、都市空間の樹木の形態の特徴や周辺の空間形態を考慮した場合に比べて蒸散量を 1.5〜2 倍過大推定することを明らかにし、本研究で整備が可能となった情報の有用性を示した。

6.2　今後の課題

(1) 本研究課題の内容について

樹木の 3 次元情報の推定手法

レーザーのフットプリント内の葉の量の違いによる推定誤差の改善が挙げられる。レーザーのフットプリント内の葉の量はレーザーの反射強度に関係するため、推定手法に反射強度を組み込む方法を検討する。また、これは樹冠下部での過大推定の改善にも寄与する。レーザーと葉の接触確率のカウント方法と反射強度の対応を検討する必要がある。クスノキはケヤキに比べて LAD の推定誤差が大きかった原因は、このレーザーのフットプリント内の葉の量の違いであると考えられ、他の樹種に適用していくためにも反射強度を用いた手法を検討してゆく。本研究では、可能な限り樹冠全体を捉えるように測定した地上型 LiDAR データを用いたが、樹冠内の一部に限定してより詳細に葉や枝の分布と傾きを捉えたデータを用いた検証などを行ってゆく。

枝については、既往研究と同様に葉の点と枝の点を区別せずに扱った。実際には傾きや樹冠内での分布の特徴は葉と枝で異なると考えられる。また、蒸散作用に大きく影響する葉による光合成有効放射の吸収量を推定する場合にも葉と枝を分離する必要がある。今後、落葉期の航空機 LiDAR データや地上型 LiDAR データ、常緑樹の真下から測定し枝の分布を捉えた地上型 LiDAR データなどを用いて枝の扱いについて検討を行う。

推定手法の適用範囲

本研究では、平均的な樹冠の形態の特徴を持ったケヤキを対象に検証を行った。そのため、提案した手法により精度を改善できることや得られた推定誤差のオーダーは一般的な広葉樹に適用できると考えられる。反射強度を用いた手法を検討する際には、次のような樹木も対象に検証を行ってゆく必要がある。①本研究では検証対象外とした葉が密な樹木、②レーザーのフットプリント内の葉の量の差による誤差が大きくなると考えられる葉が疎な樹木、③樹冠構造の違いによる樹種間の推定精度の差も改善できることを示すための他の樹種。また、樹冠構造が異なる針葉樹を対象とした検証も今後の課題となる。

樹木の熱環境緩和効果の評価

本研究における蒸散作用の評価では、風速や葉温を一定とした。風速は、CASBEE-HI における樹木の蒸散量の芝生に対する掛け率を決定する際も大きな論点となっていた。都市には単木、並木、公園のようにまとまった樹木など様々な形態の樹木が存在する。また、都市においては建物の配置により気流性状が異なる。そのため、あらかじめ掛け率を設定する方法では現状の樹木の蒸散作用を評価することはできない。本研究のように、voxel ベース

で樹木の情報を整備することは、CFD シミュレーションの入力条件となる点でも有用である。今後は、風のデザインと樹木の効果を活かした設計をつなぐために、航空機 LiDAR データの CFD シミュレーションへの応用を検討してゆく。葉温は、蒸散作用だけでなく樹木からの顕熱放散量にも影響する。葉温は樹冠内外の空間形態や風速など航空機 LiDAR により整備可能な情報に依存するため、今後考慮に入れてゆく。

(2) 本研究を踏まえた今後の展開について

都市熱環境情報の整備

本研究では樹木の形態情報の整備に着目したが、都市熱環境を議論する上で重要な建物の形状、建物や地表面の表面材料・日射反射特性の整備にも、航空機 LiDAR が貢献することができる。航空機 LiDAR により得られる点群を用いて建物の 3 次元モデルの作成が行われているように、建物の形状については多くの研究例が見られる。材料の情報については、反射強度を用いた表面材料の推定が行われている。しかしながら、対象物までの距離やレーザーの入射角による反射強度の差の補正も十分な精度では行われていない。また、従来の航空機 LiDAR では、ある 1 つの波長帯のレーザーを用いて観測を行っている。そのため、都市空間を構成する材料の反射特性と反射強度の関係を分析することにより、反射強度の補正方法や材料の種類・日射反射特性の推定方法について検討してゆくことが大きなテーマとなる。

情報の整備・結果の出力

本研究では、航空機 LiDAR データからの樹木の 3 次元情報の推定や植生放射伝達モデルへの情報の入力は手動で行った。しかしながら、本研究の手法を行政の緑化計画の中で実用化してゆくためには、スムーズに処理を行うことができるシステムが必要となる。各自治体において GIS 上に地図情報が整備されおり、近年では防災情報の整備も進んでいる。そこに環境情報も合わせて整備してゆくことは、都市空間における環境負荷の低減や快適性の向上に対して重要である。すなわち、GIS 上に都市熱環境情報を整備し、数値シミュレーションとの情報の入出力や樹木の効果や熱環境の可視化が可能なシステムが求められる。行政と市民のコミュニケーションを可能にするという観点から、特に WebGIS 上に情報を整備・可視化することが有用であると考えられる。WebGIS としては Google Maps と Google Earth の API などに着目し、本研究で整備が可能となる情報や今後研究対象とする他の熱環境情報の出力先についても検討を行ってゆく。

既存の航空機 LiDAR データの利用

本研究で用いたような高分解能航空機 LiDAR 観測は、一般的に実施が可能ではあるもの

の、現在は一部の地形などの測量に用いられているのみであり高価である。各地方自治体が都市熱環境の改善に関心を示していることを考慮すると、熱環境に配慮した街づくりの中で緑化重点地区のような領域の情報整備に航空機 LiDAR が活用される可能性は充分にあると言える。しかしながら、航空機 LiDAR データの整備が難しい自治体も存在すると考えられる。そのため、既存のデータの活用も考えてゆく必要がある。国土地理院は 5 m メッシュの標高データの整備を行っており、これは水平方向に 2.5 m 間隔の航空機 LiDAR データにより作成されている。また、水平方向に 0.1 m 間隔の航空機 LiDAR データを整備している航測会社も見られる。このようなデータは新たに高分解能航空機 LiDAR 観測を行うことに比べて大幅に安価である。これらのデータは、ファーストパルス、ラストパルス及びシングルパルスから構成され、ファーストパルスとラストパルスの分解能も本研究で用いたデータに比べて低くなっている。しかしながら、樹冠の形状や日射透過率に関する情報は含まれている。2.5 m 間隔のデータは、広域において樹木の効果の概要を把握することに有用であり、0.1 m 間隔のデータは緑化重点地区のような領域において具体的に個々の樹木の効果を確認することに有用である。

本研究により、水平方向・距離方向に高分解能な航空機 LiDAR データが熱環境の評価に有用であることが明らかになったため、高分解能データを基準とすることで既存のデータの活用方法を検討してゆくことは大きなテーマとなる。以上のように、コスト・取得できる情報・対象領域のスケールに応じて情報の提供を可能とすることは、リモートセンシングを用いた環境計測を一般化してゆく上で重要なことである。

