



令和7年度森林資源調査手法の  
複合利用に関する評価検証委託事業  
**業務報告書**

# 業務概要



業務概要を以下に示す。

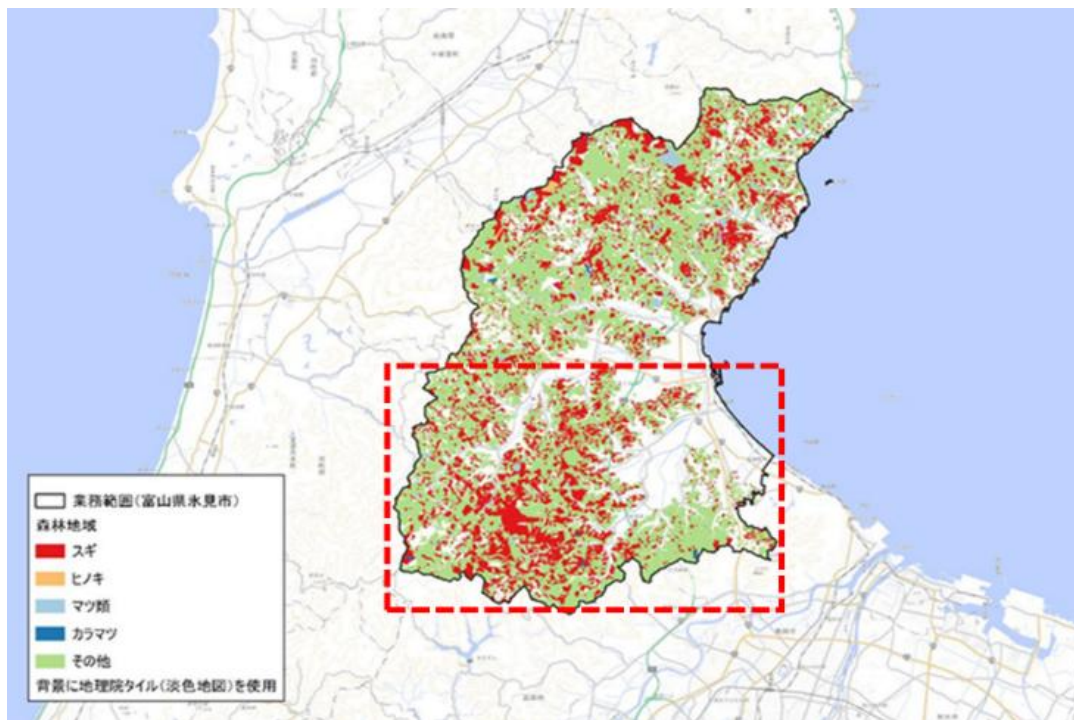
項目	内容
業務名	令和7年度森林資源調査手法の複合利用に関する評価検証委託事業
業務目的	平成30年度と令和6年度の2回にわたり、航空レーザ測量が実施され、令和6年度のほぼ同時期に空中写真撮影も行われた富山県氷見市、群馬県みどり市を実証地として、空中写真による森林資源把握手法のポテンシャル評価を行い、リモートセンシングを複合利用することによる効率的な森林資源調査手法の確立に向けた検討を行うこと。
履行場所	富山県氷見市、群馬県みどり市
履行期間	令和7年5月30日～令和7年12月15日
委託者	林野庁森林整備部計画課
受託者	国際航業株式会社

# 業務対象地

本業務の対象地を以下に示す。

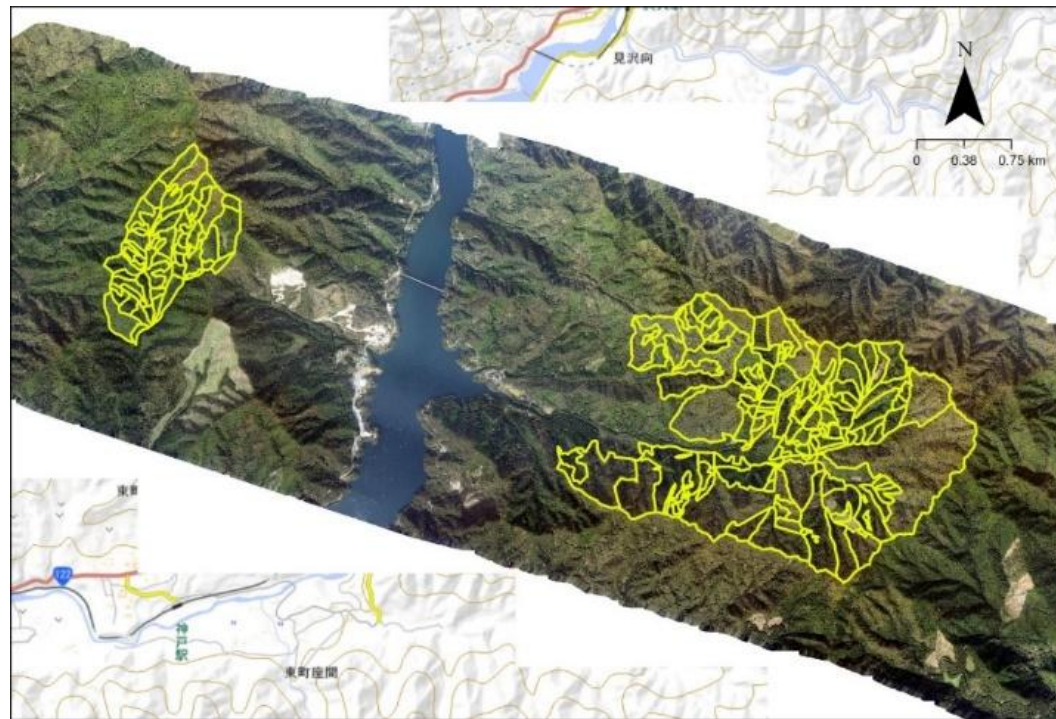
## ● 富山県氷見市

空中写真解析においては、地形条件に富み、スギの分布が広い南部を対象とした。詳細な解析範囲については後述する。



## ● 群馬県みどり市

群馬県みどり市に位置する東京農工大学演習林（FM大谷山、FM草木）での検証を実施した。



# 業務フロー



本業務の業務フローを以下に示す。

空中写真解析

仕様書 第3-1

1 既存データの収集・整理

仕様書 (1)

2 空中写真を由来とする  
表層高モデル・オルソ画像の作成

仕様書 (2)

3 航空レーザ測量データを併用した空中写真を  
由来とする樹冠高モデルの作成

仕様書 (3)

4 単木ポイントの作成

仕様書 (4)

5 ダウンサイジングした樹冠高モデルの作成

仕様書 (5)

6 評価検証

地位・樹高成長モデルに基づく樹高推定

仕様書 第3-2

1 既存データの収集・整理

仕様書 (1)

2 地位指数分布図の作成

3 収穫予想表の整理

仕様書 (2)(3)

