

流下能力への樹木群の影響評価に資する UAVレーザ計測による三次元点群の活用手法の検討

Estimation of Projected Area of Riparian Trees using Three-Dimensional Point Cloud
by UAV Laser Scanning to Evaluate Their Effect on River Flow

元 公益財団法人河川財団(現所属 株式会社ニュージェック)
公益財団法人河川財団
株式会社ニュージェック
公益財団法人河川財団

○末永 遼
鈴木克尚
出口 恭
天野邦彦

■背景

【河道流下能力の適切な把握】

- 近年の頻発化、激甚化する豪雨
⇒河道の治水機能の適切な維持のため、流下能力の正確な把握が必要
⇒河道内植生の繁茂状況等の把握の必要性

【樹木群を考慮した流下能力の評価手法】

- 実務では準二次元不等流計算法を用いた評価手法^{1), 2)}が一般的
- 樹木抵抗は粗度係数で表現される
- 樹木群粗度係数の算定には、樹高、枝下高、胸高直径、立木密度等が必要
- 上記の諸元を得るには現地計測が必要であり、計測作業の負担は大きい
- 樹木の大きな抵抗要素である樹冠(枝葉)部の計測は困難



1) 財団法人国土技術研究センター編：河道計画検討の手引き，山海堂，2002.

2) 財団法人リバーフロント整備センター編：河川における樹木管理の手引き，山海堂，1999.

■背景

【先行事例】

- 地上レーザ計測は、取得点密度や計測精度は高いが、広域な計測には不向き
- 航空レーザ計測は、広域な計測に向いているが、樹木の詳細な形状は把握困難

【UAVレーザ計測】

- 高密度、高精度な点群の取得が可能となってきた
- 河道内樹木繁茂箇所では、詳細な樹木群形状を効率的に取得可能と考えられる



■本研究の目的

樹木群が河道の流下能力へ与える影響を定量的に評価することを目的として、
UAVレーザ計測により取得した樹木群の三次元点群を用いて、
樹木群の流下方向投影面積を算定する手法の開発を行った。

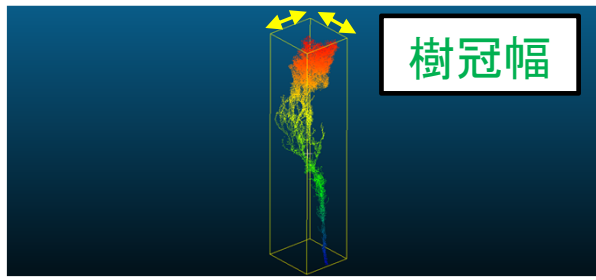
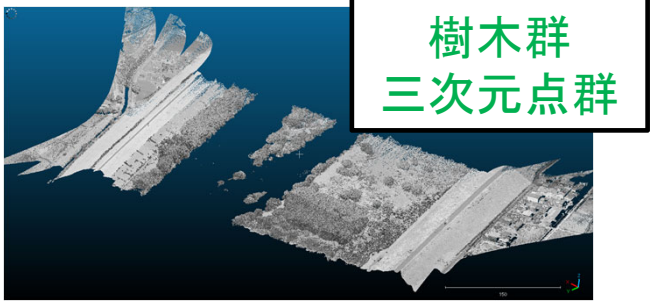
UAVレーザ計測による
河道内樹木群計測の取得

樹冠幅の算定

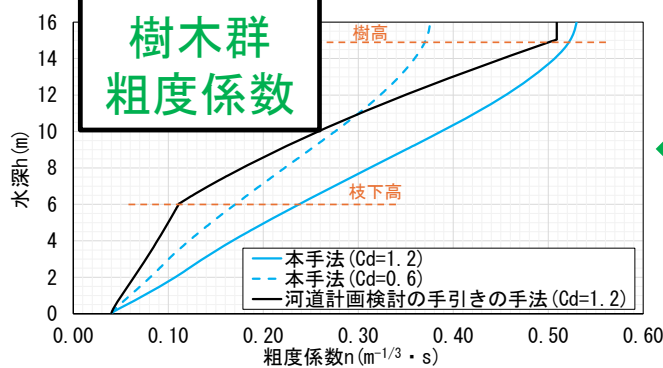
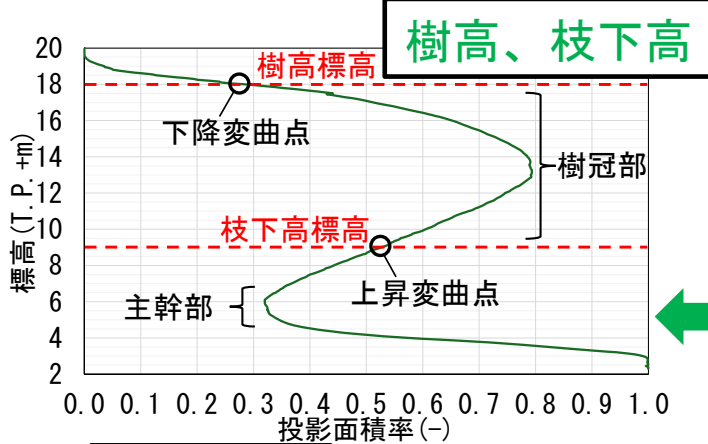
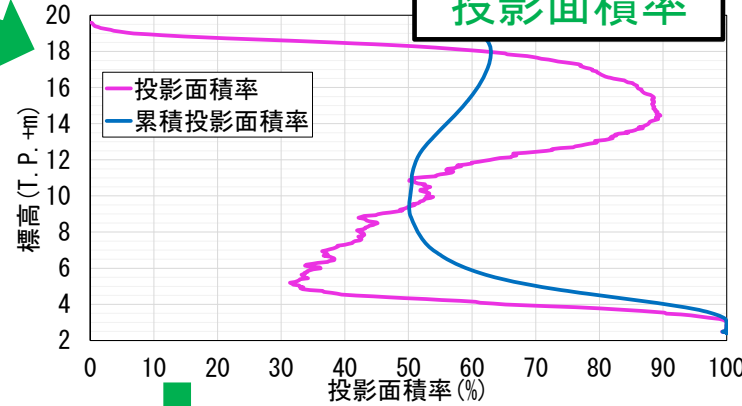
樹木群における投影面積率の
算定

流下能力評価における樹木群
パラメータ（樹高、枝下高、
単位体積中の樹木総投影面積）の算定

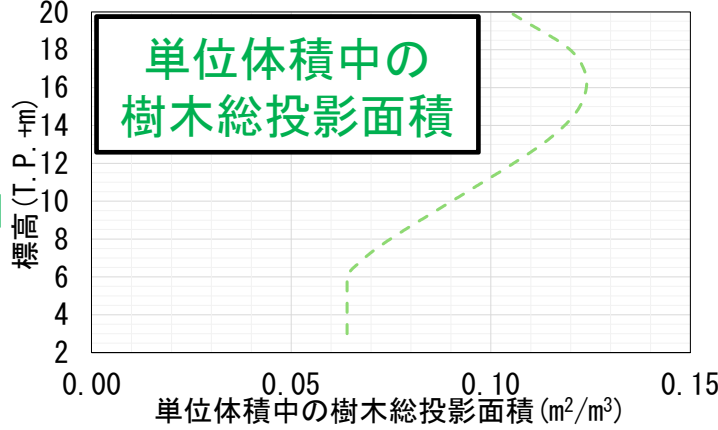
樹木群粗度係数の算定



投影面積率



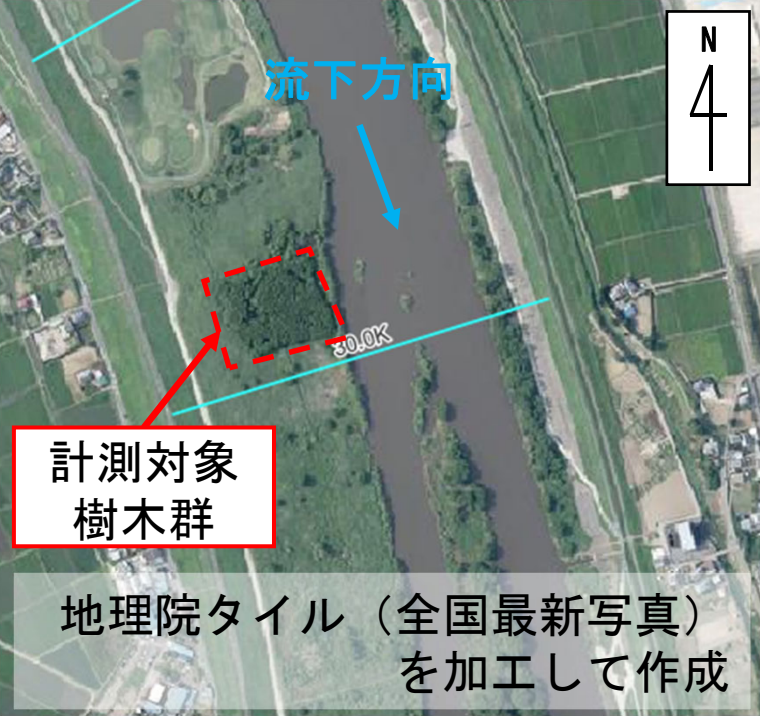
単位体積中の
樹木総投影面積



2. 検討方法 -UAVレーザ計測による河道内樹木群形状の取得-

表一使用レーザースキャナの諸元

項 目	内 容	備考
使用機器	Voyager	
メーカー	YellowScan	
サイズ	37×12×18 cm	
重 量	3.5 kg	
精度	±0.5 cm	計測の再現性
確度	±1 cm	真値との誤差の程度
レーザー走査角	100°	照射可能な角度範囲
レーザー拡散角	0.4 mrad	レーザの広がり (100m先で40mm程度)
エコー数	最大15 (UAV搭載時5～8)	1回のレーザ照射から 検出可能な反射の数
レーザ照射周波数	最大1800 kHz	1秒当たりのレーザ照射数