新たなセンサの活用

従来、レーザー計測は 1 つの波長帯のレーザーのみを用いていたため、マルチスペクトルセンサなどに比べて材料の分類は困難であった。これに対し、近年では一度に多波長のレーザーで観測を行うことができる装置が開発されている。また、反射パルスの波形の情報を得ることができる装置も開発されている。これらの観測装置の特徴は、枝と葉を分離してより詳細に樹冠の構造を捉えるのに有効である。今後、落葉期の地上型 LiDAR データや樹冠の下から測定し枝の分布を捉えた地上型 LiDAR データなどを比較に用いて、新たな観測装置の活用について検討してゆく。

複数波長の LiDAR は壁面も含めた材料情報の取得に対しても有効である。2 波長となるだけであっても大幅に材料の分類精度や日射反射率の推定精度が向上すると考えられる。また、レーザー計測と同時に熱赤外放射カメラによる観測を行うことができる航空機 LiDAR 観測システムも開発されている。樹木の形態や建物の形状および材料情報などとともに、3 次元の表面温度分布の情報も GIS 上に整備・可視化する方法や、それを用いた熱環境の評価方法についても検討を行ってゆく。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの皆様のご指導、ご支援、ご協力を頂きました。東京工業大学准教授　浅輪貴史先生には研究テーマの設定・研究方法、研究者としての姿勢、論文の執筆などあらゆる面で懇切なるご指導を賜りました。心より感謝と敬意を表します。

東京工業大学連携教授　梅干野晃先生には、地球惑星科学科の学部生として研究室に所属して以来、終始変わらぬ熱心なご指導と激励を賜り、赤外線学会に関連した活動など、研究以外にも貴重な経験をさせて頂きました。心より感謝申し上げます。

東京工業大学教授　田村哲郎先生、同准教授　木内豪先生、同准教授　錦澤滋雄先生、同連携准教授　小林秀樹先生には、論文発表会や審査会など機会あるごとに、貴重なご助言とご指導を賜りました。ここに深謝の意を表します。

中日本航空（株）宮坂聡氏には、共同研究の一環として航空機 LiDAR データを提供して頂き、さらにデータに関する質問などに答えて頂きました。ご助力が無ければ本論文は完成し得ませんでした。厚く御礼申し上げます。

リーグルジャパン（株）の方々には地上型 LiDAR による観測の機会を与えて頂き、データに関しても様々なことを教えて頂きました。このデータが無ければ本論文を完成させることはできませんでした。ここに感謝の意を表します。

佐賀大学准教授　中大窪千晶先生（当時東京工業大学助教）には、ゼミなどで常に的確なご指摘を頂き、異動後も学会などで多くのアドバイスを頂きました。深く感謝致します。ミサワホーム総合研究所　佐藤理人氏（当時東京工業大学特別研究員）には、機会あるごとに貴重な助言をして頂き、研究が進まないときにも常に温かい言葉をかけて頂きました。心より感謝申し上げます。

当時、東京工業大学特別研究員　高田眞人氏には研究内容に加えて英語でのプレゼンテーション方法などもご指導頂き、多くの国際会議で発表することができました。厚く感謝致します。当時、東京工業大学特別研究員　熊倉永子氏には、研究内容や学振の手続きなど常に温かく相談に乗って頂きました。心より感謝致します。東京工業大学社会人博士課程　親川昭彦氏、同社会人博士課程　平山由佳理氏にはともに博士論文をまとめる中で多くのご助言と励ましを頂きました。誠に感謝しております。修士課程から苦楽をともにし、半年早

く修了した河合英徳氏には、実測や博士論文の執筆時など幾度となく助けられました。心より御礼申し上げます。そして，秘書である薄葉千景さんをはじめ浅輪・梅干野研究室の全ての方に，日常生活や研究を進めていくなかで，ご支援を頂きました。厚く感謝致します。

最後に，今まで自分を育て，温かく見守っていてくれた両親に感謝します。

2014 年 2 月　押尾晴樹

発表論文一覧

【審査付論文】

1) 押尾晴樹，浅輪貴史，梅干野晃，宮坂聡 : 航空機LiDARを用いた都市空間における樹木の形状情報の抽出精度，日本リモートセンシング学会誌，Vol.33, No.5, pp.350-359, 2013.11（掲載済）（第4章）
2) 押尾晴樹，浅輪貴史，梅干野晃，本田友里香，清水克哉，久保田光政 : 地上型レーザースキャナを用いた単木の葉面積密度分布の推定方法とその精度検証，日本緑化工学会誌（投稿中）（第3章）
3) Haruki Oshio, Takashi Asawa, Akira Hoyano and Satoshi Miyasaka : An estimation of the leaf area density distribution of individual trees using high-resolution and multi-pulse airborne LiDAR data, Remote Sensing of Environment（投稿中）（第2章，第4章）
4) 押尾晴樹，浅輪貴史，梅干野晃，宮坂聡 : 航空機レーザー計測と植生放射伝達モデルによる都市緑化樹木の日射遮蔽効果の数値的評価と精度検証，日本ヒートアイランド学会論文集（投稿予定）（第5章）
5) 押尾晴樹，浅輪貴史，梅干野晃，宮坂聡 : 高分解能航空機LiDARと数値シミュレーションを用いた都市街区における樹木の熱環境調整効果の評価，日本建築学会環境系論文集（投稿予定）（第5章）

※その他の審査付論文

1) 押尾晴樹，何江，梅干野晃 : 航空機多重分光画像を用いた戸建住宅地における建物等の日陰に存在する樹木の抽出，日本建築学会環境系論文集，Vol.75, No.653, pp.621-627, 2010.7

【国際会議】

全文審査付プロシーディング

1) Haruki Oshio, Takashi Asawa, Akira Hoyano and Satoshi Miyasaka : Mapping of three-dimensional tree structure in urban spaces using high-resolution airborne LiDAR, Proceedings of the 5th International Buildimg Physics Conference, pp.1241-1246, Kyoto, Japan, 2012.5（口頭発表）（第4章）
2) Haruki Oshio, Takashi Asawa, Akira Hoyano and Satoshi Miyasaka :Accuracy of external form of individual trees acquired by high-resolution airborne LiDAR, Proceedings of the Joint Urban Remote Sensing Event 2013, pp.103-106, Sao Paulo, Brazil, 2013.4（口頭発表）（第4章）

アブストラクト審査付プロシーディング

3) Haruki Oshio, Takashi Asawa, Akira Hoyano and Satoshi Miyasaka : Estimation of tree crown structure in urban areas using high resolution airborne LiDAR, 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, pp.2145-2148, Vancouver, Canada,