4 各種収穫予想表に基づく樹高推定  
・富山県収穫予想表  
・林野庁収穫予想表

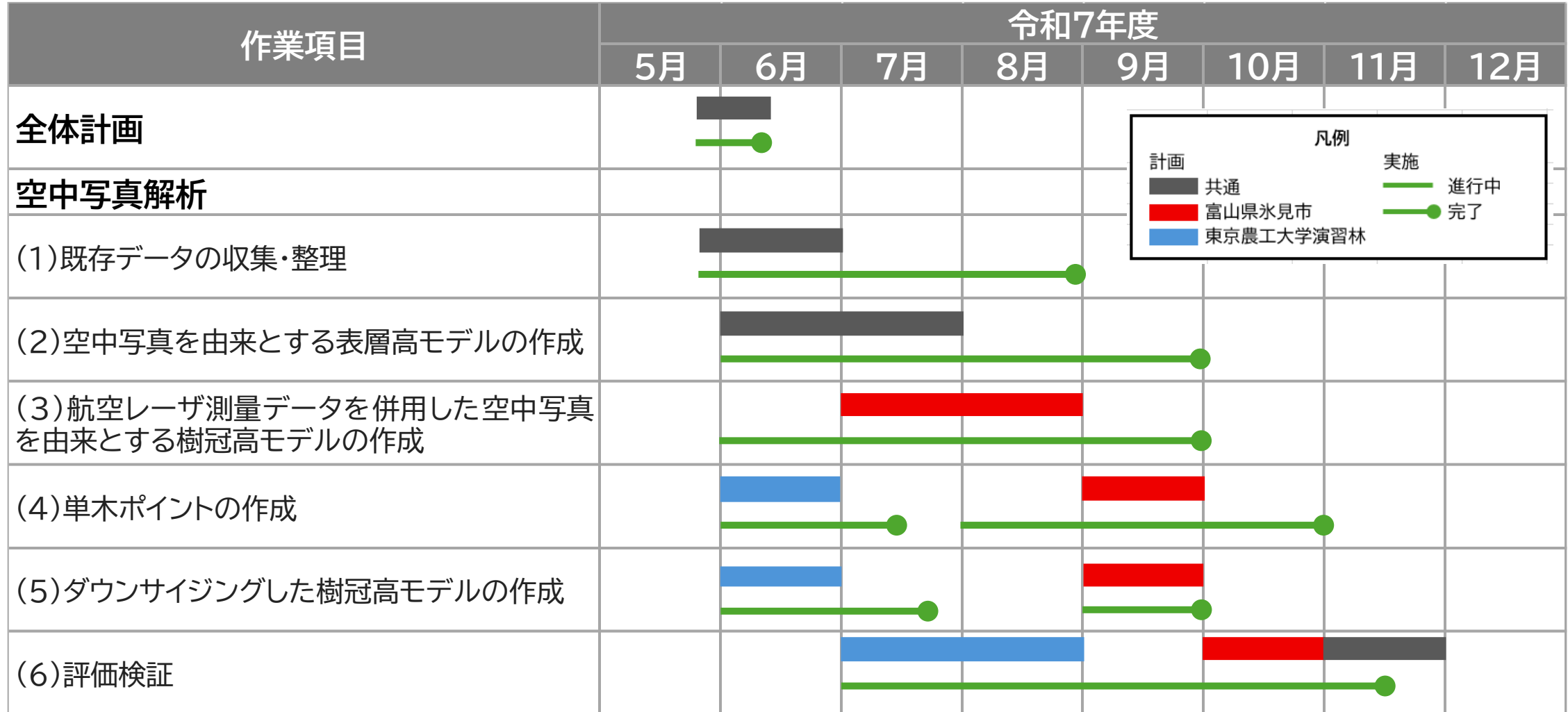
5 評価検証

報告書作成

仕様書 第3-3

# 空中写真解析

# 業務項目



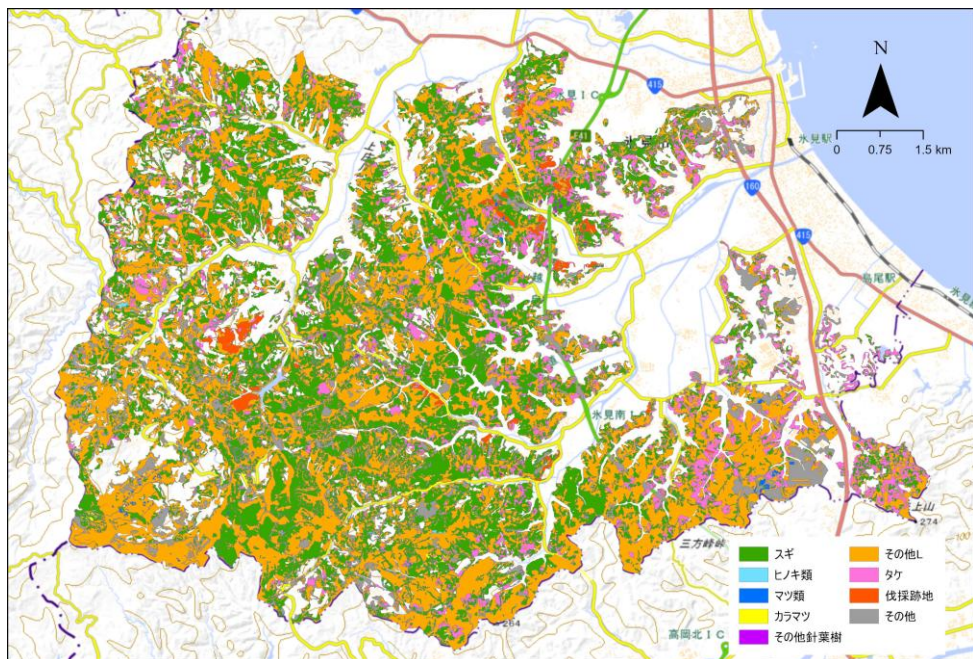
# 解析範囲



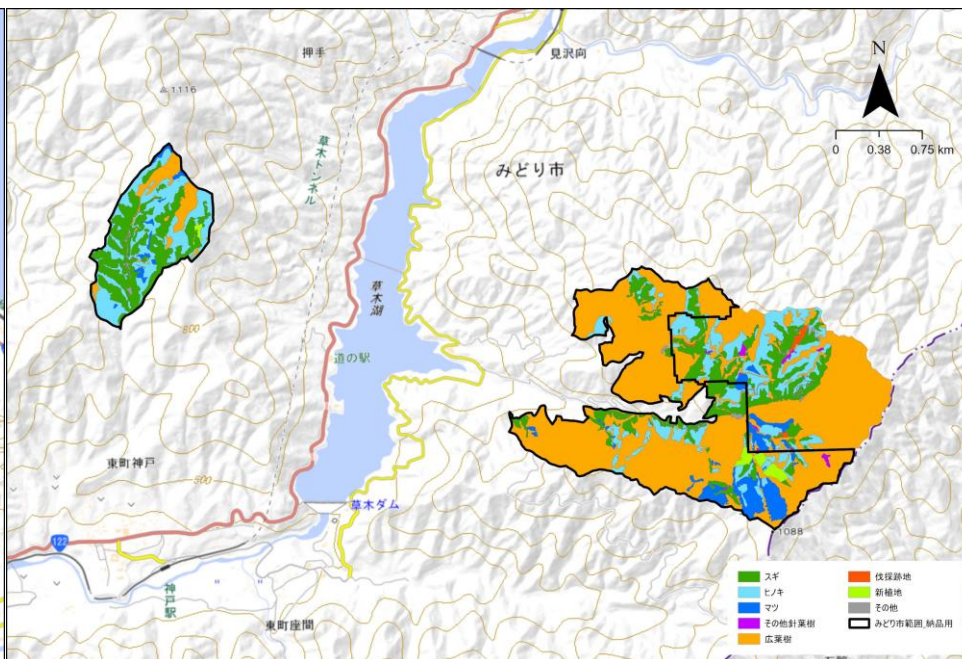
氷見市については、氷見市南部の林班から約60km<sup>2</sup>を抽出し、収集した航空レーザおよび空中写真がある範囲を解析範囲とした。スギ林について、まばらに分布しており、比較的疎な林分や広葉樹と混交している林分が多く見られた。

みどり市については、農工大演習林範囲のうち、収集した航空レーザおよび空中写真がある範囲（下図黒枠内）を解析範囲とした。スギ、ヒノキについて植栽年や施業履歴が整備されており、比較的管理された林分が多い。氷見市と比較すると山地のため地形条件が厳しい。

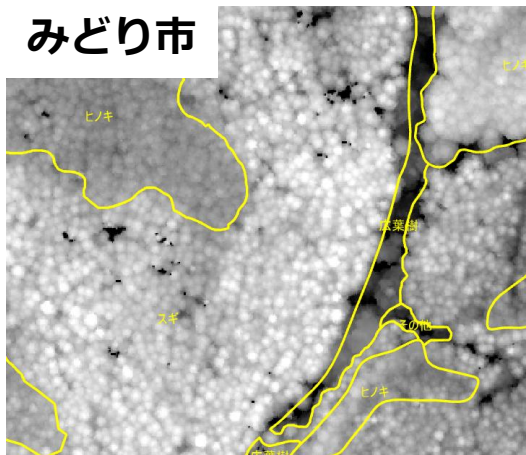
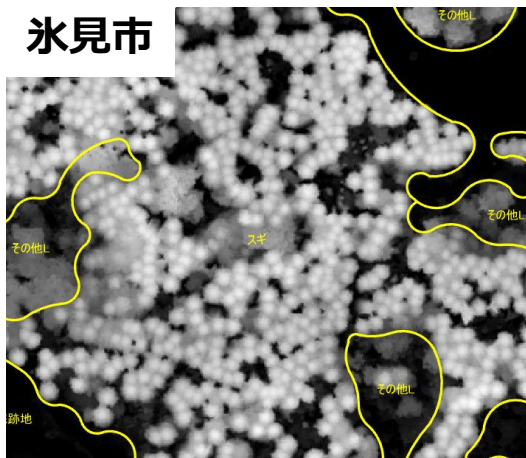
### 氷見市解析範囲



### みどり市解析範囲



### スギ林の例（同縮尺）





# (1) 既存データの収集・整理

## (2) 空中写真に由来する表層高モデルの作成

空中写真解析の実施のため、以下のデータを収集した。

検証場所	成果	計測諸元	計測年※2	測量計画機関
富山県氷見市 (60 km <sup>2</sup> )	空中写真	コース内重複60%、コース間重複30% 地上画素寸法20cm	令和6年4月	国土地理院
	空中写真	コース内重複60%、コース間重複40% 地上画素寸法12cm	令和4年12月	富山県氷見市 (固定資産業務)
	航空レーザ	高密度	令和6年3月～4月	林野庁
	航空レーザ		平成30年8月～9月	富山県
	樹種区分図	—	—	林野庁令和6年度業務成果
	DEM	基盤地図情報標高モデル5m	—	国土地理院
群馬県みどり市 東京農工大学演習林 (5.3 km <sup>2</sup> )	空中写真	コース内重複85%、コース間重複63% 地上画素寸法13cm	令和6年11月	国際航業株式会社
	空中写真	コース内重複60%程度、コース間重複 30%程度※1 地上画素寸法17cm	令和4年12月	群馬県みどり市 (固定資産業務)
	航空レーザ	高密度	令和6年11月	国際航業株式会社
	航空レーザ		平成30年10月～12月	渡良瀬川河川事務所
	樹種区分図	—	—	国際航業株式会社作成
	DEM	基盤地図情報標高モデル5m	—	国土地理院

※1 みどり市令和4年度空中写真については、受領した資料からラップ率が分からなかったため、データより算出した

※2 以降のページでは、平成を「H」、令和を「R」と記載する

## (2) 空中写真に由来する表層高モデルの作成 :



借用した空中写真（単写真）及びその他付属図書を基に、空中写真を由来とする表層高モデル（DSM）を作成するとともに、地盤高モデル（DEM）およびDSMをベースとするオルソフォト（DEMオルソ、DSMオルソ）を作成した。作成手順を以下に示す。

作業準備

- 空中写真成果（撮影画像、外部標定要素）を借用した

表層高モデル作成

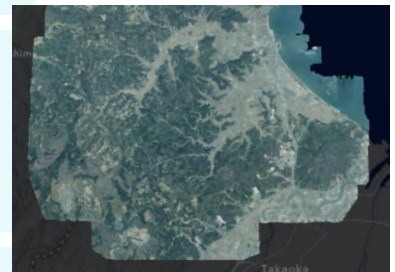
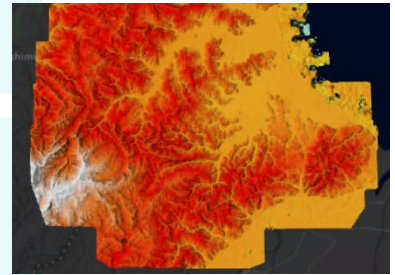
- マッチング精度向上のため水部のみの画像を除外して作成した

オルソフォト作成

- 本業務で借用した空中写真成果はDSM作成に適していないラップ率であったため、低ラップ撮影に適したマッチング精度の調整を行った

精度確認

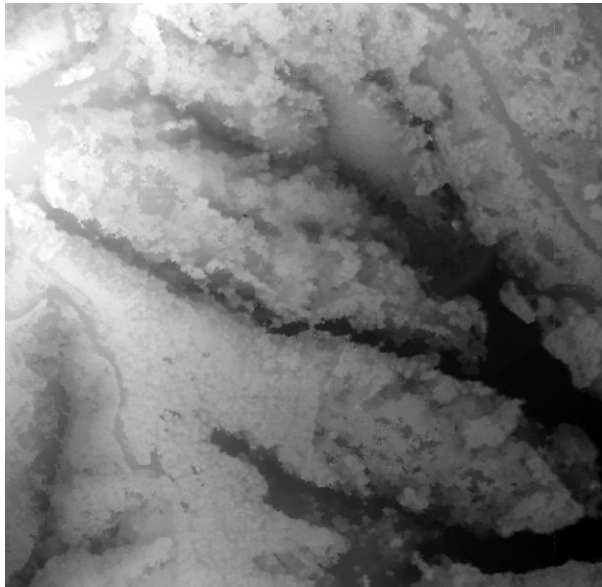
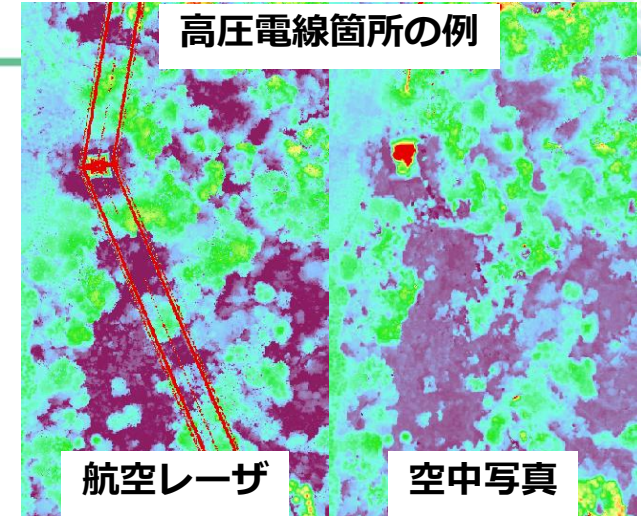
- 作成した表層高モデルと、重複する箇所を撮影した2枚の画像の視差及び画像が撮影された位置と姿勢より標高を測定した結果（ステレオモデル）を比較し、大きな差がない事を確認した



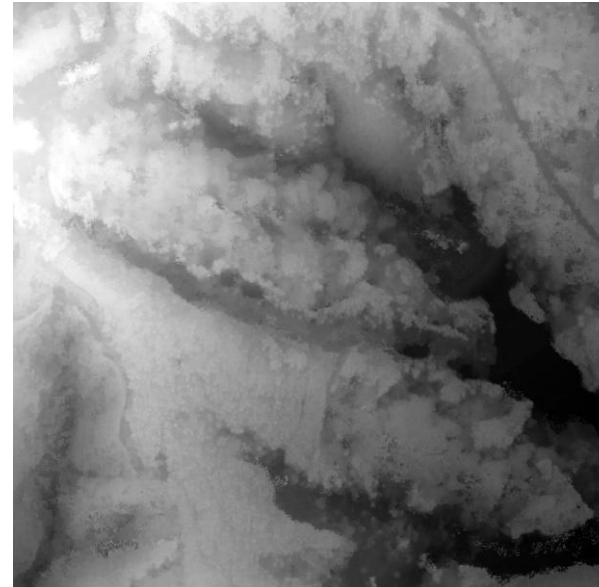
## (2) 空中写真に由来する表層高モデルの作成

### <氷見市特徴>

- R6およびR4のどちらも冬季の撮影成果であり、広葉樹が落葉している。
- R4空中写真においては、撮影時刻の影響によりオルソ画像で影が多く見られた。
- 対象範囲内で高圧電線が見られたが、空中写真DSMへの影響は航空レーザDSMと比較して小さかった。ただ、場所によっては大きく影響がでている箇所があったため、高圧電線部分に重複するメッシュを除外し解析を進めた。



氷見市R6 (DSM、DSMオルソ)



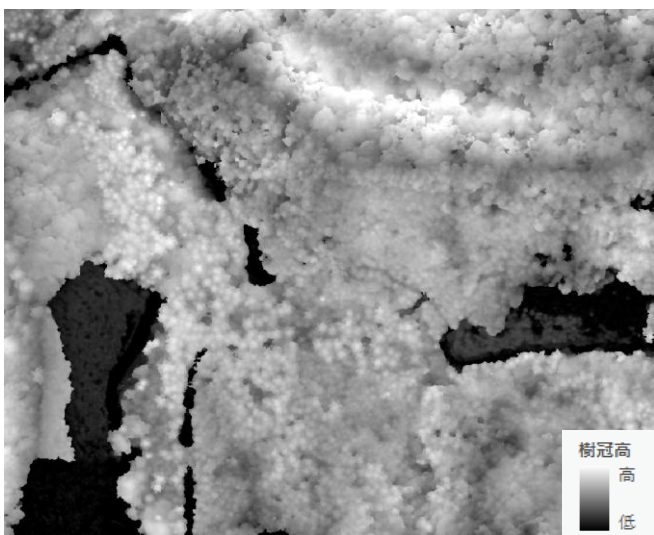
氷見市R4 (DSM、DSMオルソ)