図一樹木群三次元点群計測対象範囲 (江戸川右岸高水敷、30.0k付近)



図一使用機器写真(左：Voyager、右：MATRICE 600Pro)

表一使用UAVの諸元

項 目	内 容
使用機器	MATRICE 600Pro
メーカー	DJI
サイズ	81×67×43cm
重 量	6.3Kg
耐風性能	最大15m/s

表一計測条件

計測 ケース	計測日	飛行高度 (m)	飛行速度 (m/s)	レーザ照射周波 数 (kHz)	エコー数
1	2023年10月18日	120	8	1200	8
2	2023年10月18日	60	4	1200	8
3	2023年11月30日	60	2	1200	8



2023年10月18日

図一樹木群の状況(右岸より望む)



2023年11月30日

図一樹木群の状況(右岸より望む)



2023年10月18日

図一樹木群の状況(右岸より望む)



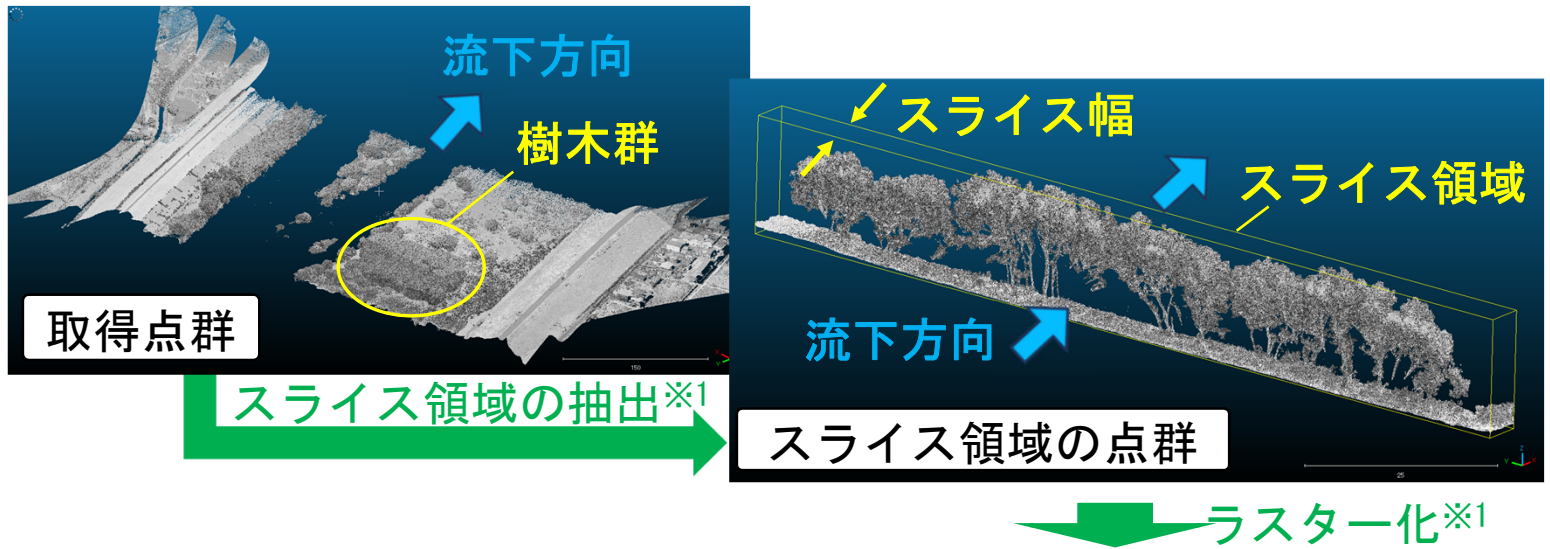
2023年11月30日

図一樹木群内部の状況

2. 検討方法 - 樹木群における投影面積率の算定 -

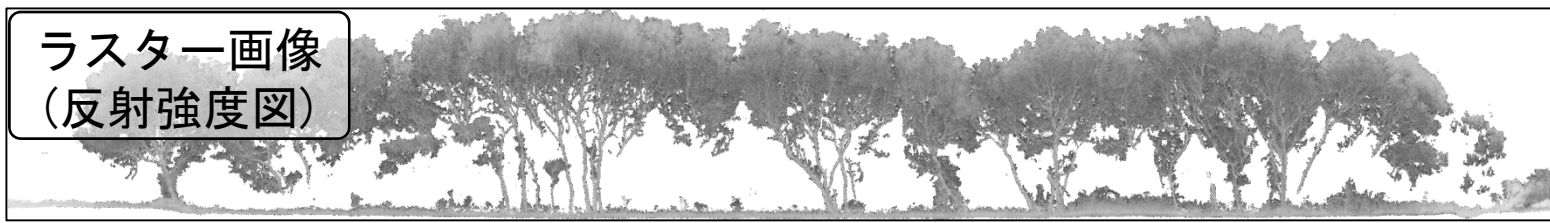
Step1. データ抽出

樹木群の三次元点群より、投影面積率を算定する領域（以降、スライス領域と呼ぶ）の点群を抽出※1



Step2. ラスター化

スライス領域の三次元点群を河道横断面上に投影し、ピクセルサイズ縦0.05m×横0.05mとしてラスター化※1

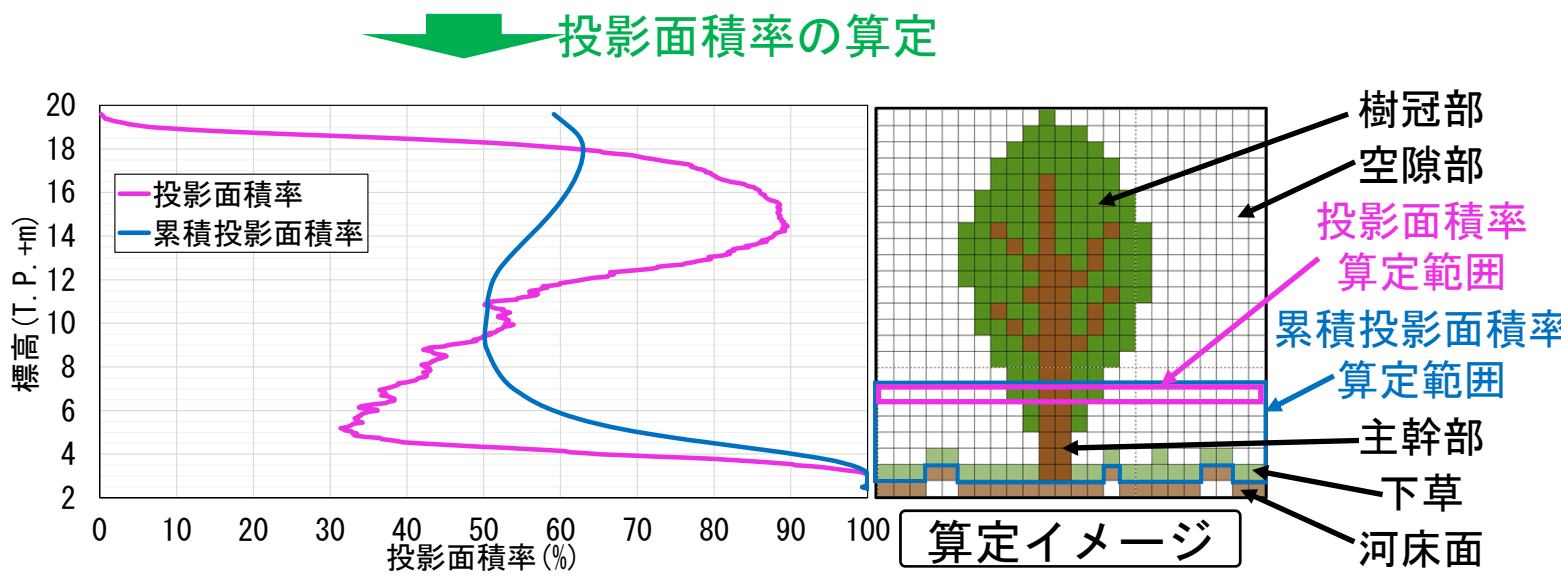