2011.7（ポスター発表）（第4章）

4) Haruki Oshio, Takashi Asawa, Akira Hoyano and Satoshi Miyasaka : Detailed reproduction of three -dimensional crown shape and foliage distribution of trees in an urban area using high -resolution airborne lidar, 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, pp.6621-6624, Munich, Germany, 2012.7（ポスター発表）（第4章）
5) Haruki Oshio, Takashi Asawa, Akira Hoyano and Satoshi Miyasaka : acquisition accuracy of high-resolution airborne lidar for capturing external geometry of individual trees in urban spaces, International Symposium on Remote Sensing 2013, Chiba, Japan, 2013.5（口頭発表）（第4章）
Student Award 受賞

【口頭発表】

1) 押尾晴樹，浅輪貴史，梅干野晃，宮坂聡：高分解能航空機 LiDAR を用いた市街地における樹種分類に関する検討，日本リモートセンシング学会第 49 回(平成 22 年秋季)学術講演会論文集，pp.149-150, 鹿児島，2010.12
2) 押尾晴樹，浅輪貴史，梅干野晃，宮坂聡：航空機 LiDAR を用いた都市空間における樹木の三次元情報の計量化 その 1 樹冠の三次元構造の推定に関する検討，日本リモートセンシング学会第 50 回(平成 23 年春季)学術講演会論文集，pp.233-234, 東京，2011.5
3) 押尾晴樹，浅輪貴史，梅干野晃，宮坂聡：航空機 LiDAR を用いた市街地における樹木の三次元情報の整備手法 その 1 地上型 LiDAR との比較による樹冠形状情報の取得精度に関する検討，2011 年度日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 環境工学Ⅰ D-1, pp.881-882, 東京，2011.8
4) 押尾晴樹，浅輪貴史，梅干野晃，宮坂聡：航空機搭載型近赤外レーザースキャナを用いた都市空間における樹木形状の可視化，第 21 回日本赤外線学会研究発表会資料，pp.50-51，浜松，2011.10
5) 押尾晴樹，浅輪貴史，梅干野晃，宮坂聡：航空機 LiDAR を用いた都市空間における樹木の三次元情報の計量化 その 3 単木樹冠における葉群密度分布情報の取得精度の検証，日本リモートセンシング学会第 52 回(平成 24 年春季)学術講演会論文集，pp.217-218, 東京，2012.5
6) 押尾晴樹，浅輪貴史，梅干野晃，宮坂聡：航空機レーザー計測を用いた都市街区における樹木の日射遮蔽効果の可視化に関する基礎的研究，日本ヒートアイランド学会第 7 回全国大会予稿集，pp.124-125，京都，2012.7
7) 押尾晴樹，浅輪貴史，梅干野晃，宮坂聡：航空機 LiDAR を用いた市街地における樹木の三次元情報の整備手法 その 2 単木樹冠における葉面積密度分布とレーザー点群密度分布の関係，2012 年度日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 環境工学Ⅰ D-1, pp.765-766, 名古屋，2012.9
8) 押尾晴樹，浅輪貴史，梅干野晃，宮坂聡：航空機搭載型近赤外レーザースキャナを用いた都市街区における樹木の日射遮蔽効果の推定手法に関する研究，第 22 回日本赤外線学会研究発表会資料，pp.40-41，大阪，2012.11 **優秀発表賞受賞**

9) 押尾晴樹，浅輪貴史：航空機 LiDAR による樹木の形態情報の整備手法-都市緑化空間の放射環境評価へ向けて-，平成 25 年度第 2 回動体計測研究会，東京，2013.7
10) 押尾晴樹，浅輪貴史，梅干野晃，宮坂聡：航空機からの高分解能レーザー計測による単木の葉面積密度分布の推定手法，日本ヒートアイランド学会第 8 回全国大会予稿集, pp.56-57, 長野，2013.7
11) 押尾晴樹，浅輪貴史，梅干野晃，宮坂聡：航空機 LiDAR を用いた市街地における樹木の三次元情報の整備手法 その 3 voxel モデリングによる樹冠外形の再現，2013 年度日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 環境工学Ⅰ D-1, pp.861-862, 北海道，2013.8

筆者が共著のもの

1) 浅輪貴史，梅干野晃，押尾晴樹，宮坂聡：航空機 LiDAR を用いた都市空間における樹木の三次元情報の計量化 その 2 樹冠形状情報の取得精度，日本リモートセンシング学会第 50 回(平成 23 年春季)学術講演会論文集，pp.245-246, 東京，2011.5
2) 本田友里香，浅輪貴史，梅干野晃，押尾晴樹：地上型レーザースキャナを用いた都市空間における樹木の三次元情報の取得　微気候予測のための樹木のモデル化に向けた検討，日本ヒートアイランド学会第 6 回全国大会予稿集, pp.118-119, 筑波，2011.7
3) 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 回日本赤外線学会研究発表会資料，pp.82-83, 浜松，2011.10
4) 本田友里香，浅輪貴史，梅干野晃，押尾晴樹：清水克哉：地上型レーザースキャナを用いた樹木の葉面積密度分布推定に関する検討，日本ヒートアイランド学会第 7 回全国大会予稿集, pp.94-95, 京都，2012.7　**ベストポスター賞受賞**
5) 本田友里香，浅輪貴史，梅干野晃，押尾晴樹，清水克哉：都市緑化を対象とした単木樹の熱・水収支特性の計量化と数値モデル化 その 6 地上型レーザースキャナによる LAI 算出手法の検討，2012 年度日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 環境工学Ⅰ D-1, pp.895-896, 名古屋，2012.9
6) 本田友里香，浅輪貴史，梅干野晃，押尾晴樹，清水克哉，久保田光政：都市緑化を対象とした単木樹の熱・水収支特性の計量化と数値モデル化 その 7 地上型レーザースキャナによるケヤキの三次元形態のモデル化と放射収支解析，2013 年度日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 環境工学Ⅰ
D-1, pp.917-918, 北海道，2013.8

【その他】

受賞

・ベストポスター賞，日本ヒートアイランド学会，2012 年 7 月
・優秀発表賞，日本赤外線学会，2012 年 11 月
・ISRS2013 Student Award, International Symposium on Remote Sensing, 2013 年 5 月