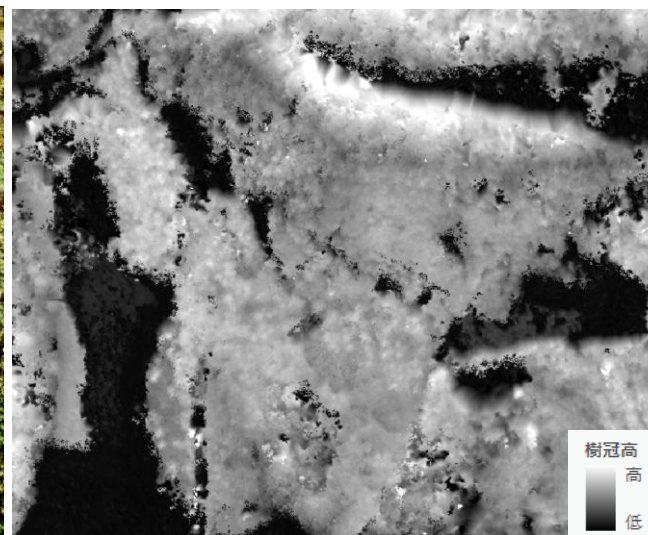
## (2) 空中写真に由来する表層高モデルの作成

### <みどり市特徴>

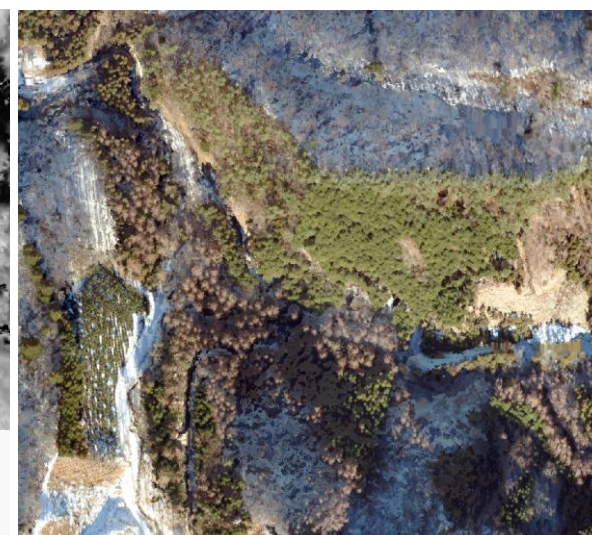
- 対象範囲において、高圧電線等の森林よりも高い構造物はなかったため、表層高が著しく高い値等は発生しなかった。
- R4空中写真の撮影時期は冬期であり、空中写真から積雪が確認された。また、撮影時刻によりオルソ画像で影が多く見られた。
- R6空中写真の撮影時期は秋期であり、広葉樹は紅葉しているが、着葉している樹木が多かった。



みどり市R6 (DSM、DSMオルソ)



みどり市R4 (DSM、DSMオルソ)

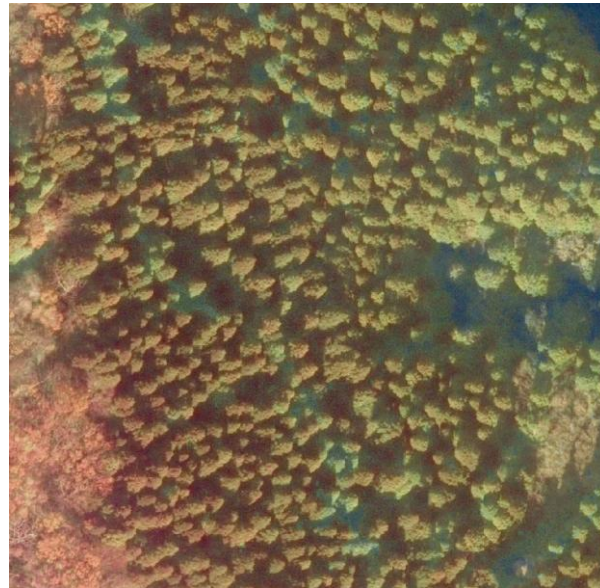


## (2) 空中写真に由来する表層高モデルの作成

氷見市R4空中写真について、DEMオルソとDSMオルソを比較した。DEMオルソではマッチングがうまくいかず、消えている樹木や、倒れこみが見られた。一方DSMオルソは、航空レーザ成果のDCHMと位置が概ね一致していた。樹種等の境界確認やレーザ成果の背景図として活用にはDSMオルソが適切であると考えられる。



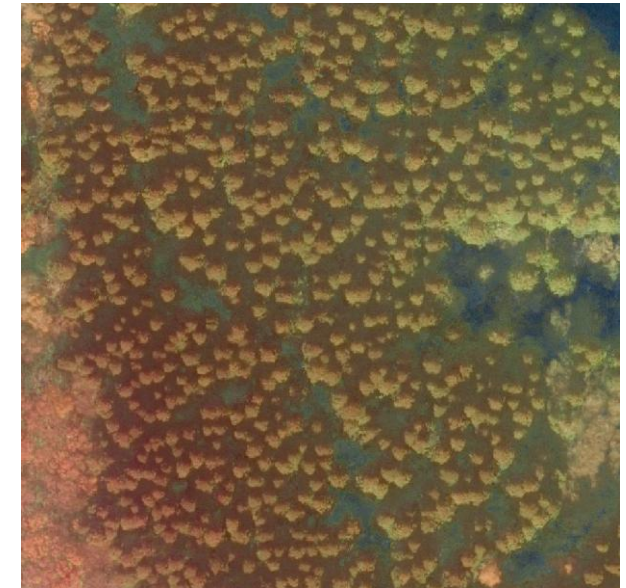
DEMオルソ



DEMオルソにDCHMを重ねた図



DSMオルソ



DSMオルソにDCHMを重ねた図



### (3) 航空レーザ測量データを併用した空中写真に由来する樹冠高モデルの作成

本業務で扱う樹冠高モデルの成果と検証目的について以下に示す。

番号	項目	樹冠高モデル		検証目的	検証内容
		DSM	DEM		
①	航空レーザ	R6航空レーザ	R6航空レーザ	樹冠高、樹頂点データを本検証の正解データとして使用	
②	空中写真	空中写真 (R6・R4)	R6航空レーザ	森林情報の更新方法として、空中写真由来のDSMを活用した場合の精度を検証	①の樹冠高および樹頂点との比較
③	航空レーザ (表層のみ)	R6航空レーザ	H30航空レーザ 国土地理院レーザ	森林情報の更新方法として、航空レーザでDSMのみを更新した場合の精度を検証	
④	解像度のダウンサイジング	①の樹冠高モデルの解像度を1mに変換		森林情報の更新方法として、解像度を下げた場合の精度を検証	
⑤	点密度のダウンサイジング	R6航空レーザを間引いたデータ	R6航空レーザ	森林情報の更新方法として、点密度を下げた場合の精度を検証	①の樹冠高との比較

# 空中写真DSMの検証結果

### (3) 航空レーザ測量データを併用した空中写真に由来する樹冠高モデルの作成 DCHMの外観比較

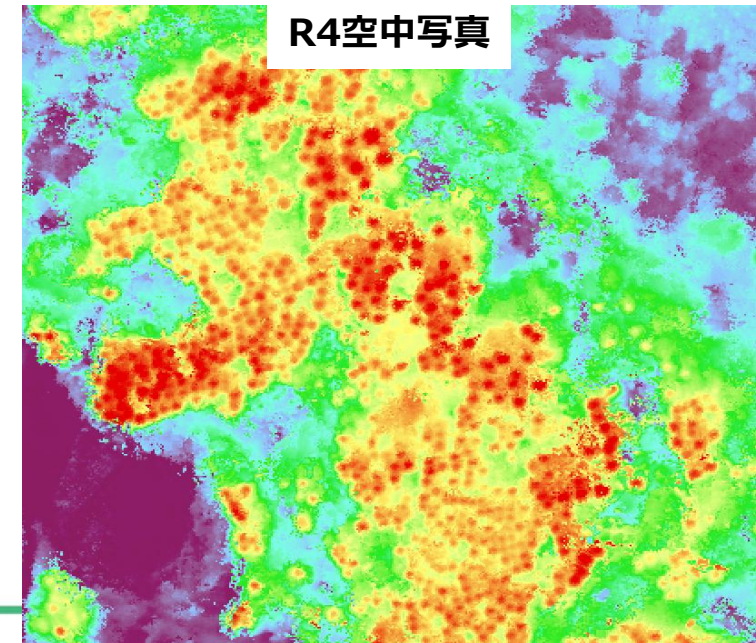
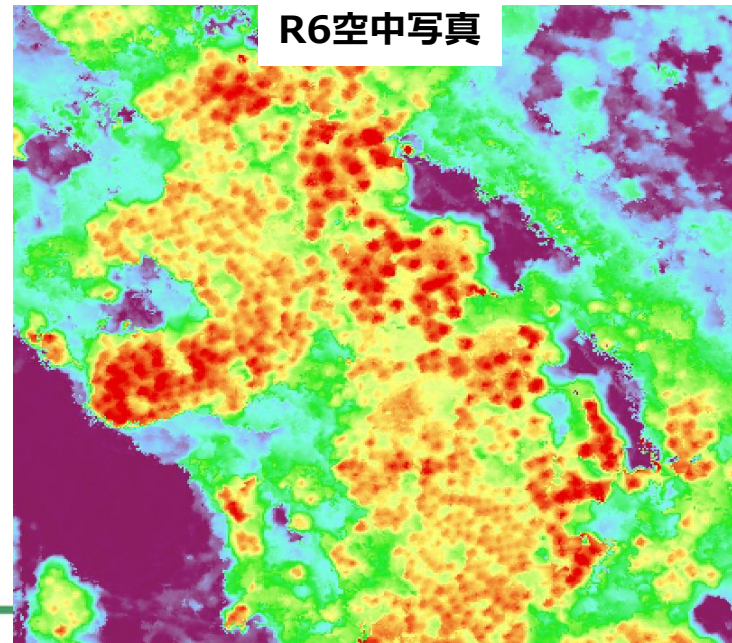
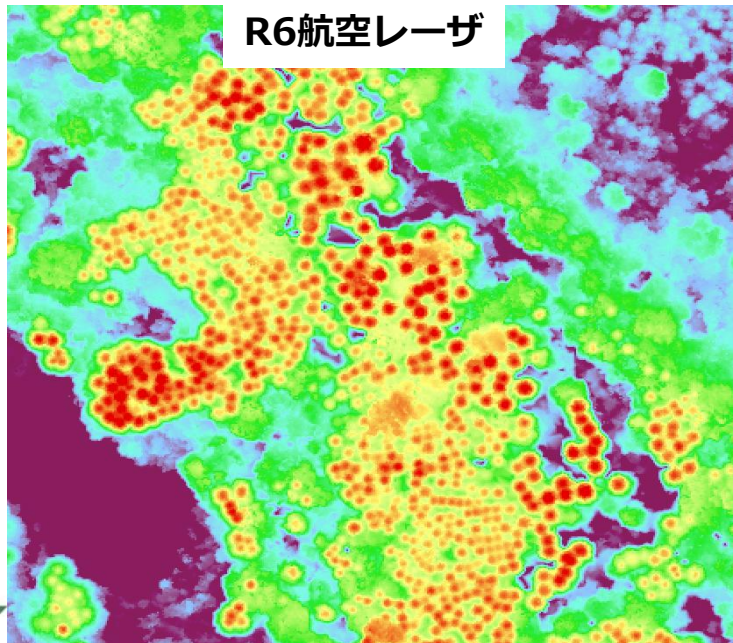
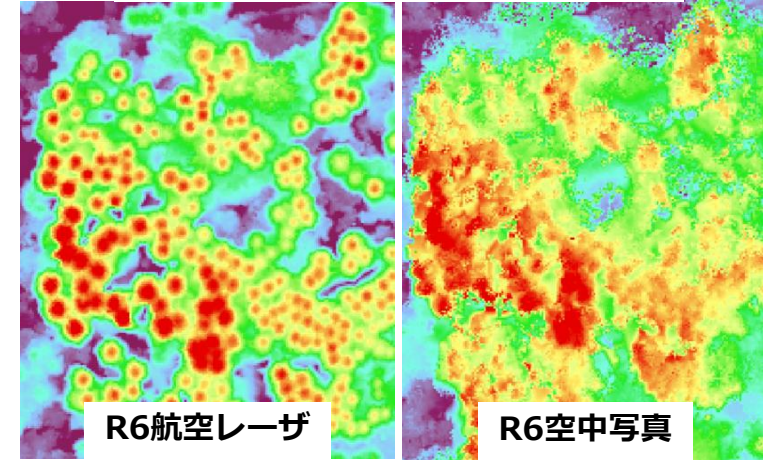
空中写真DSMと航空レーザDEMを差分解析し、DCHMを作成した。空中写真DSMはギャップ等の高さが急激に変化する部分で高さの推定精度が低下し、特にギャップ内で空中写真DSMが過大、林縁部で過小となる傾向が見られた。氷見市、みどり市それぞれで作成したDCHM、航空レーザDSMと空中写真DSMの差分値の例を示す。