※1：点群データの処理にはCloud Compareを用いた

Step3. 投影面積率の算定

各標高（各ピクセル行）における投影部のピクセル数割合をその標高における**投影面積率**として算定

河床面から任意標高までの領域における投影部のピクセル数割合を**累積投影面積率**として算定

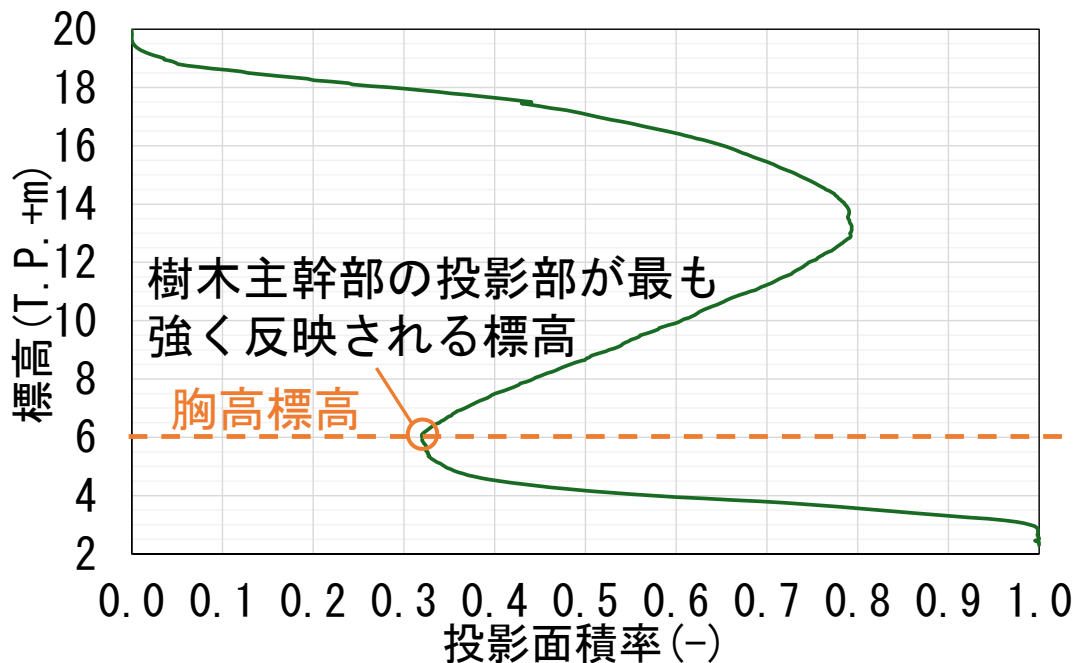


■ 累積投影面積率

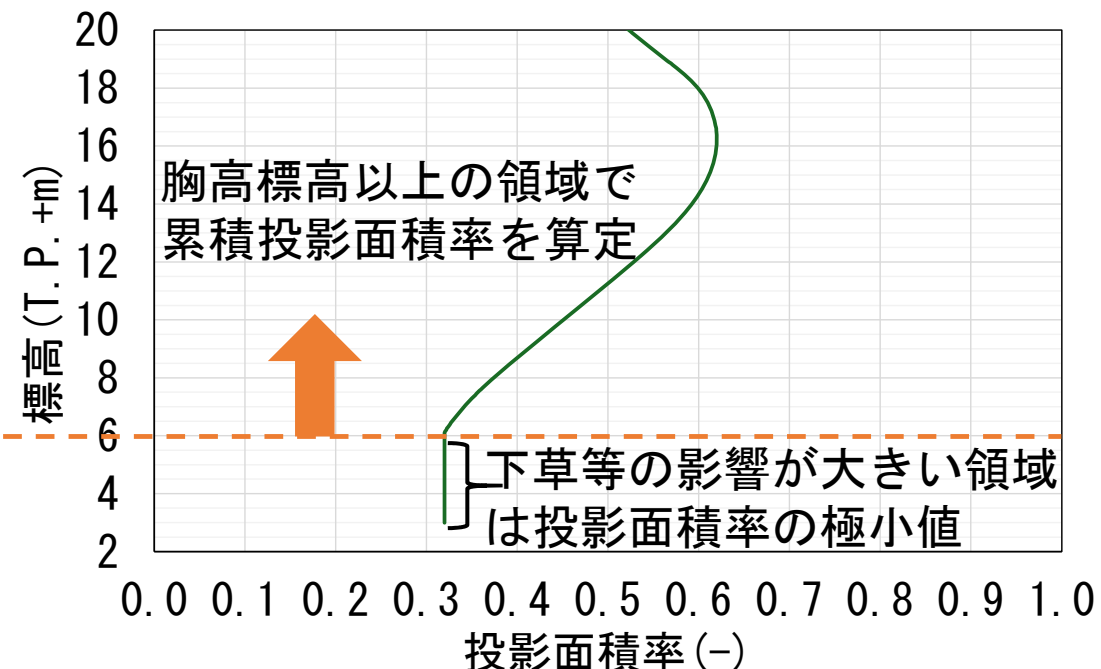
下草や地表面の影響を除くため、下草等の影響が小さくなる標高以上で累積投影面積率を算定

【算定方法】

- ・ 主幹部が最も強く反映されると考えられる投影面積率が極小値を示す標高を**胸高標高**とする
- ・ 胸高標高以上は、累積投影面積率の鉛直分布を求めて樹木の投影面積を評価
- ・ 胸高標高以下は、主幹部形状が一様に分布する仮定し、一定値（投影面積率の極小値）とする



図一 投影面積率の鉛直分布図例



図一 累積投影面積率の鉛直分布図例

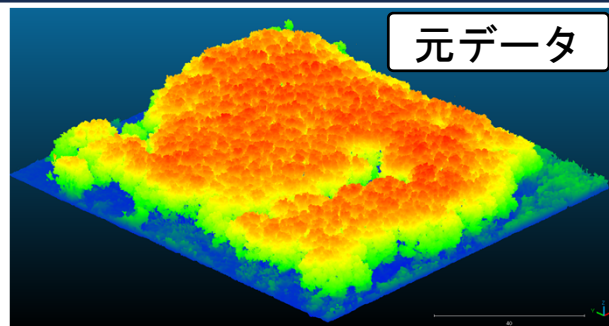
2. 検討方法 - 樹冠幅の算定 -

9

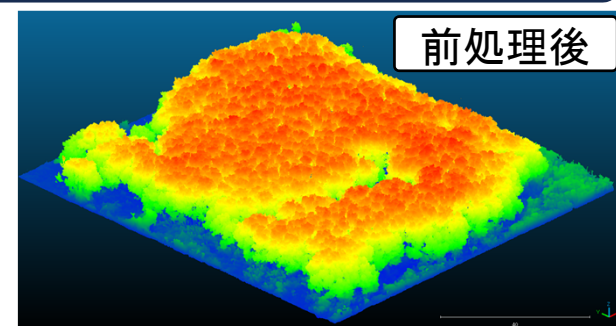
流下方向に平均的に樹木が1本程度含まれるように、投影面積率の算定に用いるスライス幅は、樹冠幅程度とした。樹木群三次元点群を用いて個別樹木の樹冠幅を算定。

Step1. 前処理

前処理として、Cloud Compareにて点群のノイズ除去と間引き処理(最小間隔0.05m以上)