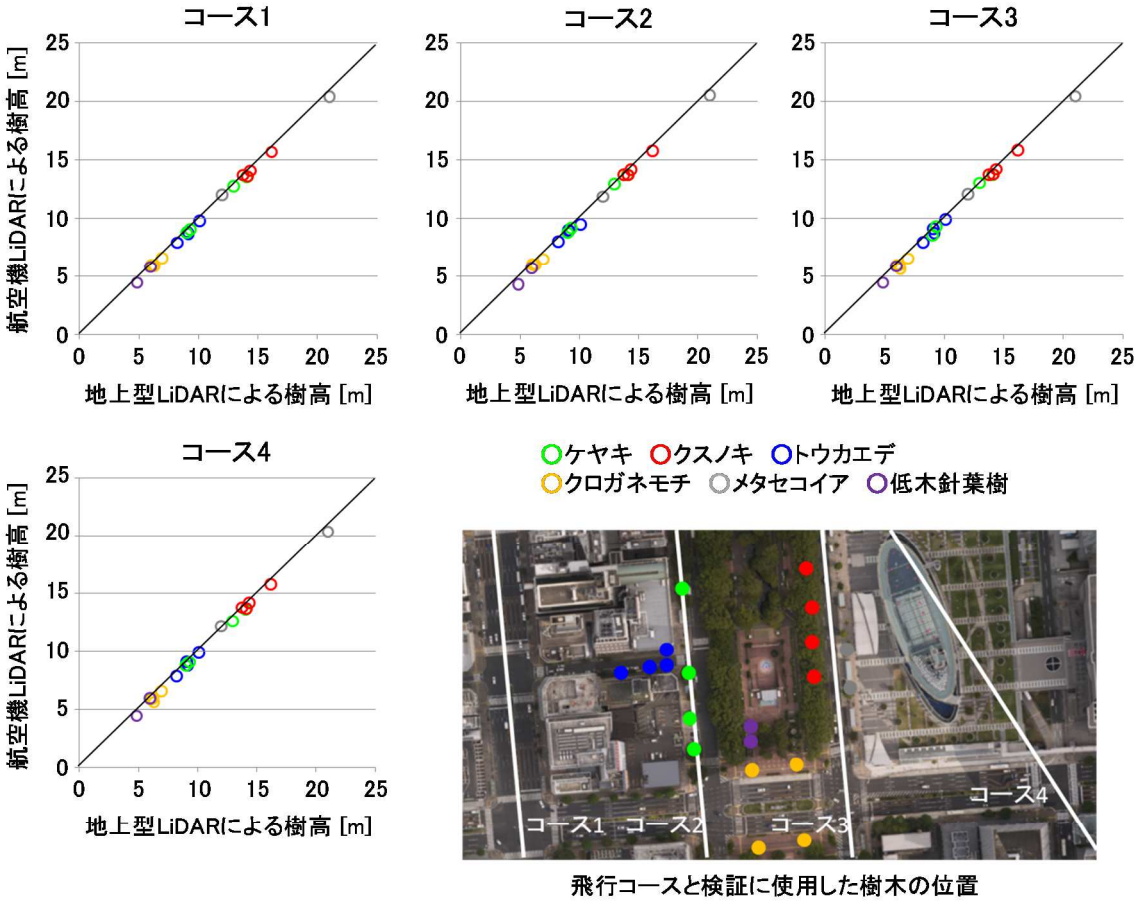
付録

1.　航空機 LiDAR データと色情報の合成（第 2 章）



図 A-1　航空機 LiDAR データの各点に、LiDAR と同時に可視カメラで取得した色情報を与えた結果。同様にして近赤外カメラや熱赤外カメラによる撮影も同時に行うことができる観測システムも開発されている。図は飛行コース 2 と 3 のデータを示している。拡大図に示すように建物の壁面の情報も取得することができている。

2. 航空機 LiDAR による樹高の観測精度（第 2 章）



飛行コースと検証に使用した樹木の位置

航空機LiDARによる樹高－航空機LiDARによる樹高　の平均値 [m]

コース1	コース2	コース3	コース4
−0.31	−0.27	−0.27	−0.30

図 A-2　航空機 LiDAR による樹高と地上型 LiDAR による樹高の比較。樹冠の中で最も Z 座標値が大きい点を比較している。地上型 LiDAR データは、図 A-3 に示すように久屋大通内の複数地点での測定結果を用いている。図 A-4 には地上型 LiDAR データの一例を示している。航空機 LiDAR では樹高が過小推定されるが誤差は小さく、レーザー反射点の標高値により樹高を把握できることが分かる。

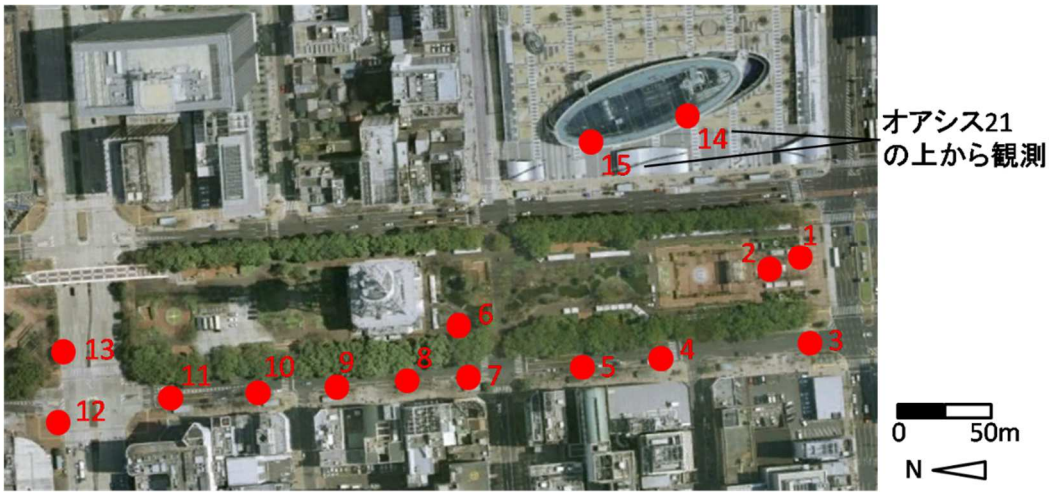


図 A-3　久屋大通における地上型 LiDAR による測定地点。本論中の航空機 LiDAR の検証用のデータと同じ日に同様のレーザー照射条件で測定を行った。測定地点 1, 2, 7 が本論中でケヤキとクスノキにおける検証に用いたデータを取得した測定地点である。