#### <氷見市R6特徴>

- 場所により樹冠の凹凸が視認しづらい部分があった。
- 落葉しているため、広葉樹で空中写真DCHMの方が値が低かった。

#### DCHMの外観比較

樹冠の凹凸が視認しづらい箇所の例

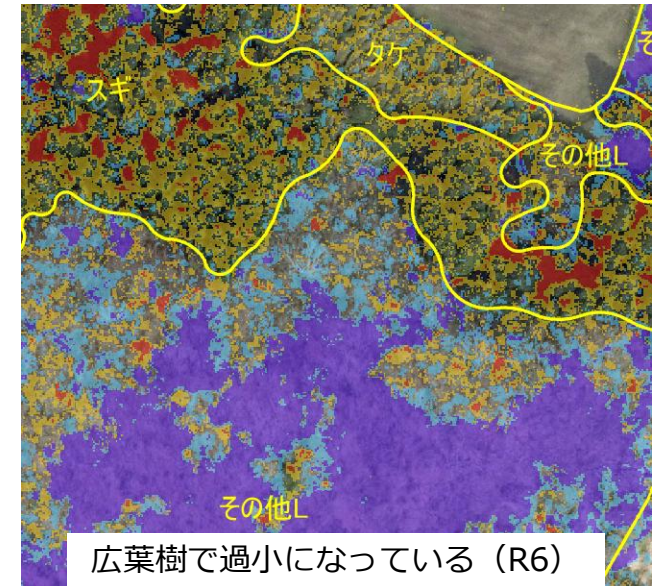
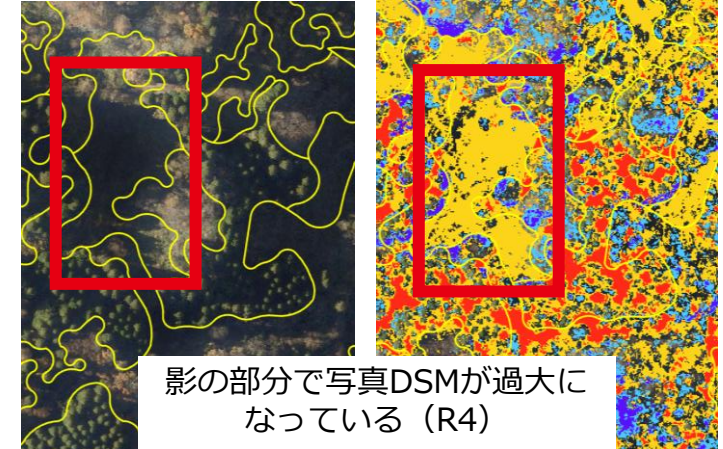
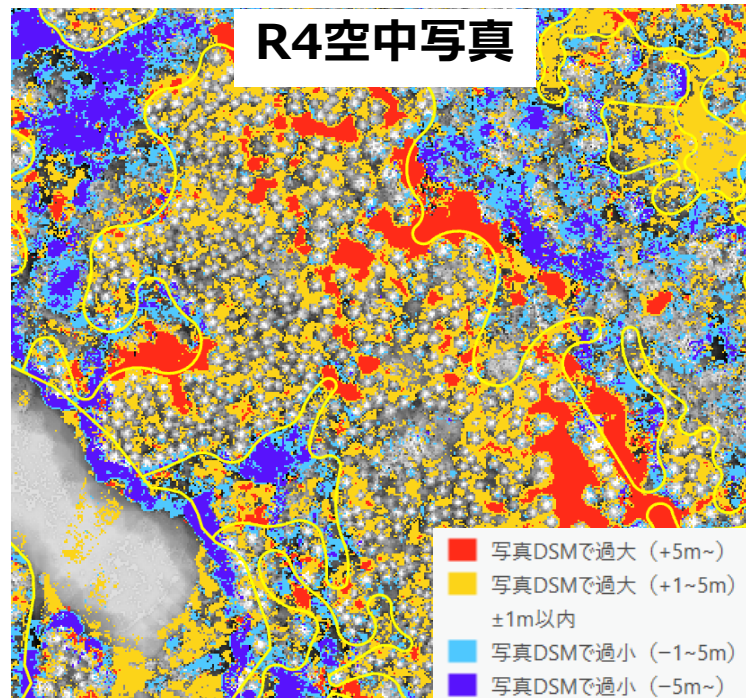
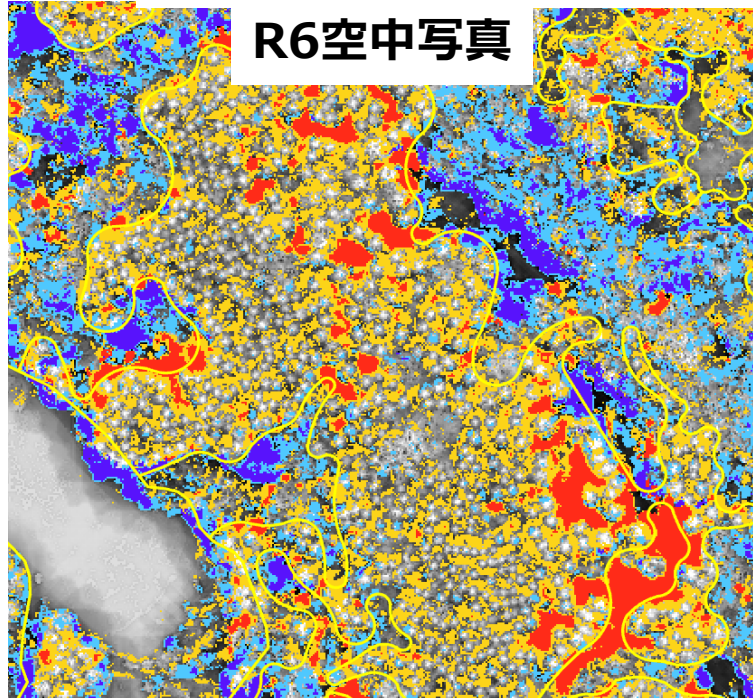


### (3) 航空レーザ測量データを併用した空中写真に由来する樹冠高モデルの作成 DCHMの外観比較

#### <氷見市R4特徴>

- 影の部分においては空中写真の方が過大であった。高さの推定ができておらず、誤差が大きくなっていると考えられる。
- 落葉しているため、広葉樹で空中写真DCHMの方が値が低かった。

#### 航空レーザDSMと空中写真DSMの差分 (背景：地上開度)

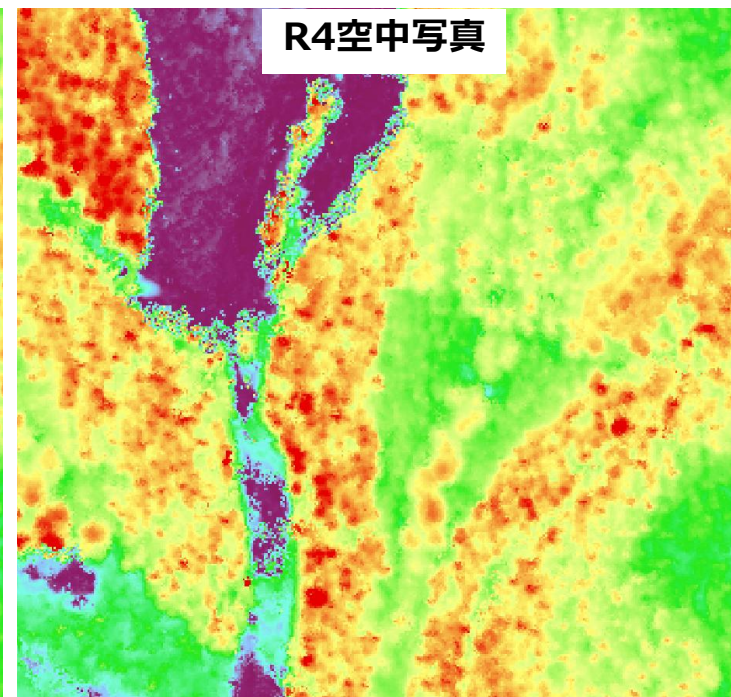
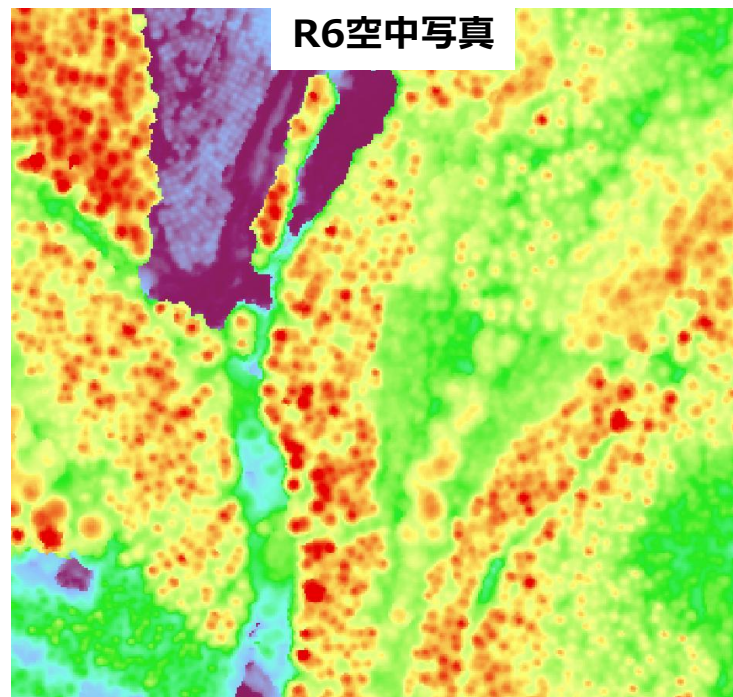
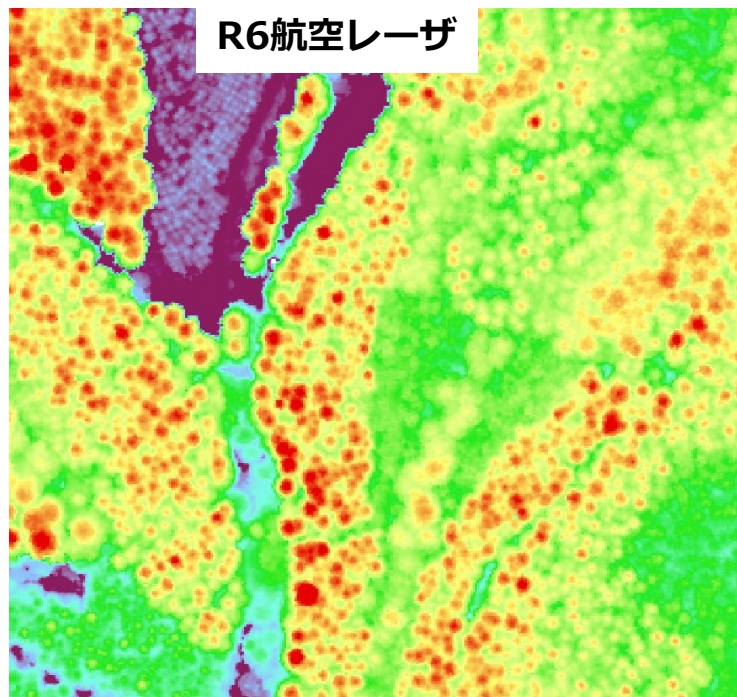