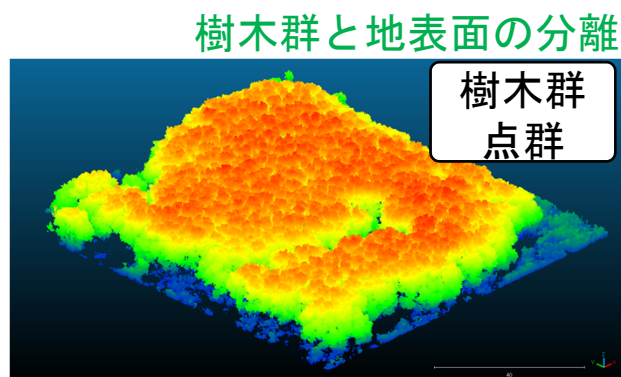


前処理

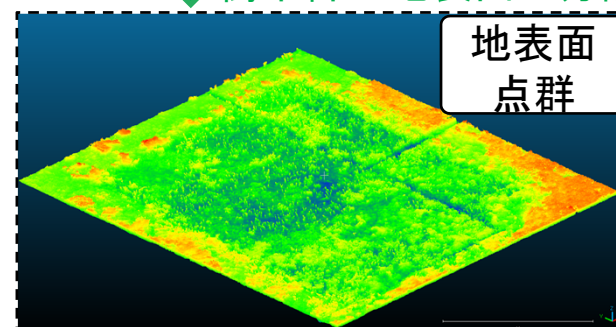


Step2. 樹木群と地表面の分離

Cloth Simulation Filter法⁸⁾により、地表面とそれ以外(樹木群)の点群データを分離

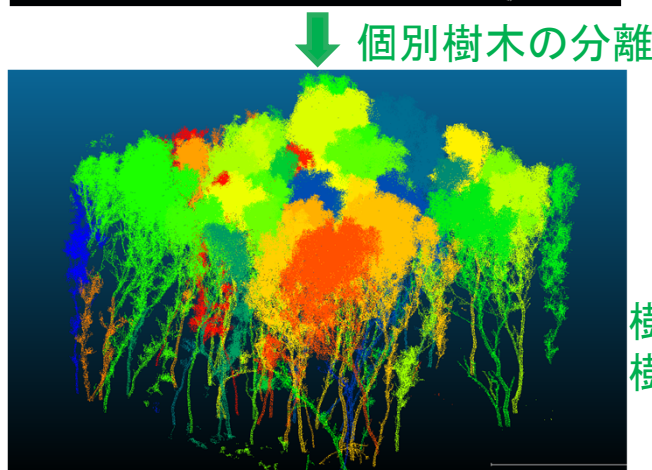


樹木群と地表面の分離

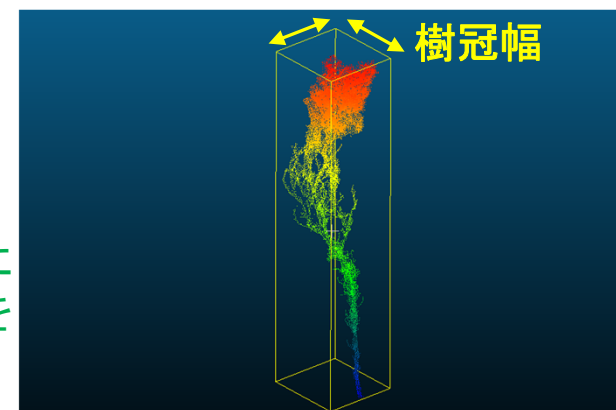


Step3. 個別樹木の分離

TreeIso法⁷⁾を用いて、個別樹木の点群データに分離



樹木毎に樹冠幅を算定



Step4. 樹冠幅算定

個別樹木の点群を包絡する直方体領域における河道横断方向または河道縦断方向の長さの最大値を樹冠幅とした

7) Zhouxin Xi and Chris Hopkinson. : 3D Graph-Based Individual-Tree Isolation (Treeiso) from Terrestrial Laser Scanning Point Clouds, Remote Sensing, Vol.14(23), 6116, 2022.

8) Wuming Zhang et al. : An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation, Remote Sensing, Vol.8(6), 501, 2016.

■ 樹高、枝下高

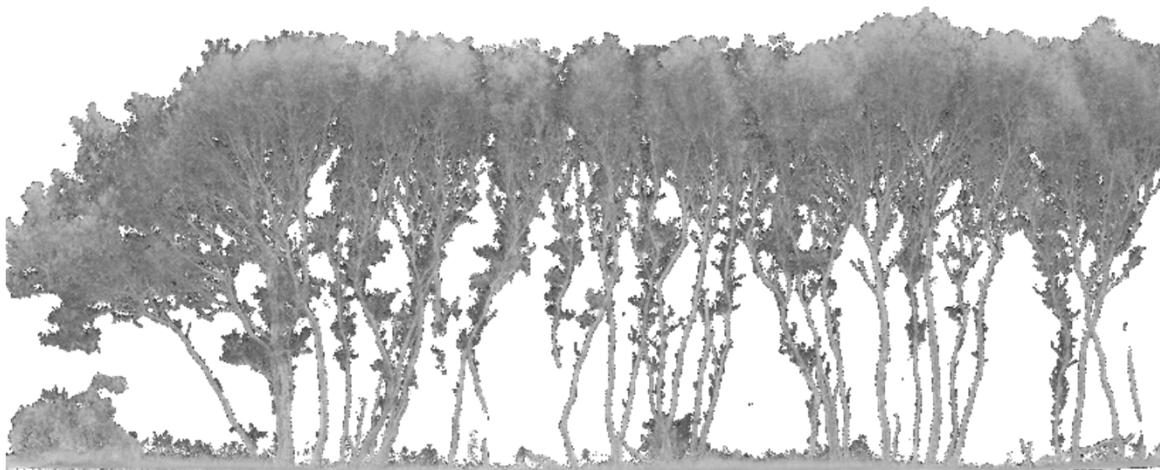
明確な主幹部と樹冠部を有する樹木の場合、投影面積率の鉛直分布は以下の特徴を示す

- ・ 下草層を超え、主幹部付近で極小値
- ・ 枝葉が付き始める樹冠部に近づく増加
- ・ 樹冠頂部に近づく再度減少

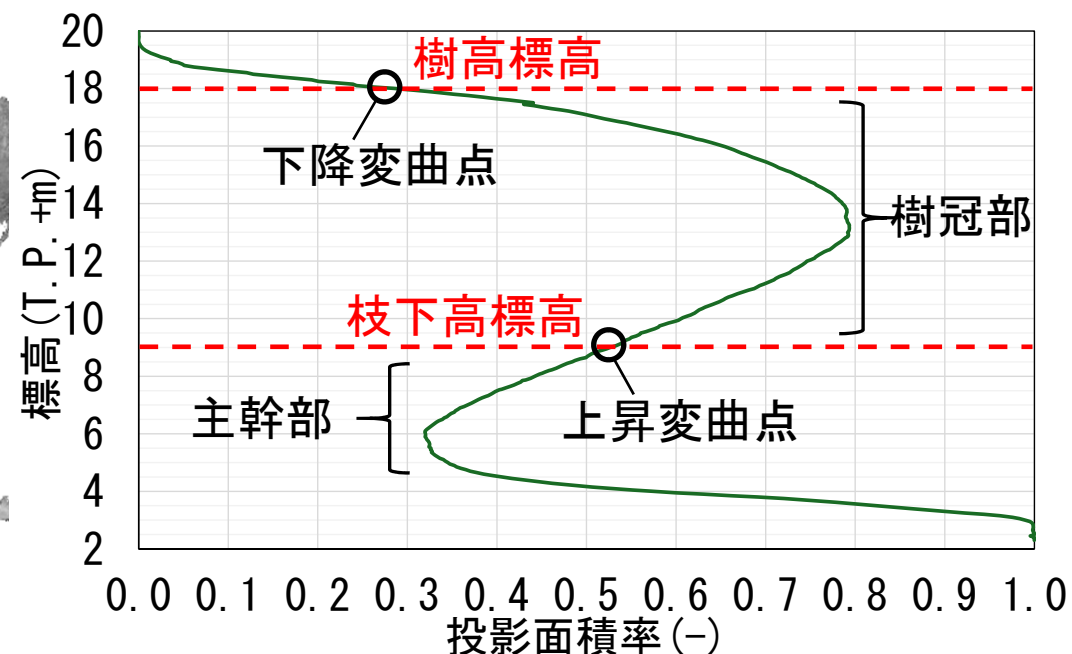


枝下高標高：投影面積率の増加曲線における上昇変曲点を示す標高とした

樹高標高：投影面積率の減少曲線における下降変曲点を示す標高とした



図一 樹木群ラスタ一画像例 (一部)



図一 投影面積率の鉛直分布図例

■ 単位体積中の樹木総投影面積

樹木群の平均的な累積投影面積率の鉛直分布を求めたうえで、式(1)にて単位体積中の樹木総投影面積 $a_w(z)$ を算定

⇒ a_w の鉛直分布を定量的に評価

なお、平均化にあたり樹木群縁辺部の明確な主幹部を有しないスライス領域は除外

$$a_w(z) = \frac{P(z) \cdot A(z) \cdot n}{L \cdot A(z) \cdot n} = \frac{P(z)}{L} \quad \dots (1)$$

ここに、

$a_w(z)$: 河床面から標高 z までの領域における単位体積中の樹木総投影面積 (m^2/m^3)