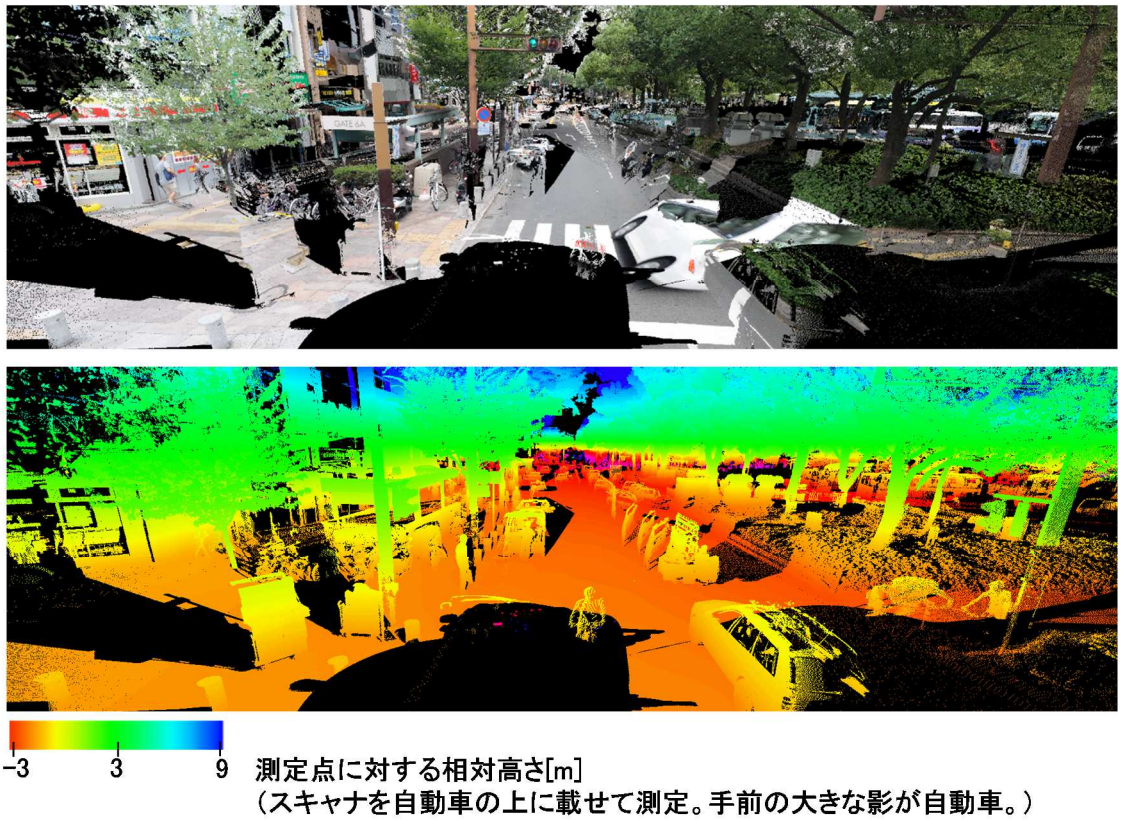
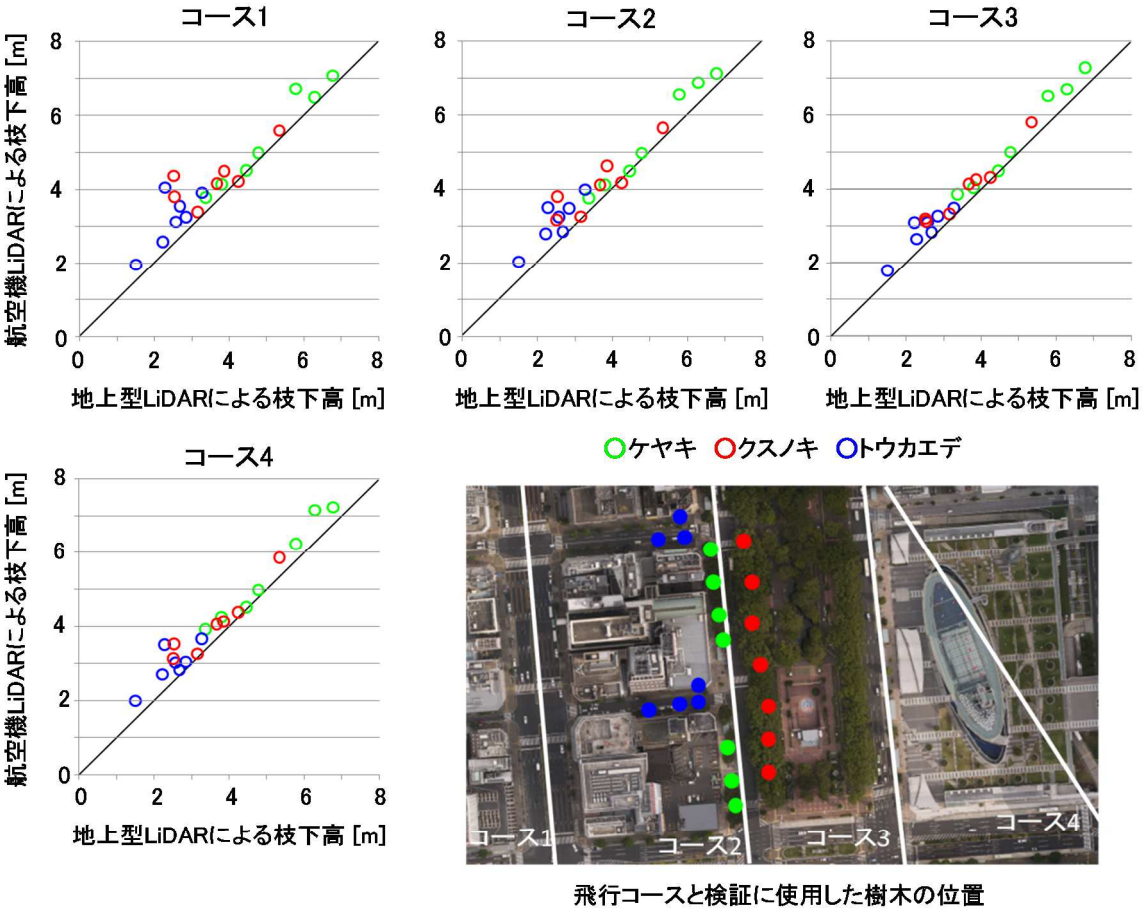