### (3) 航空レーザ測量データを併用した空中写真に由来する樹冠高モデルの作成 DCHMの外観比較

#### <みどり市R6特徴>

- 全体的に大きなエラーはなかったが、木が枯れているところで空中写真DSMが過小となることが多かった。画像のマッチができていないと思われる。

#### DCHMの外観比較

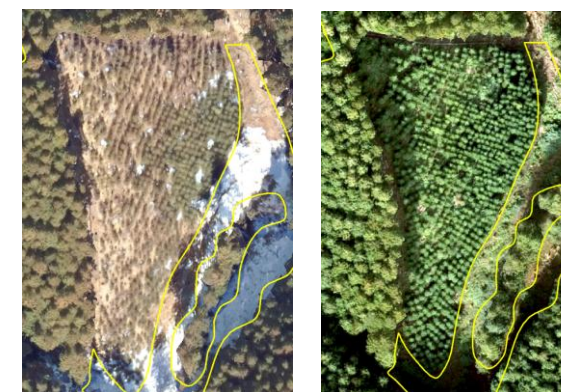
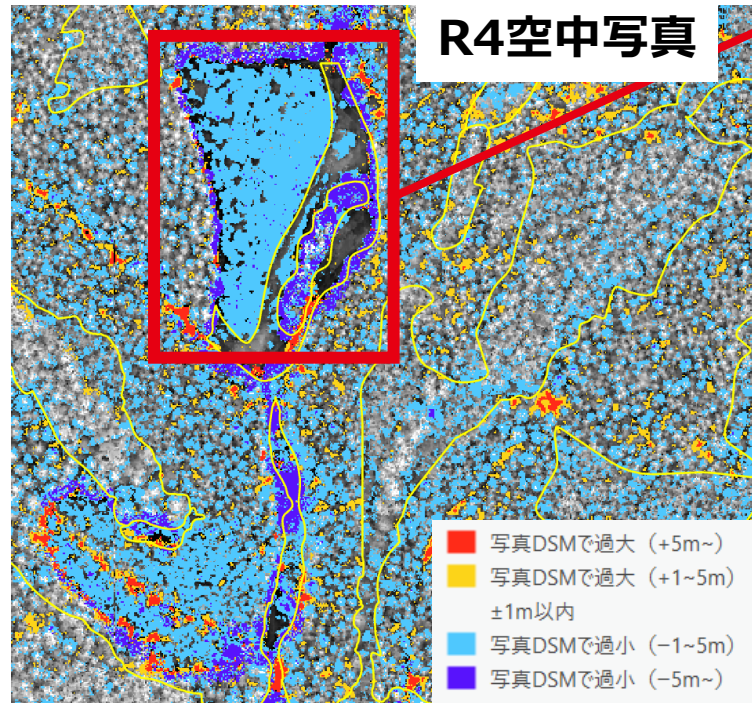
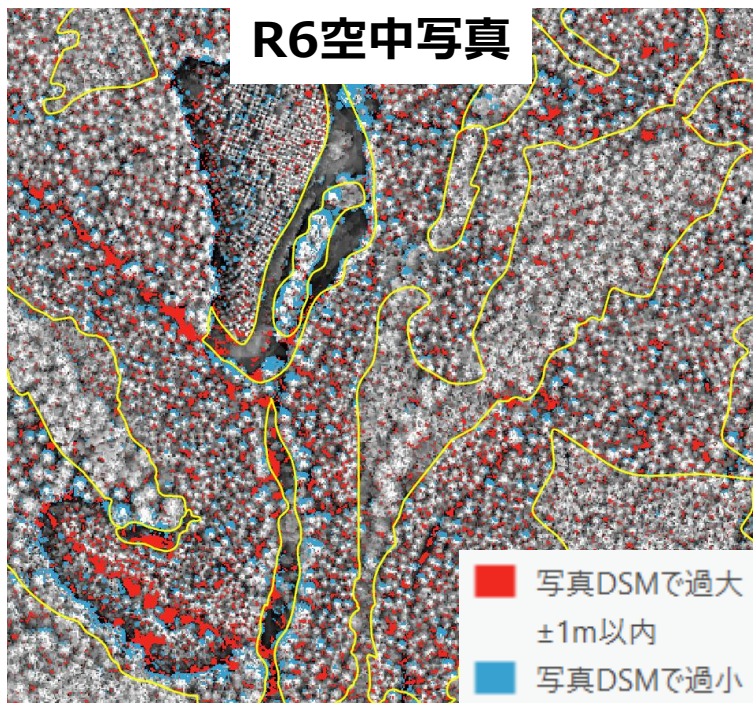


### (3) 航空レーザ測量データを併用した空中写真に由来する樹冠高モデルの作成 DCHMの外観比較

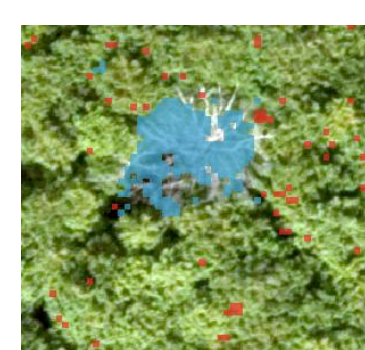
#### <みどり市R4特徴>

- 画像が暗い部分の針葉樹においては空中写真の方が過大であり、影の影響でDSMの作成がうまくいっていないと考えられる。
- 画像が明るい部分の針葉樹においては空中写真の方が1~5m過小であった。DSM作成時の誤差も含まれると考えられるが、林齢の若い林分で特に過小であったため、約2年分の林分成長も反映していると考えられる。

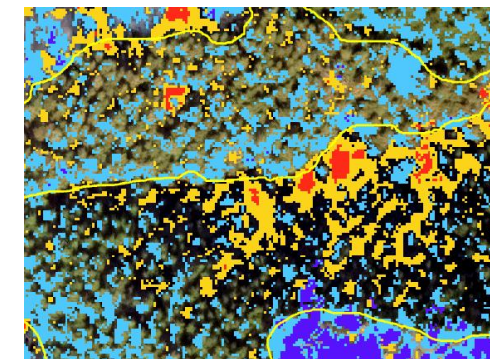
航空レーザDSMと空中写真DCHMの差分 (背景：地上開度)



写真から成長が確認できる



枯木で過小評価  
となっている



影の部分で誤差が  
大きくなっている



### (3) 航空レーザ測量データを併用した空中写真に由来する樹冠高モデルの作成

## DCHMの外観比較参考：空中写真DSMと航空レーザDSMを比較する際の留意点

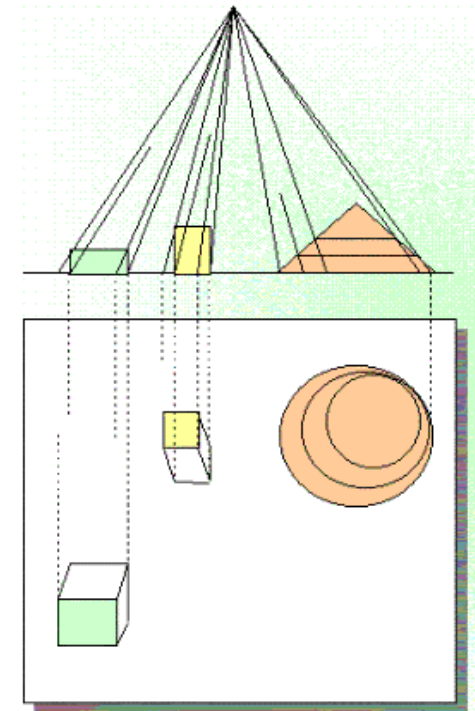
空中写真DSMと航空レーザDSMの高さをアスファルト等の平地でサンプルを取り比較したところ、最大30~40cm差がある箇所が見られた。誤差の大きさ、方向は場所によってばらつきがあった。

航空レーザ測量は、2000m程度の高度から直接地形を計測する仕組みであり、作業規程の準則では、標高精度は±30cm以内（標準偏差）とされている。（準則第571条）

一方、空中写真による地形モデル作成は、画像マッチングによるものであり、撮影された地上画素寸法や測量の累積誤差の影響を受ける。作業規程の準則では、地図情報レベル毎に異なる規格が設定されており、地上画素寸法10~15cmは、±0.5m以内（地図情報レベル1000）、15cm~20cmは、±1.0m以内（地図情報レベル2500）とされている。（準則第310条）

上記、異なる測量成果同士の標高比較により、数10cmの誤差が生じるのは、妥当な結果であると判断できる。誤差のばらつきについては、画像マッチングの精度は画質に依存される傾向があり、テクスチャが乏しい場所（アスファルト等）や影部で精度が低下する可能性がある。また、森林部は一部誤マッチングや風などの微小な揺らぎにも影響を受け、そのような箇所で誤差が発生している可能性がある。

空中写真の特性として、地形の起伏や建物の高さが原因で、写真上の像の位置がずれて写る現象がある。このずれ（歪み）は、中心から離れるほど大きくなり、複数枚の空中写真からDSMを作成する際に、多少の誤差（Z方向）が発生する可能性があると考えられる。



航空写真(中心投影)

### (3) 航空レーザ測量データを併用した空中写真に由来する樹冠高モデルの作成 DCHMのメッシュへの集計結果

作成したDCHMを20mメッシュに集計した。集計方法は、最大値、平均値、90パーセンタイル値（90PCT）を用いた。R6航空レーザDCHMの集計値を正解データとし、R6およびR4空中写真DCHMの、樹種ごとの平均絶対誤差率（メッシュごとに算出した絶対誤差率を樹種別に平均した値）および二乗平均平方根誤差（RMSE）を算出した。

#### DCHMのメッシュへの集計結果

樹種	メッシュ数	R6航空レーザ			R6空中写真									R4空中写真								
		樹冠高 (m)			樹冠高 (m)			平均絶対誤差率 (%)			RMSE (m)			樹冠高 (m)			平均絶対誤差率 (%)			RMSE (m)		
		平均値	最大値	90PCT	平均値	最大値	90PCT	平均	最大	90PCT	平均	最大	90PCT	平均値	最大値	90PCT	平均	最大	90PCT	平均	最大	90PCT
スギ	70,550	18.3	29.9	25.5	19.6	30.1	25.6	11.4	4.2	3.4	2.5	2.5	1.2	20.5	30.4	26.0	15.8	3.3	3.9	3.4	2.2	1.3
ヒノキ類	202	14.6	23.4	19.2	15.0	23.5	19.3	6.7	3.2	3.8	1.1	1.4	1.1	15.4	23.8	19.5	8.2	3.4	3.8	1.3	1.4	1.0
マツ類	305	7.5	15.1	11.6	6.9	15.0	11.1	15.5	7.0	9.4	1.4	1.6	1.4	7.5	15.2	11.4	23.4	10.4	11.6	1.9	2.6	2.2
カラマツ	305	17.6	27.8	23.8	18.1	28.6	23.8	10.3	5.5	3.8	2.3	2.7	1.6	18.6	28.5	23.9	10.1	3.9	2.6	2.3	2.7	0.8
その他針葉樹	155	18.2	27.7	23.7	18.8	27.6	23.6	7.4	3.0	3.4	1.9	1.1	1.0	18.4	27.7	23.3	6.7	3.0	4.0	1.5	1.2	0.9
その他L	83,123	13.4	23.0	18.8	11.8	22.9	17.3	17.4	8.2	11.5	3.1	2.9	2.9	13.2	23.8	18.3	17.3	8.3	9.5	2.6	3.4	2.3
タケ	17,364	14.2	23.2	18.7	14.3	22.9	18.3	6.8	5.6	5.5	1.2	2.2	1.5	14.7	23.7	18.6	11.1	6.9	7.5	1.8	2.7	1.7
伐採跡地	2,109	1.5	9.9	4.5	1.3	8.0	3.3	102.6	31.8	104.7	1.1	4.3	3.7	6.2	14.4	9.3	1885.8	248.0	1469.0	9.7	11.4	11.5
その他	17,756	2.7	13.2	7.5	2.3	11.8	5.9	56.0	34.7	66.8	1.4	3.8	3.6	3.5	13.7	7.7	159.2	64.0	164.5	2.7	4.8	3.9

#### <氷見市結果>

- スギ、ヒノキの平均樹冠高は空中写真DCHMの方が高くなった。ギャップ部分が過大推定されているため、その分平均値も高くなっていると考えられる。
- スギの平均絶対誤差率がR6空中写真で11.4%、R4空中写真で15.8%となった。R4の方が写真のラップ率が高いが、影等の影響により誤差率が上がっていると考えられる。