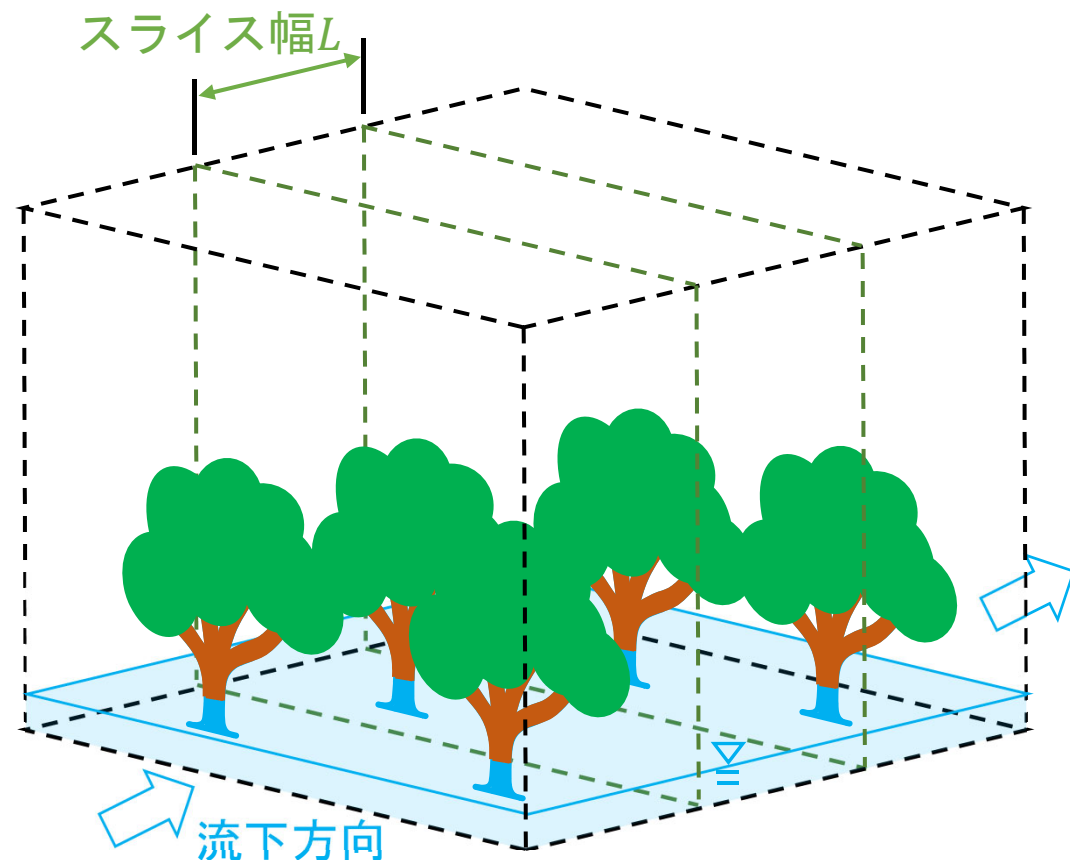
$P(z)$: 河床面から標高 z までの領域における累積投影面積率 (-)

$A(z)$: 河床面から標高 z までのスライス領域内の河道断面積 (m^2)

L : スライス幅 (m)

z : 標高 (T.P. +m)

n : スライス領域数



■ : 河床面から標高 z までの領域における樹木総投影部面積 (m^2)

□ : 河床面から標高 z までの領域における流体体積 (m^3)

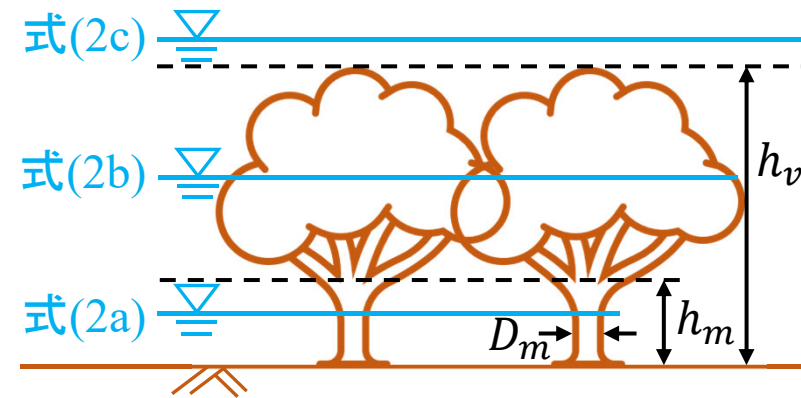
$$a_w(z) = \frac{P(z) \cdot A(z) \cdot n}{L \cdot A(z) \cdot n} = \frac{\text{■}}{\text{□}}$$

「河道計画検討の手引き」に示される粗度係数算定式(2a)～式(2c)のうち、式(2a)のみを用いて算定。単位体積中の樹木総投影面積の鉛直分布 $a_w(z)$ を用いて、樹冠部の投影面積を直接適用。抗力係数は0.6～1.2を用いて試算。

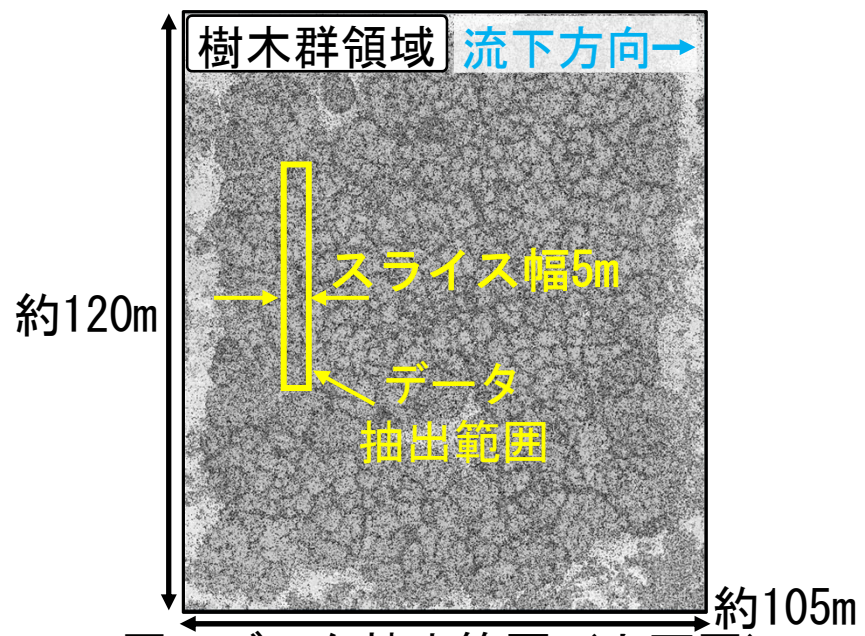
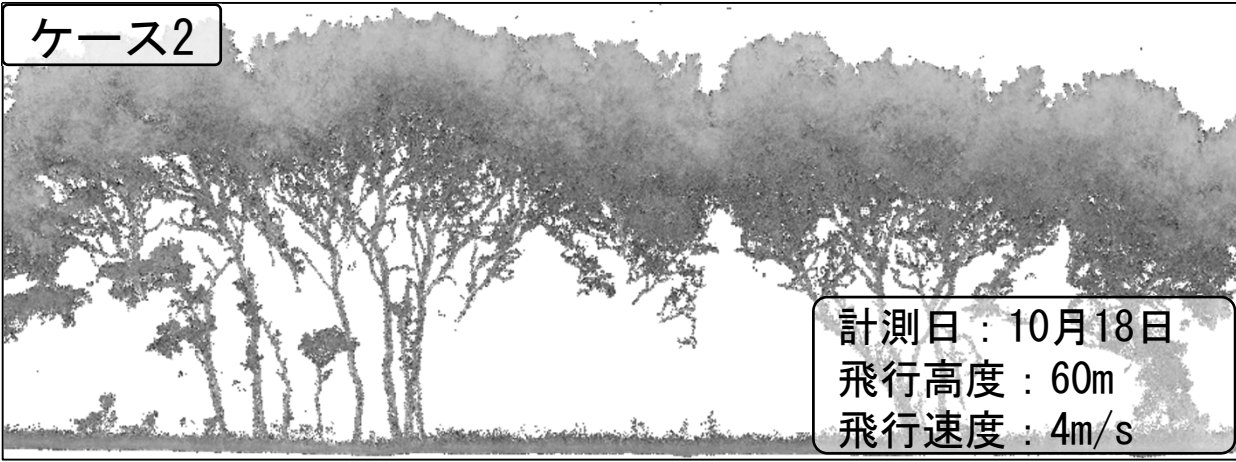
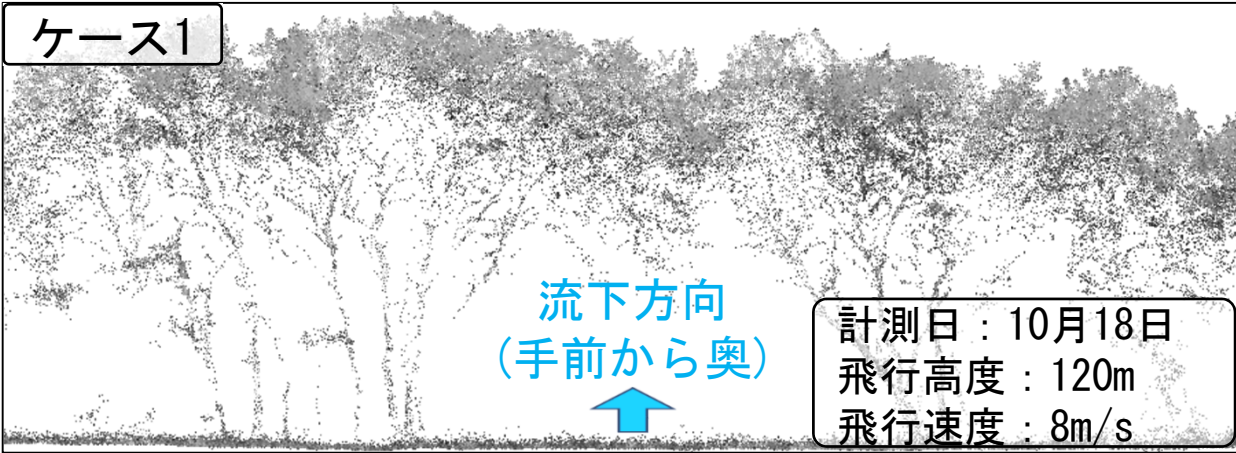
$$\left\{ \begin{array}{l} n = \left(n_b^2 + \frac{h^4}{k^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (h_m > 0 \text{ かつ } h \leq h_m) \quad \dots (2a) \\ n = \left(\frac{h}{h_m} \right)^{\frac{5}{3}} \left(n_b^2 + \frac{h_m^4}{k^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (h_m > 0 \text{ かつ } h_m < h \leq h_v) \quad \dots (2b) \\ n = \left(\frac{h_v}{h_m} \right)^{\frac{5}{3}} \left(n_b^2 + \frac{h_m^4}{k^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (h_m > 0 \text{ かつ } h_v < h) \quad \dots (2c) \end{array} \right.$$