図 A-4　久屋大通における地上型 LiDAR データ。各点に LiDAR 測定と同時に可視カメラにより得た色情報を与えたもの（上）と高さを示したもの（下）。

3.　航空機 LiDAR による枝下高さの観測精度（第 2 章）



飛行コースと検証に使用した樹木の位置

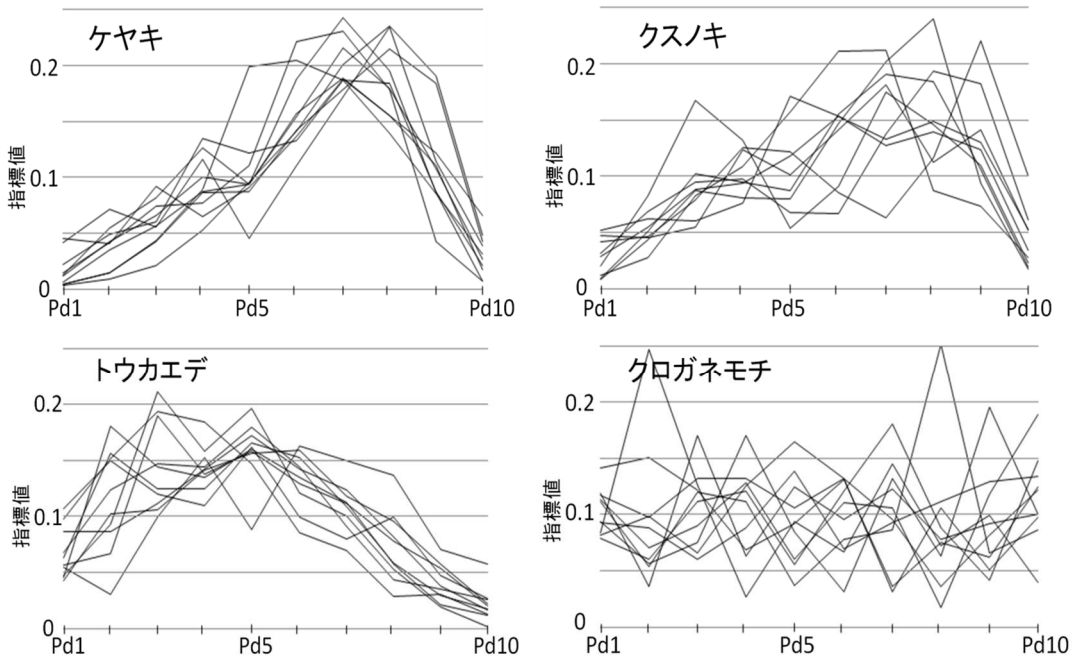
航空機LiDARによる枝下高－航空機LiDARによる枝下高　の平均値 [m]

コース1	コース2	コース3	コース4
0.58	0.52	0.40	0.45

図 A-5　航空機 LiDAR による枝下高さと地上型 LiDAR による枝下高さの比較。樹冠の中で最も Z 座標値が小さい点を比較している。航空機からは樹冠の下にレーザーが届きにくいため、枝下高さは過大推定されている。しかしながら、これは樹冠下部の細い枝も含んだ結果であり、かつ誤差も樹高に比べて十分小さいことから、航空機 LiDAR は樹冠の下部も高精度に捉えていることが分かる。

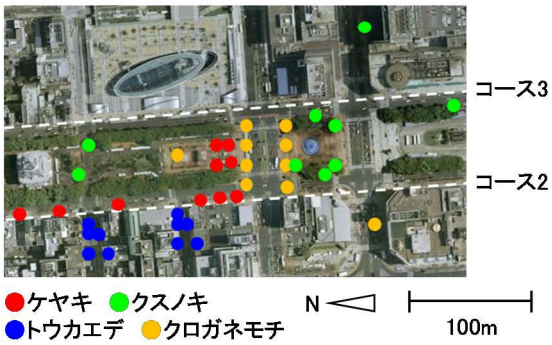
4.　樹冠における航空機 LiDAR のレーザー反射点密度の鉛直分布（第 2 章）

(1)　反射パルスを区別しない場合



解析に使用した樹木の概要

	ケヤキ	クスノキ	トウカエデ	クロガネモチ
本数	10	9	10	10
平均樹高	10.9m	12.9m	8.5m	6.3m
樹高最大値	13.3m	16m	9.4m	7m
樹高最小値	7.5m	10m	7.1m	5.3m



飛行コースと解析に使用した樹木の位置

図 A-6　樹冠を均等の厚さの層に 10 分割したときの、各層の点数の樹冠全体の点数に対する割合。グラフの縦軸が割合、横軸の Pd10 が樹冠上部、Pd1 が下部を示す。反射パルスの種類は区別していない。逆円錐状のケヤキは樹冠上部に葉が多い、卵形のトウカエデは樹冠中部に葉が多い、クロガネモチは層構造になっているなどの樹種ごとの樹冠形態の特徴（図 A-7）がレーザー反射点の分布に表れている。標識などにかからないように樹冠下部が剪定されているため、クスノキの分布はケヤキに近い。