### (3) 航空レーザ測量データを併用した空中写真に由来する樹冠高モデルの作成 DCHMのメッシュへの集計結果

#### DCHMのメッシュへの集計結果

樹種	メッシュ数	R6航空レーザ			R6空中写真									R4空中写真								
		樹冠高 (m)			樹冠高 (m)			平均絶対誤差率 (%)			RMSE (m)			樹冠高 (m)			平均絶対誤差率 (%)			RMSE (m)		
		平均値	最大値	90PCT	平均値	最大値	90PCT	平均	最大	90PCT	平均	最大	90PCT	平均値	最大値	90PCT	平均	最大	90PCT	平均	最大	90PCT
スギ	1,669	22.9	30.7	26.7	23.2	30.3	26.7	1.7	1.4	0.8	0.5	0.7	0.3	22.0	30.5	25.8	6.5	5.7	4.4	2.1	3.3	1.4
ヒノキ	1,510	21.4	26.6	23.9	21.7	26.5	24.1	1.6	1.1	0.9	0.4	0.4	0.3	20.5	26.2	23.2	5.1	4.6	3.6	1.9	2.4	1.7
マツ	490	21.3	28.2	25.0	21.5	27.9	24.9	1.0	1.1	0.7	0.3	0.4	0.2	19.3	28.7	24.0	11.7	6.4	5.0	4.0	3.2	2.2
その他針葉樹	14	28.4	35.8	33.2	28.3	35.8	33.3	0.8	0.7	0.4	0.3	0.2	0.2	15.7	31.7	24.3	41.2	18.8	24.8	17.2	12.5	15.2
広葉樹	5,146	21.6	28.2	25.2	21.6	27.9	25.1	1.4	1.5	1.1	0.4	0.6	0.4	9.9	26.5	17.3	55.3	18.2	32.6	14.0	7.9	11.7
新植地	112	2.4	12.8	6.8	2.4	11.9	6.0	47.2	11.1	20.3	0.4	2.8	2.8	4.4	14.7	8.5	601.0	170.2	410.8	6.8	10.7	10.0
その他	34	9.0	23.5	17.6	8.8	22.9	17.3	22.1	3.5	41.5	1.0	2.5	1.1	7.3	22.6	15.5	73.1	29.0	54.1	3.9	4.6	5.6

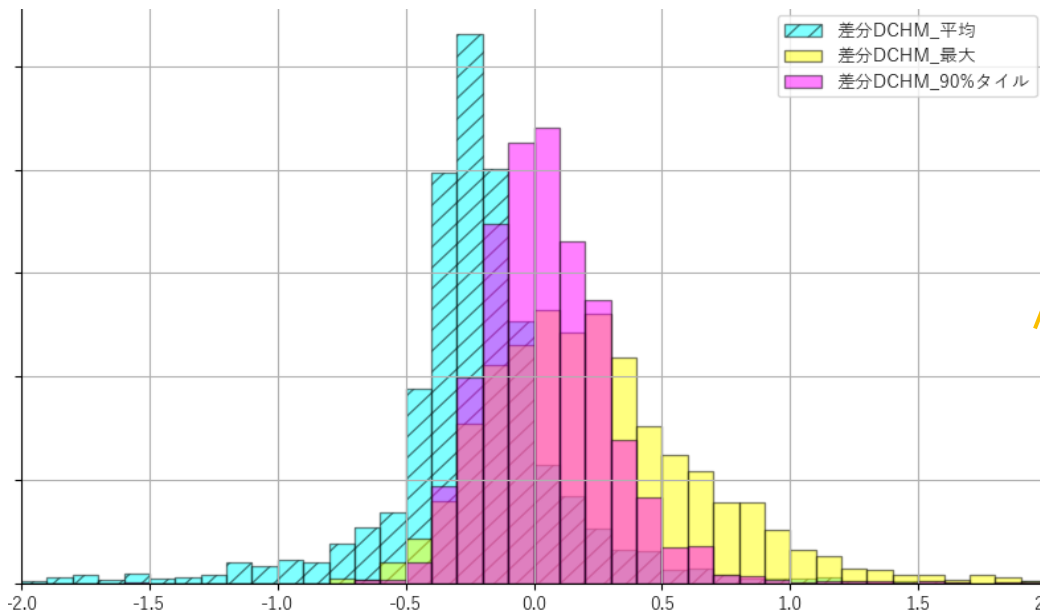
#### <みどり市結果>

- スギ、ヒノキの平均樹冠高はR6航空レーザよりもR6空中写真の方が高かった。
- 一方、R4空中写真の平均樹冠高はR6航空レーザよりも低かった。これは、2年分の成長量も反映しているためと考えられる。
- 立木地の平均DCHMの平均絶対誤差率はR6空中写真で1～2%以内であった。
- スギ、ヒノキの平均DCHMの平均絶対誤差率はR4空中写真で5～7%以内であった。広葉樹については平均絶対誤差率は55.3%であり、撮影時期が落葉期であるため高さの推定ができていないと考えられる。

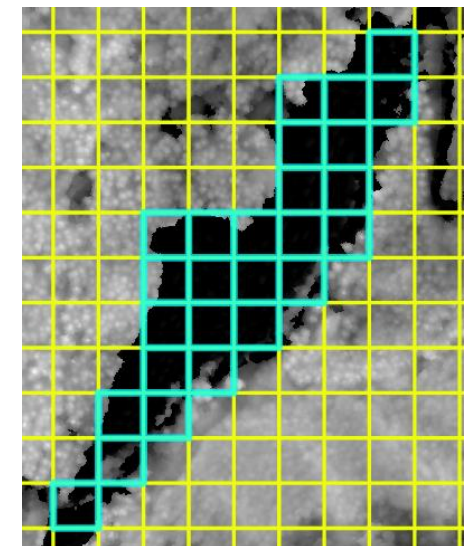
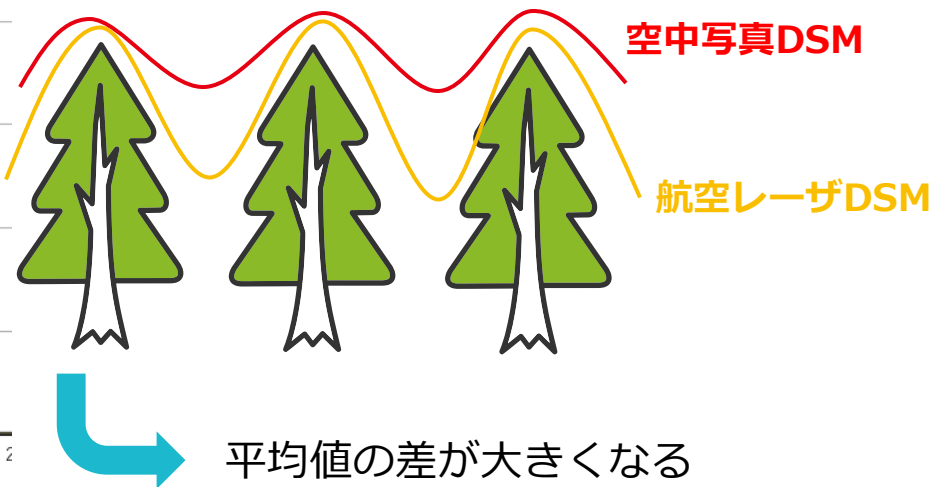


### (3) 航空レーザ測量データを併用した空中写真に由来する樹冠高モデルの作成 DCHMのメッシュへの集計結果参考：集計方法ごとの特性と留意点

- 航空レーザDCHMと空中写真DCHMの20mメッシュへの集計値の誤差は、平均値で最も大きく90PCT値で最も小さくなった。
- これは、メッシュ内でギャップ等樹高に差があると航空レーザでは正確に値が取れるが、空中写真DCHMでは過大（ギャップでの誤差が大きい）となるため、平均値の誤差が大きくなると考えられる。
- 最大値、90PCT値では、無立木地（その他、伐採跡地）が過大評価になった。メッシュの性質上、樹木がある部分も集計範囲に含まれてしまうためと考えられる。



R6航空レーザDCHMとR6空中写真DCHMのメッシュへの集計結果の差分

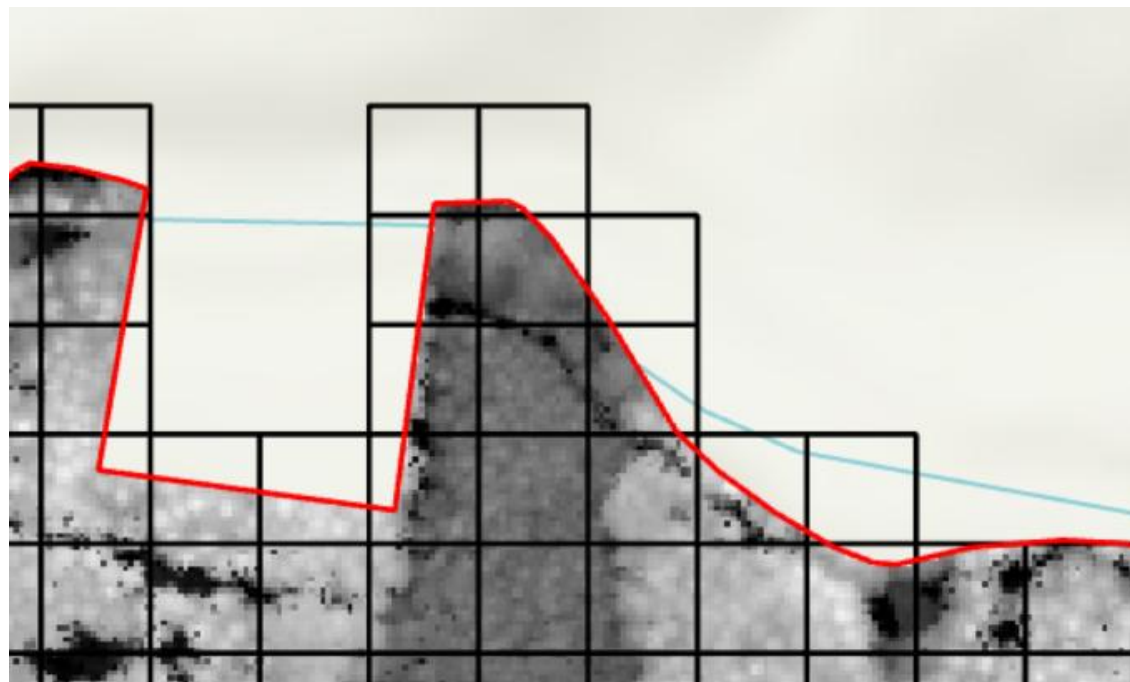


無立木地のメッシュの例



### (3) 航空レーザ測量データを併用した空中写真に由来する樹冠高モデルの作成 DCHMのメッシュへの集計結果参考：メッシュへの集計方法について

本業務では、解析範囲に接するメッシュを対象として集計を実施した。特に、解析範囲からはみ出ているメッシュについては、解析範囲外の市街地や林分のDCHMの影響を最小限に抑えるため、解析範囲で区切ったDCHMを集計に用いた。なお、解析範囲からはみ出ているメッシュに対しては、識別を目的として「範囲外」の属性に「1」を入力した。



範囲端部分のメッシュの例

### (3) 航空レーザ測量データを併用した空中写真に由来する樹冠高モデルの作成 DCHMのメッシュへの集計結果参考：広葉樹の検証

樹冠が明瞭でなく、本数推定が困難な広葉樹の蓄積量推定には、一般的に「総体積法」が用いられている。この手法は、DCHMから算出した体積と、現地で計測した樹木の体積との間の関係式を用いて蓄積量を推定するものである。本業務では、空中写真DSMを広葉樹の総体積法に活用する際の精度を検証するため、航空レーザDCHM体積と空中写真DCHM体積の比較を実施した。