ここに、

- n : 樹木群粗度係数 ($\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$)
- h : 水深 (m)
- k : 透過係数 $= (2 \cdot g / a_w / C_d)^{0.5}$ (m/s)
- n_b : 高水敷地表面の粗度係数 ($\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$)
- h_m : 枝下高 (m)
- h_v : 樹高 (m)
- g : 重力加速度 $= 9.8$ (m/s^2)
- C_d : 抗力係数 $= 1.2$ (-)
- a_w : 単位体積中の樹木総投影面積 (m^2/m^3)



「河道計画検討の手引き」では、単位体積中の樹木総投影面積 a_w は、**立木密度 N (本/ m^2)**と**胸高直径 D_m (m)**の積を与える。



図ーデータ抽出範囲（上面図）

表ー取得点数（樹木群領域）

項目	ケース1	ケース2	ケース3
点数	約0.16億	約3.7億	約10.3億
点密度 (点/m ²)	1,287	29,471	81,881

- ケース1は、樹木の幹が途切れており、幹や枝等の形状が表現できていない
 - ケース2、3は、比較的、主幹や主要な枝等の形状を表現できている
- ⇒飛行高度60m、飛行速度4m/s以下で、主幹や主要な枝の形状を概ね把握可能

20×20mの9箇所のサンプルエリアにおいてTreeIso法による個別樹木を分離し、樹冠幅を算定。分離が不適切なデータを除いて106本の樹木が分離され、**平均樹冠幅は4.5m**となった。

なお、TreeIso法による分離結果に対し、以下の分離が不適切な個別樹木データは除外。

- ① サンプリングエリア境界部に位置する樹冠が切断された樹木データ
- ② 個別樹木領域の標高最小値が極端に大きい樹木データ（地面から浮いている場合）
- ③ 個別樹木領域の標高最大値が極端に小さい樹木データ（下草等）
- ④ 個別樹木領域の高さ（標高の最大値と最小値の差）が極端に小さい樹木データ（下草等）
- ⑤ 目視チェックによる分離が不十分な個別樹木データ

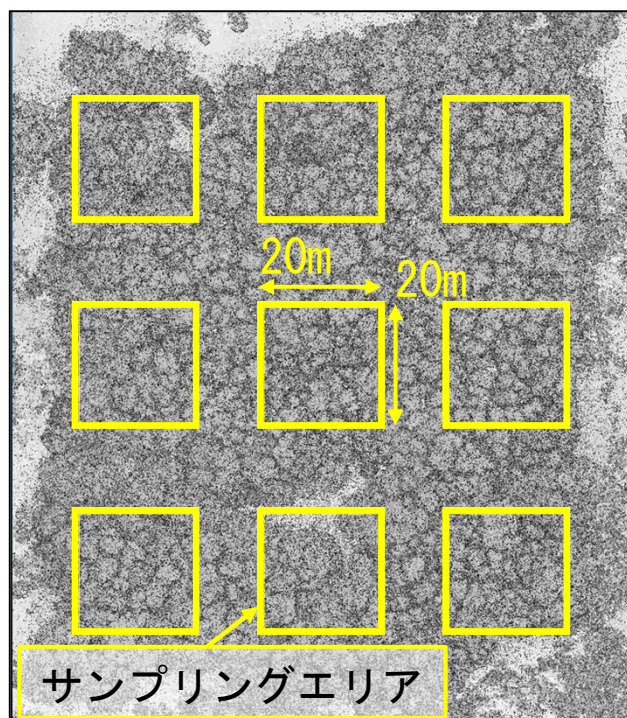


図-サンプリングエリア (9箇所)

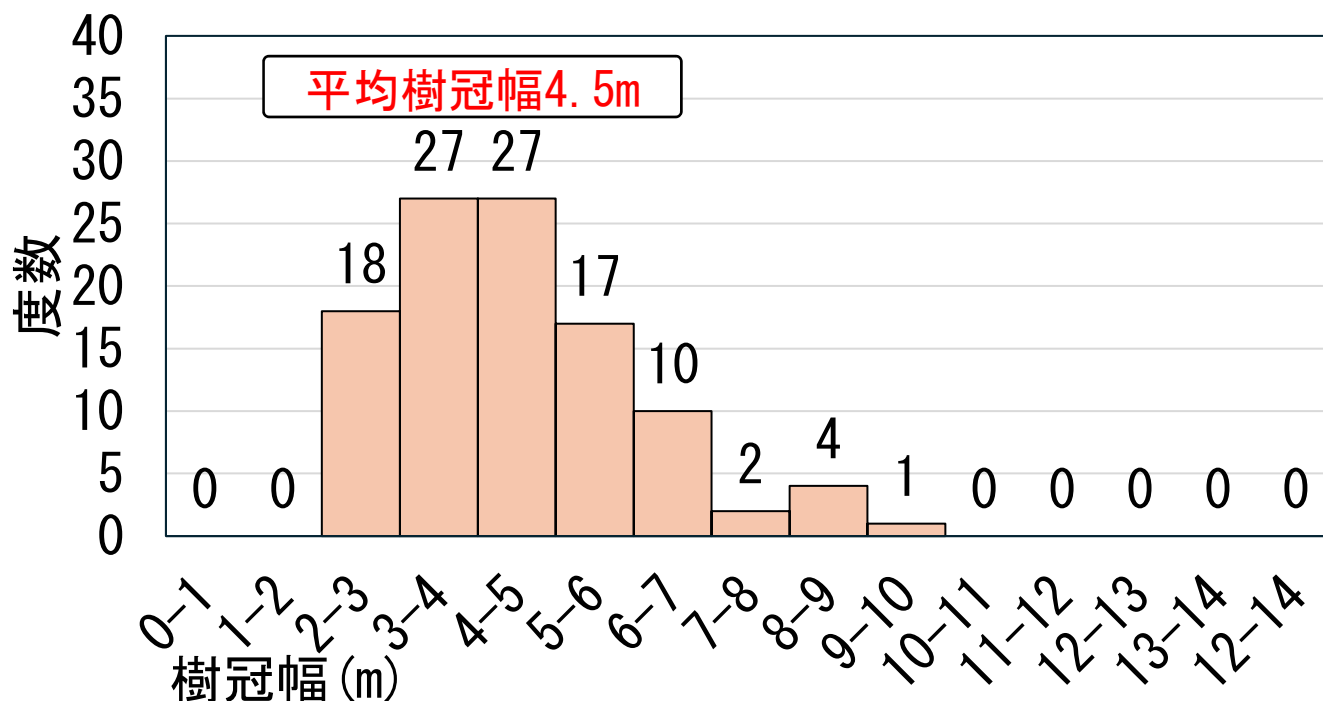
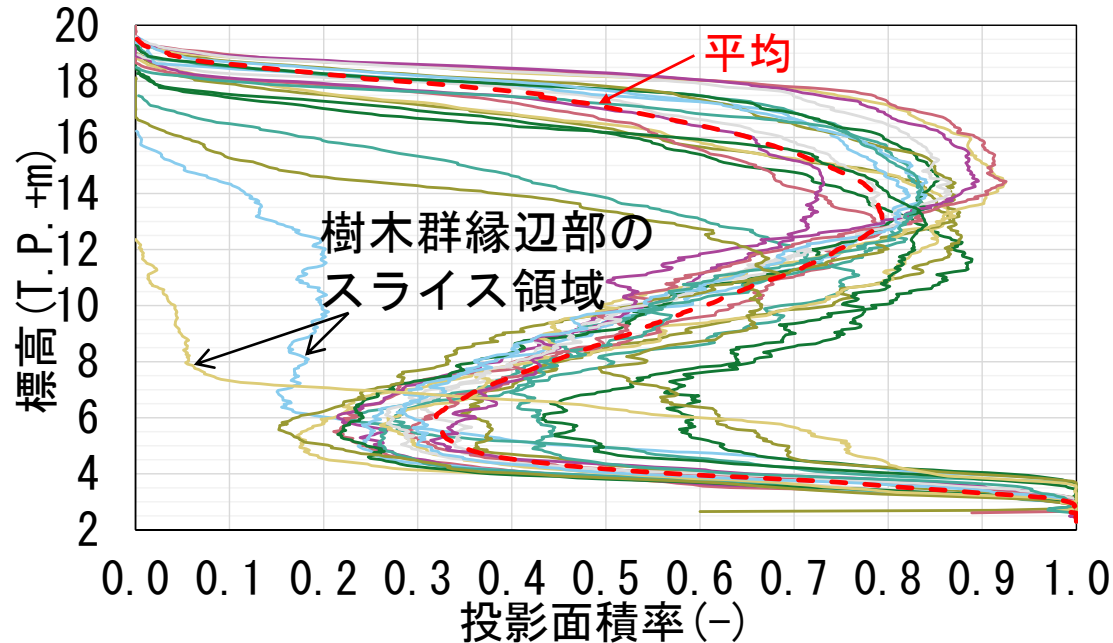