ケヤキ　クスノキ　トウカエデ　クロガネモチ

図 A-7　解析に用いた樹木の現地撮影写真

(2)　反射パルスごとの鉛直分布

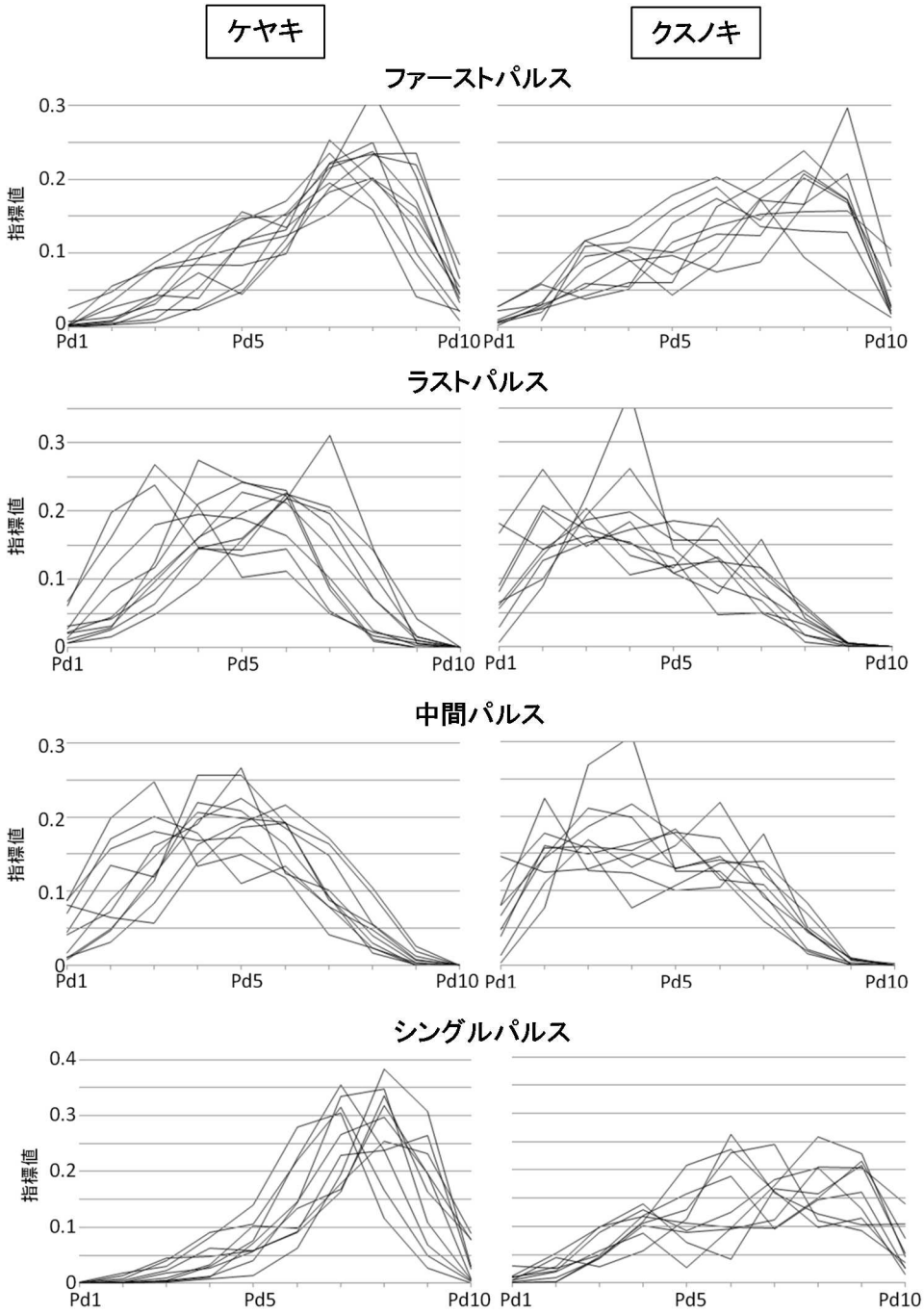


図 A-8　ケヤキとクスノキの樹冠における、反射パルスの種類ごとの点密度の鉛直分布。全ての反射パルスを用いた場合に比べてケヤキとクスノキで差が見られる。特に、ケヤキにおいてはシングルパルスがある高さに集中している。縦軸の指標値（各層の点数の割合）の最大値がケヤキは全ての個体で 0.25 以上であるが、クスノキは大部分の個体で 0.25 以下になっている。

5.　刈り取り調査を行った樹木の LAD 分布の可視化（第 3 章）

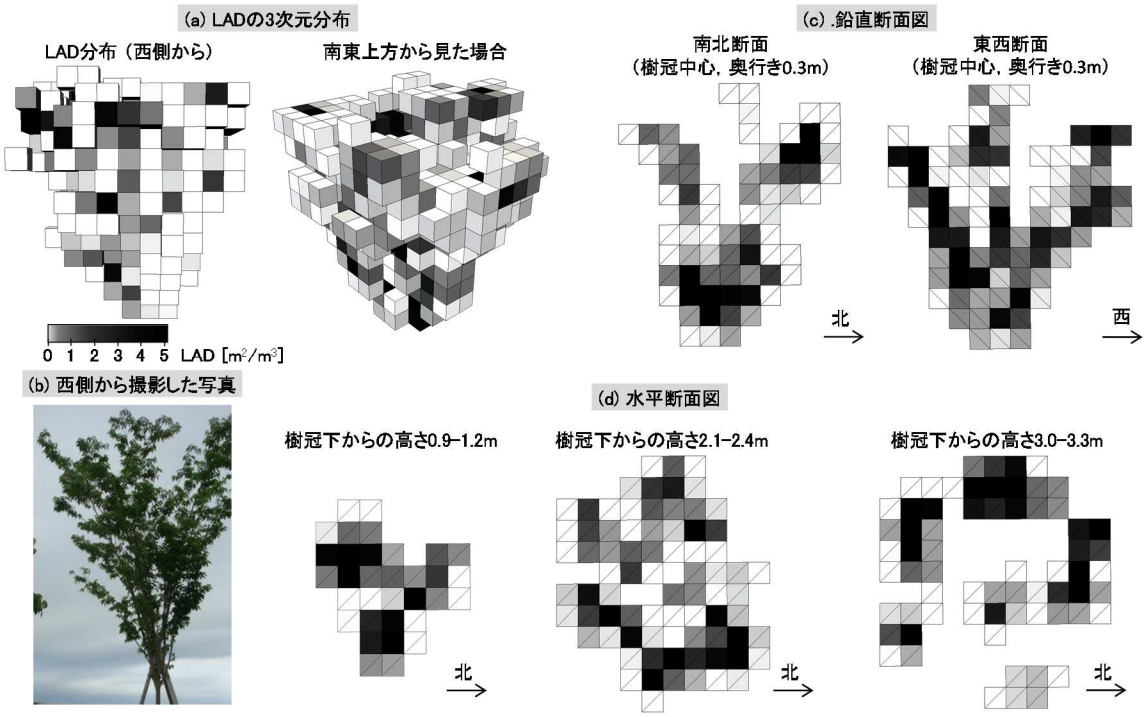


図 A-9　刈り取り調査を行った樹木の LAD 分布の地上型 LiDAR による算出結果。樹木から 5 m 離れた 4 地点（測定地点 1～4）からの測定結果を使用している。voxel サイズは 0.3 × 0.3 m × 0.3 m。西側から見た LAD 分布と写真（同図(b)）を比べると樹冠形状や葉のつき方が再現されていることが分かる。同図(c)の鉛直断面図を見ると、樹冠内には葉が一様に分布せず枝の周りに葉が密に分布しているというような葉の粗密が表現されている。また、同図 (d)の水平断面図を見ると、葉が密に存在する領域は樹冠上部へ向けて外側に広がっていき、樹冠の中央部には空隙が広がっていくことが確認できる。このように、地上型 LiDAR によって、樹冠形状、葉の粗密、樹冠内の空隙の特徴を表現した樹木の形態情報を得ることができる。

6.　樹冠内の各 voxel への航空機からのレーザーの入射数（第 4 章）

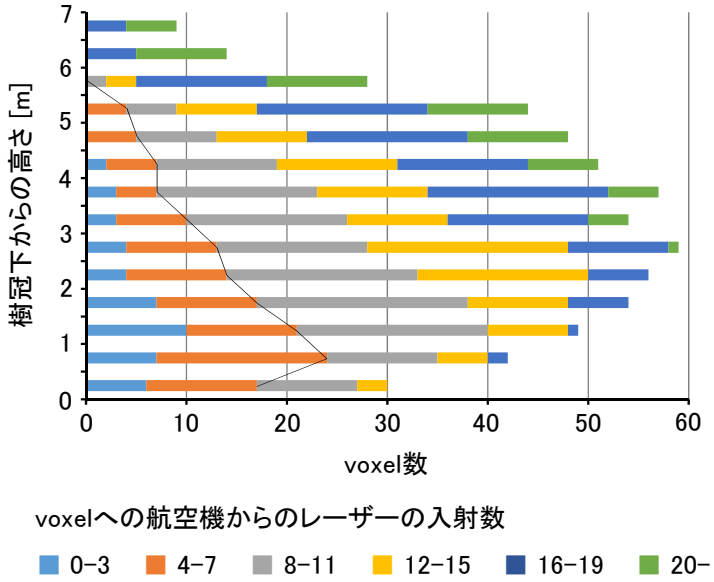


図 A-10　航空機 LiDAR の検証用のケヤキにおける、葉を含む voxel への航空機からのレーザーの入射数の構成割合の鉛直分布。葉を含む voxel とは、地上型 LiDAR のレーザー反射点を含む voxel である。樹冠下部へいくほど、航空機からのレーザー入射数が少ない voxel が増加する。しかしながら、航空機 LiDAR による LAD の推定誤差が小さくなる、レーザー入射数 8 以上の voxel が大部分を占めている。