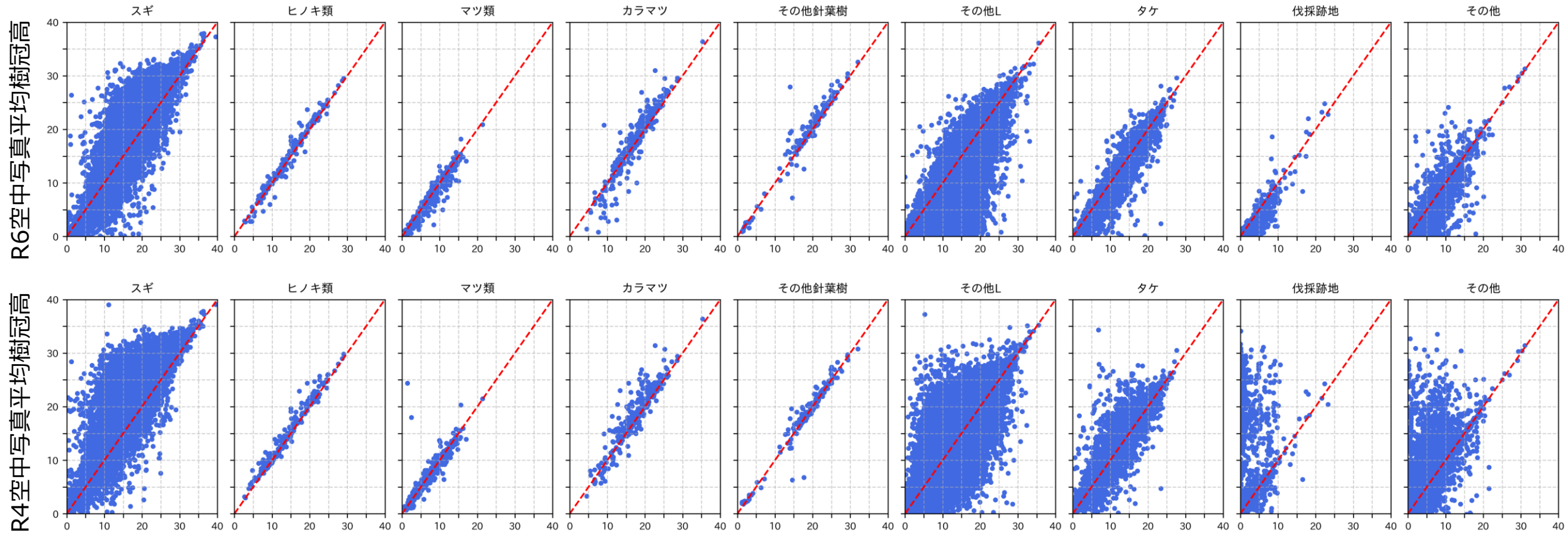
#### 広葉樹メッシュへのDCHM体積集計結果

対象地	メッシュ数	R6航空レーザ	R6空中写真			R4空中写真		
		平均 (m <sup>3</sup> )	平均 (m <sup>3</sup> )	平均絶対誤差率 (%)	RMSE (m <sup>3</sup> )	平均 (m <sup>3</sup> )	平均絶対誤差率 (%)	RMSE (m <sup>3</sup> )
氷見市	83,123	4956.9	4408.6	18.1	1124.0	4889.7	18.0	916.4
みどり市	5,146	8166.6	8135.0	1.4	167.1	3688.7	55.3	5452.6

#### <DCHM体積検証結果>

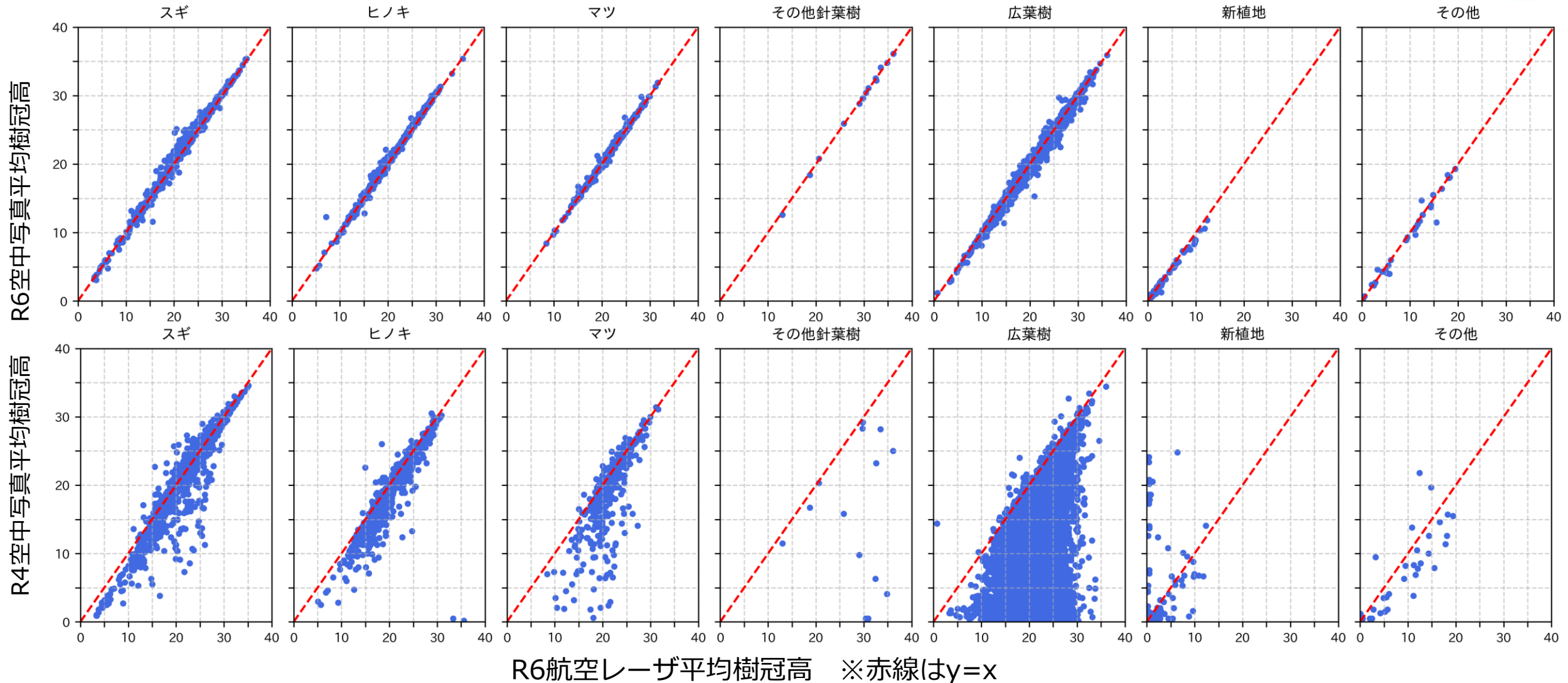
- みどり市のR6空中写真については誤差率が1.4%と低かった。着葉期の撮影、高ラップの空中写真であれば、総体積法に空中写真のDCHM体積を活用することが可能と考えられる。
- みどり市R4、氷見市における検証結果は、DCHMの高さの平均値を集計した結果（p19～p20）と同様に航空レーザDCHM体積と比較して過少であった。落葉期の撮影、低ラップの空中写真は広葉樹の誤差が大きくなると考えられる。
- 着葉期の低ラップの空中写真、落葉期の高ラップの空中写真については、今後検証の余地があると考えられる。

### (3) 航空レーザ測量データを併用した空中写真に由来する樹冠高モデルの作成 DCHMのメッシュへの集計結果参考：樹種ごとの樹冠高データの比較



R6航空レーザ平均樹冠高 ※赤線は $y=x$

(3) 航空レーザ測量データを併用した空中写真に由来する樹冠高モデルの作成  
 DCHMのメッシュへの集計結果参考：樹種ごとの樹冠高データの比較



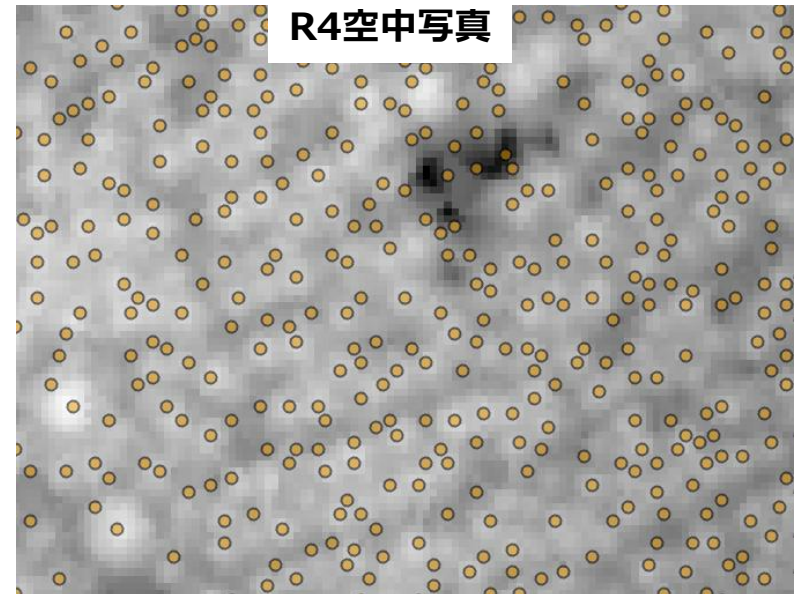
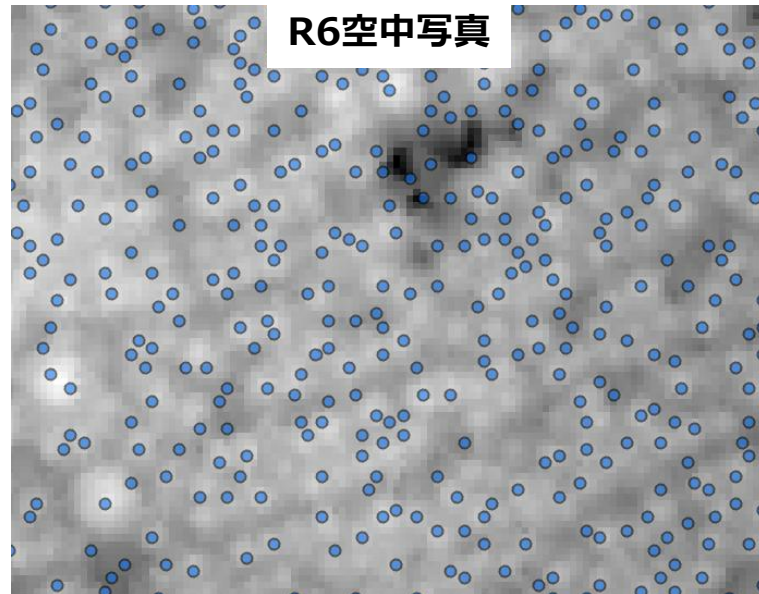
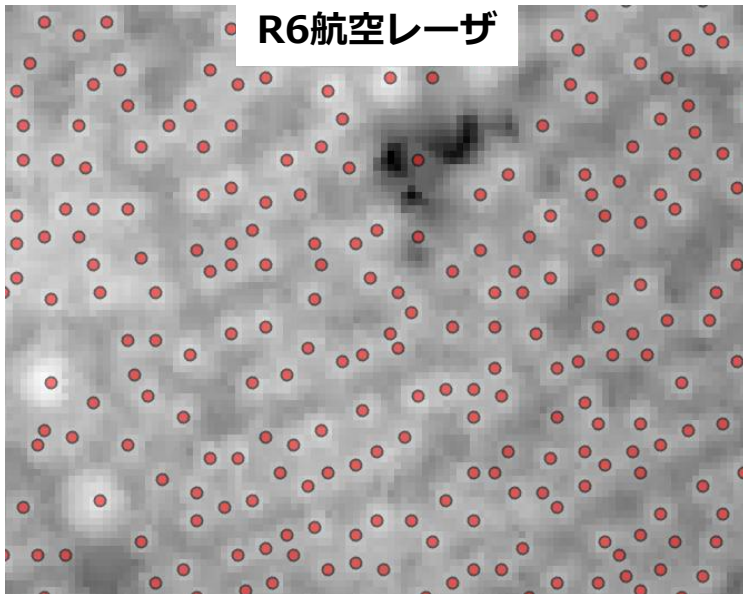
## (4) 単木ポイントの作成 単木ポイントの外観比較

航空レーザDCHMと空中写真DCHMから、樹頂点を抽出した。樹頂点の抽出には一定範囲内の高さが最も高いところを抽出する局所最大値法を採用した。抽出した樹頂点について、樹冠高データ及び樹頂点の位置情報から単木毎に樹高を算出した。

### <氷見市特徴>

- R4およびR6空中写真のどちらにおいても、R6航空レーザ樹頂点と重ねると、樹頂点の位置が合っている箇所もあるが、過剰な点が多かった。空中写真DCHMは、ギャップが埋まっており、樹冠、樹頂点の凹凸が表現できていないことが要因と考えられる。