図-樹冠幅のヒストグラム (樹木数106本、全9サンプリングエリア)

平均樹冠幅4.5mと求められたことから、流下方向に平均的に樹木が1本程度含まれるように、スライス幅を5mとして、スライス領域毎に投影面積率の鉛直分布を求め、平均分布を求めた。



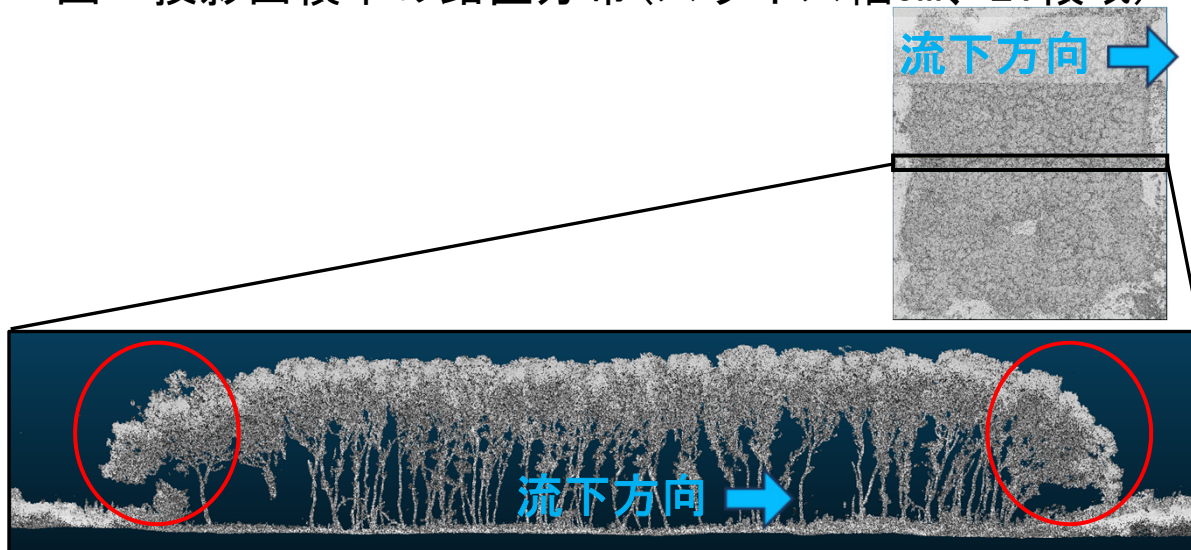
図一 投影面積率の鉛直分布 (スライス幅5m、21領域)

【投影面積率の鉛直分布】

- ・ 河床面付近は下草等の影響で高い
- ・ 主幹部が卓越する標高にかけて減少
- ・ 枝や葉が卓越する樹冠部付近で増加
- ・ 樹冠部を超えて減少



流水への抵抗要素となる主幹や枝葉等が卓越する標高の鉛直構造を把握可能



図一 樹木群縁辺部における樹木形状

樹木群縁辺部に位置するスライス領域では、単純減少に近い分布形 (主幹部と樹冠部の極値を持たない)

要因として以下が考えられる

- ・ 縁辺部では樹木群外側へ斜めに生長
- ・ そのため、樹高、樹冠部位置が低く
- ・ 主幹部と樹冠部の投影部が重なる

■ 樹高、枝下高

投影面積率の鉛直分布の変曲点より、
以下が得られた。

樹高標高 : T. P. +18. 0m
枝下高標高 : T. P. + 9. 0m

樹木群領域の平均河床高=T. P. +3. 0mより、

樹高 : 15. 0m
枝下高 : 6. 0m

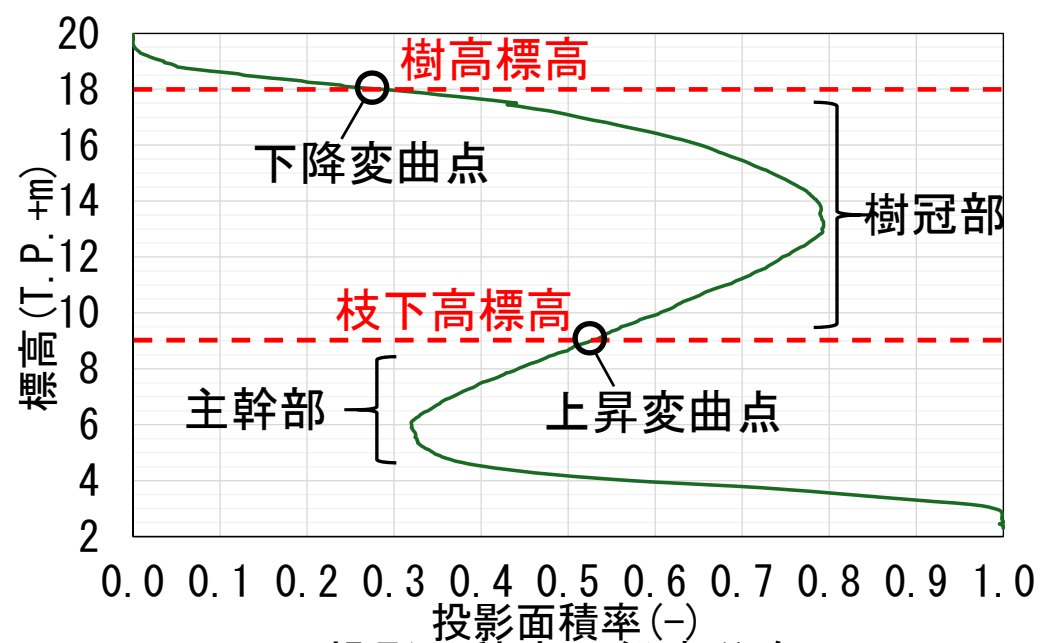


図-投影面積率の鉛直分布

■ 単位体積中の樹木総投影面積

胸高標高の単位体積中の樹木総投影面積は、
約4倍程度大きい値を示した

- 本手法 : 0. 064 m²/m³
- 手引き¹⁾の手法 : 0. 016 m²/m³ ※1

【要因】

- 本手法は、主幹部以外に樹高の低い樹木の樹冠部等の投影面積が含まれる
- 手引き¹⁾では、主幹部の投影面積のみ考慮

※1 : 立木密度×胸高直径より算定(参考値)

立木密度 : 点群樹木本数を目視で計数(約1100本)し、算定

胸高直径 : 現地観測にて幹径の平均値(0. 18m)

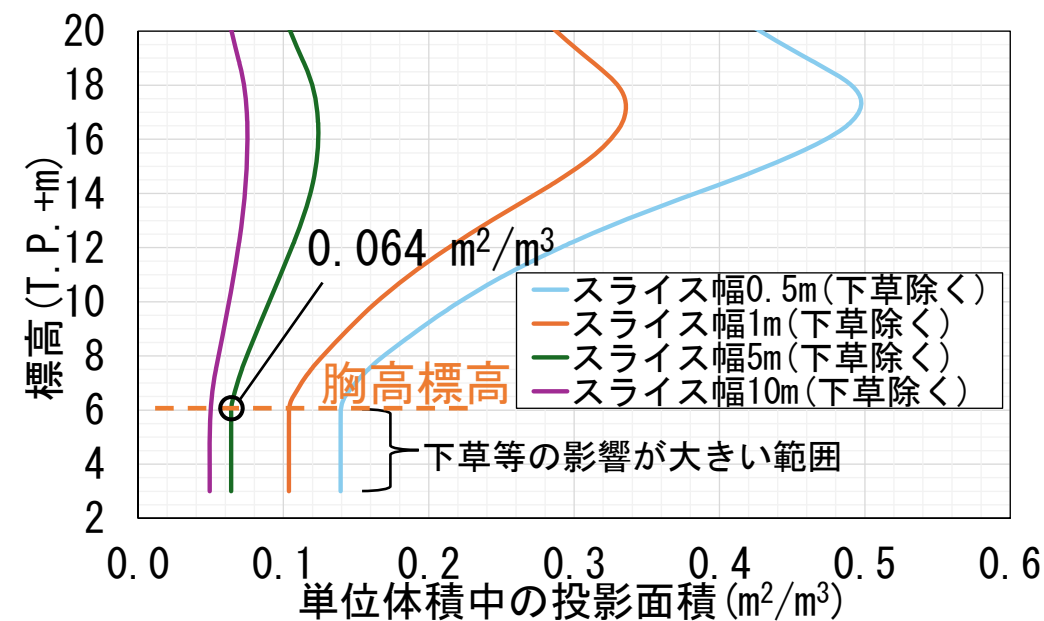


図-単位体積中の樹木総投影面積の鉛直分布

1) 財団法人国土技術研究センター編：河道計画検討の手引き，山海堂，2002.