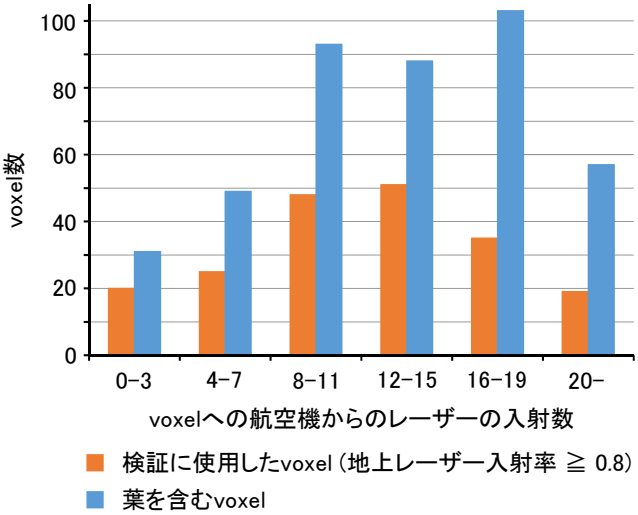


図 A-11　航空機 LiDAR の精度検証に用いた voxel（地上レーザー入射率が 0.8 以上）と葉を含む全ての voxel の航空機からのレーザーの入射数の頻度分布。検証に使用した voxel が特に航空機からのレーザーの入射条件が良いわけではない。

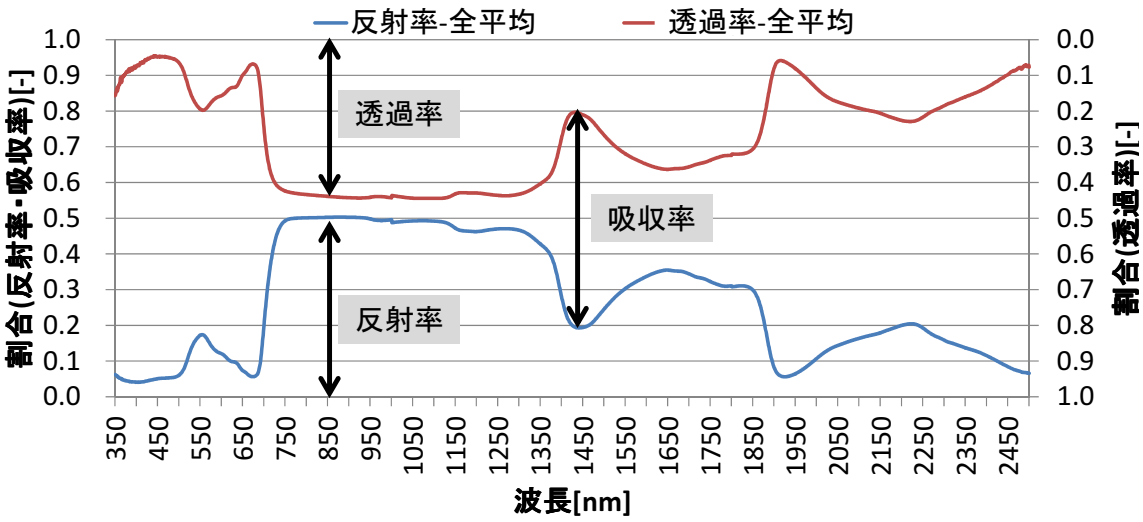
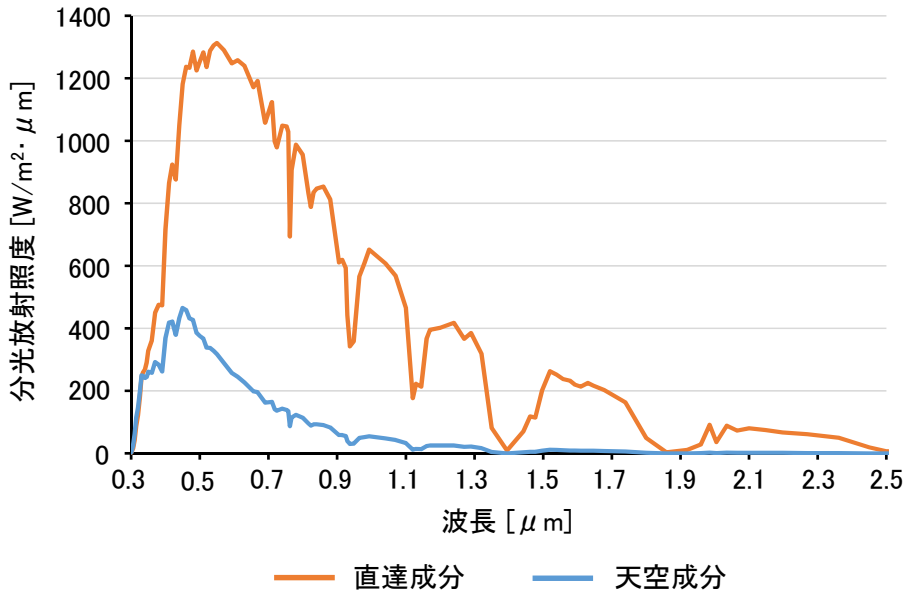


図 A-12　ケヤキの葉の分光反射率・吸収率・透過率。第 3 章で刈り取り調査を行ったケヤキを対象に分光放射計（FieldSpec（ASD 社製））により測定。樹冠内の複数箇所で、また同じ箇所を複数回に渡り測定した全ての結果を平均したものを示している。測定値のばらつきは、各波長における反射率の標準偏差が 0.016、透過率の標準偏差が 0.017 であった。分光放射計による結果は、厳密には標準反射板（反射率が極めて 1 に近い拡散板）に対する相対分光反射率・吸収率・透過率である。指向性が強い材料を対象とした場合には実際の分光反射率・吸収率・透過率と差が生じるが、葉を対象とした場合には誤差は小さいと考えられる。



本研究で用いたBirdモデルのパラメータ

日時：9月7日12時　　北緯 35° 17′、東経 136° 91′（名古屋市久屋大通）
消散係数 $\tau_{0.5}$ = 0.20 [–]　　エアロゾル粒径分布パラメータ α = 1.14 [–]
可降水量 W = 1.4 [cm]　　アルベド ρ G = 0.2 [–]　　オゾン量O3 = 0.34 [atmcm]

図 A-13　葉の PAR に対する反射率・吸収率・透過率を求めるための太陽放射の分光放射照度。航空機 LiDAR の検証対象ケヤキの樹冠したにおいて PAR 分布を実測した時期の、晴天日の分光放射照度を Bird モデルにより再現している。可降水量は実測時の名古屋市の相対湿度から算出している。図 A-12 と図 A-13 から、直達 PAR に対する葉の反射率は 0.07、吸収率は 0.83、透過率は 0.1 として FLiESvox に入力し、単木における検証を行った。天空日射に対する値も直達日射のものと差が小さかったため、街区スケールの計算においてもこの値を使用した。