■スライス幅と単位体積中の樹木総投影面積の関係

【スライス幅と投影面積の関係】

■スライス幅 $\gg$ 樹幹幅

流下方向に複数樹木の投影部がひとつに重なる。

■スライス幅 $\simeq$ 樹幹幅

流下方向に一本程度の樹木（主幹部）の投影部が含まれる。

■スライス幅 $\ll$ 樹幹幅

単木がスライス領域で分割され、同一箇所が各スライス領域で投影面積として重複して集計される。

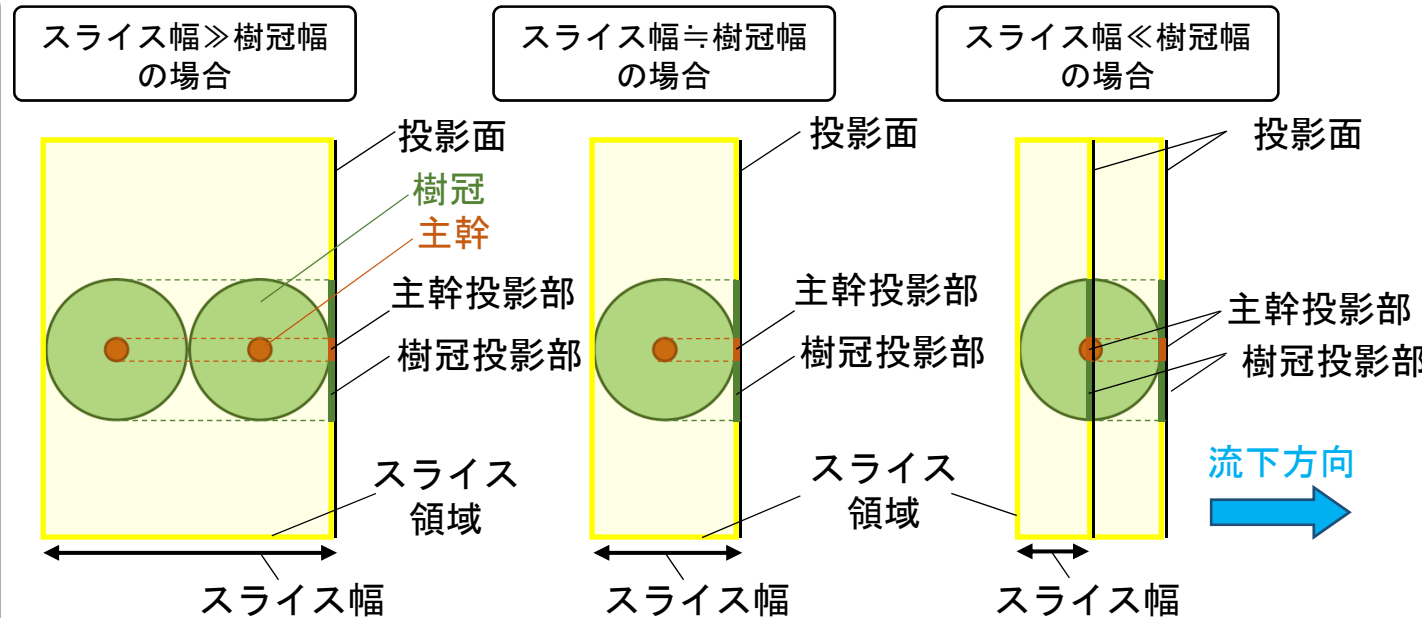


図-スライス幅と単位体積中の樹木総投影面積の関係のイメージ

本手法は、流水への樹木抵抗を評価する上で、投影面積と抗力係数から求めようとする試みだが、投影面積の評価については、流下方向に並ぶ樹木や枝葉同士の干渉等により評価が複雑となる。

樹木1本ずつの投影面積を正確に評価することを考え、スライス幅は樹幹幅を選択した。
この時の投影面積に対応する抗力係数を適切に与えれば、樹木による流水への抵抗を適切に評価できるものと考えられる。

比較のため、「河道計画検討の手引き」の手法により、抗力係数1.2および立木密度と胸高直径より求めた単位体積中の樹木総投影面積 ($0.016\text{m}^2/\text{m}^3$) を用いて、樹木群粗度係数を算定した。

抗力係数0.6および1.2のいずれの場合も、「河道計画検討の手引き」の手法による樹木群粗度係数よりも、河床から枝下高までの水深において最大1.5~2.1倍大きい値を示した。

また、樹高付近においては抗力係数1.2では同程度、抗力係数0.6では0.7倍程度の値を示した。

ただし、抗力係数の影響が大きいため、試算された樹木群粗度係数が実現象を表現し得るかの検証が今後の課題

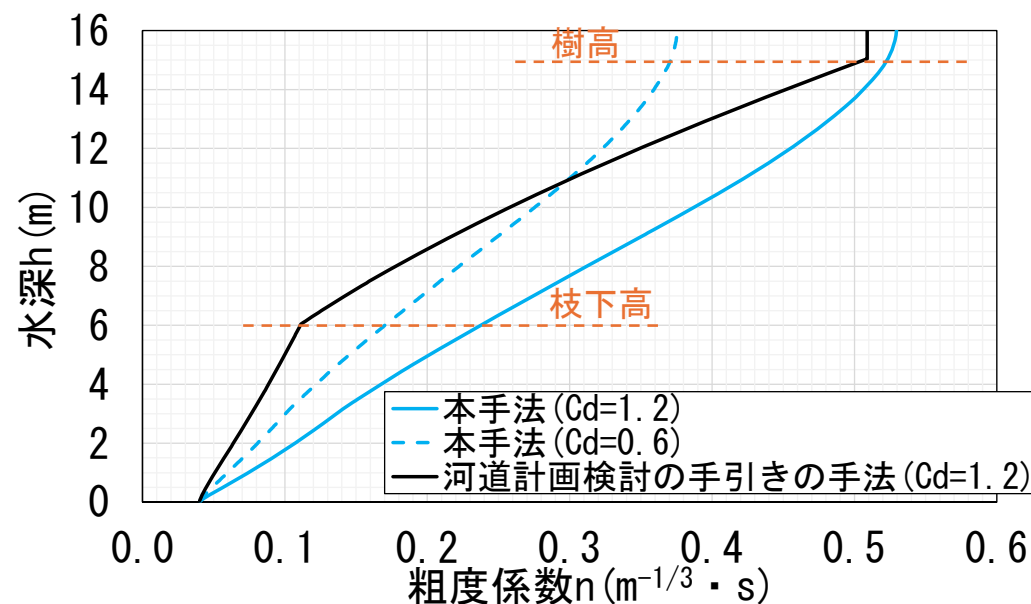


図-樹木群粗度係数の水深分布 (スライス幅 5m)

【結論】

UAVレーザ計測により取得した高密度な三次元点群を用いることで、

- 樹木群における投影面積率の鉛直分布を定量的に評価する手法を示し、樹木形状の鉛直構造を把握できることを示した。
- 投影面積率の鉛直分布を用いて、「河道計画検討の手引き」に示される流下能力評価に必要な樹高、枝下高、単位体積中の樹木総投影面積を算定できることを示した。
- 本手法により樹種ごとに投影面積の鉛直分布を求め、実際の抗力との関係性を評価できれば、種々の樹木群が有する流下能力への影響を評価するための有効な手段となる。

【課題】

- 計測時期や樹種、樹木の密生状況等によるUAVレーザ計測の適用性の検証
- 本手法により得られた単位体積中の樹木総投影面積を用いて、実洪水を対象とした樹木群粗度係数を推定する上での抗力係数に関する知見の蓄積
- 本手法を用いた樹木抵抗を考慮した流下能力評価の妥当性の検証

【今後の展望】

- 準二次元不等流計算だけでなく、平面二次元計算や三次元計算等における樹木群の抵抗をモデル化するうえでの基礎データとしての活用への展開