### 樹頂点の外観比較（背景は航空レーザDCHM）

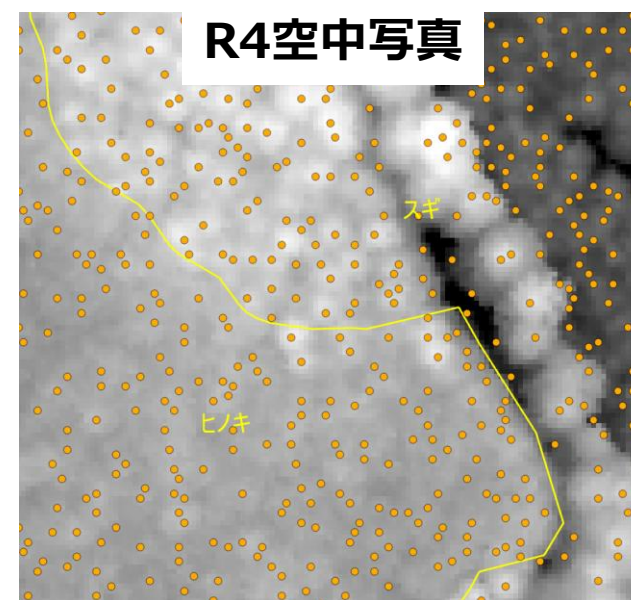
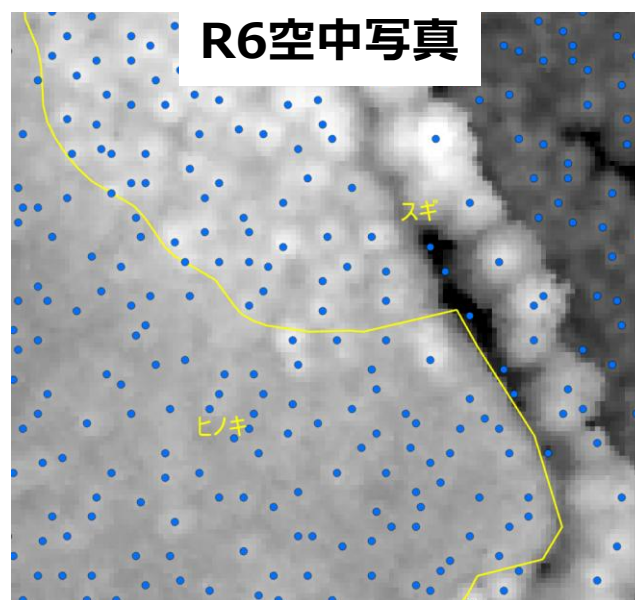
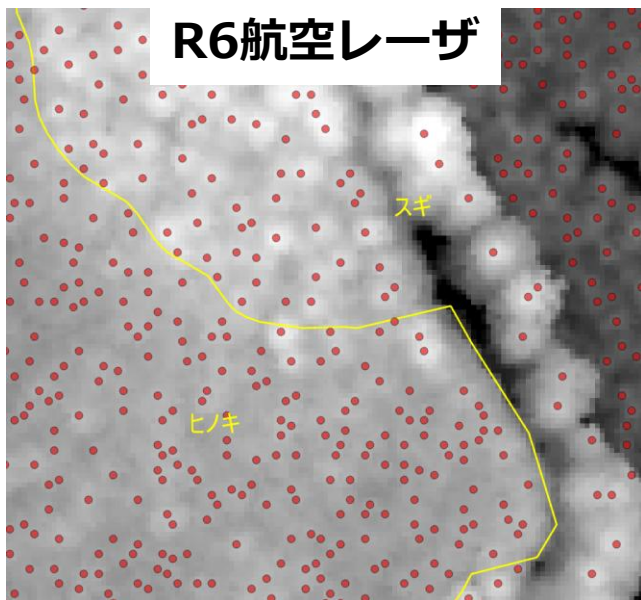


## (4) 単木ポイントの作成 単木ポイントの外観比較

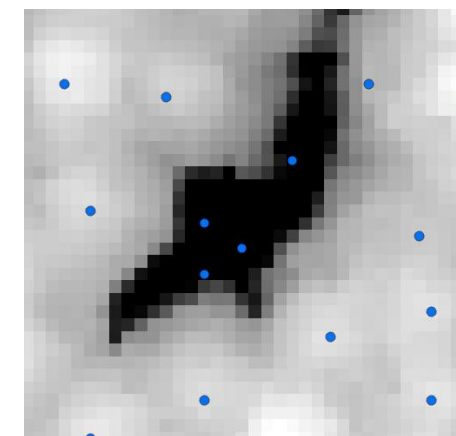
### <みどり市特徴>

- R6空中写真DCHMから作成した樹頂点は航空レーザから作成した樹頂点と比較し、全体的に本数が過小であった。特にヒノキ林分ではその傾向が顕著であった。
- R4空中写真DCHMから作成した樹頂点は、R6航空レーザ樹頂点と重ねると、樹頂点の位置が合っている箇所もあるが、過剰な点が多かった。
- ギャップ部分では空中写真で過大となる箇所がみられ、写真の影の部分で高さ推定の精度が低いことが要因と考えられる。

### 樹頂点の外観比較（背景は航空レーザDCHM）



ギャップ部分で空中写真由来の樹頂点が過剰な例



## (4) 単木ポイントの作成 単木ポイントのメッシュへの集計結果

樹頂点の本数、樹高（平均・最大・90PCT値）をメッシュに集計した。航空レーザ計測成果から抽出した樹頂点を正解データとし、空中写真DCHMから抽出した樹頂点をメッシュ単位に集計した結果について、樹種別の平均絶対誤差率およびRMSEを算出した。なお、本検証の目的は、航空レーザDCHMと空中写真DCHMの特性を比較・把握することであり、樹頂点解析成果と現地観測値との整合性については未検証である点に留意する。

### 樹頂点のメッシュへの集計結果（平均絶対誤差率、RMSE）

樹種	メッシュ数	R6空中写真								R4空中写真							
		平均絶対誤差率 (%)				RMSE (本数 : 本、樹高 : m)				平均絶対誤差率 (%)				RMSE (本数 : 本、樹高 : m)			
		本数	樹高平均	樹高最大	樹高90PCT	本数	樹高平均	樹高最大	樹高90PCT	本数	樹高平均	樹高最大	樹高90PCT	本数	樹高平均	樹高最大	樹高90PCT
スギ	68,771	90.8	7.9	4.4	4.2	15.9	2.6	2.6	1.8	107.0	8.3	3.5	3.8	18.3	2.8	2.2	1.8
ヒノキ	199	41.2	5.6	6.3	6.4	11.1	1.4	2.2	2.0	50.6	5.8	6.3	6.3	12.6	1.3	2.2	1.8
マツ	302	30.0	9.6	8.7	9.0	12.3	1.3	2.1	2.2	27.2	10.5	10.7	9.2	10.6	1.9	2.6	2.2
カラマツ	302	54.0	7.4	6.0	4.6	15.6	2.2	2.8	1.7	50.8	6.0	4.4	3.8	14.1	1.8	2.8	1.6

### <氷見市結果>

- R6およびR4空中写真から作成した樹頂点数はR6航空レーザより過大であり、R6航空レーザ樹頂点と重なると、樹頂点の位置が合っている箇所もあるが、過剰な点が多かった。低ラップの空中写真DCHMは、ギャップが埋まっており、その部分に過剰に樹頂点が発生してしまうため樹頂点数の更新には不向きと考える。樹高については、DCHMを平均した値より抽出した樹頂点の高さを平均した値の方が、航空レーザとの誤差率が小さくなった。これは、樹頂点を作成することで、空中写真特有の誤差要因（ギャップや影の部分）が排除され、適切な高さ情報のみを抽出できたためと考えられる。

## (4) 単木ポイントの作成 単木ポイントのメッシュへの集計結果

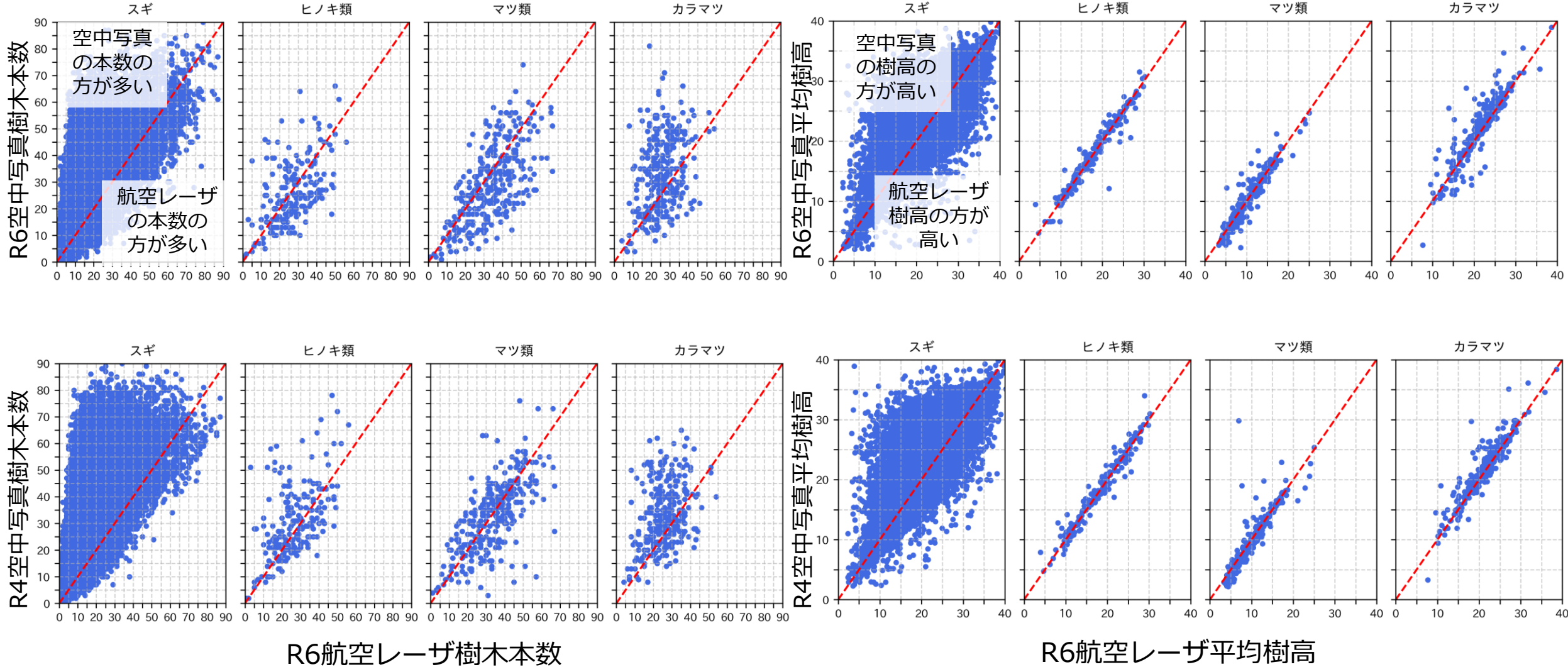
### 樹頂点のメッシュへの集計結果（平均絶対誤差率、RMSE）

樹種	メッシュ数	R6空中写真								R4空中写真							
		平均絶対誤差率 (%)				RMSE (本数:本、樹高:m)				平均絶対誤差率 (%)				RMSE (本数:本、樹高:m)			
		本数	樹高平均	樹高最大	樹高90PCT	本数	樹高平均	樹高最大	樹高90PCT	本数	樹高平均	樹高最大	樹高90PCT	本数	樹高平均	樹高最大	樹高90PCT
スギ	1,661	19.0	1.9	1.6	1.5	6.4	0.7	0.9	0.8	58.0	5.0	6.0	4.7	15.7	1.5	3.3	1.7
ヒノキ	1,499	38.5	1.7	1.3	1.3	15.0	0.5	0.5	0.5	23.0	3.7	4.6	3.6	9.5	1.5	2.3	1.6
マツ	486	35.6	2.0	1.4	1.7	12.8	0.6	0.6	0.7	31.3	5.6	6.8	4.6	10.6	2.4	3.4	2.0

#### <みどり市結果>

- R6空中写真から作成した樹頂点数は航空レーザより過少であったが、相対的な樹頂点数の傾向は一致している（p31）。また、樹高の誤差率は小さかった。高ラップの空中写真から樹頂点を作成する際は航空レーザよりも過少に樹木本数が推定されることに留意し解析することで、樹頂点および樹高データの更新に活用できる可能性がある。
- R4空中写真から作成した樹頂点数は氷見市と同様に航空レーザより過大であり、R6航空レーザ樹頂点と重ねると、樹頂点の位置が合っている箇所もあるが、過剰な点が多かった。低ラップの空中写真DCHMは、ギャップが埋まっており、その部分に過剰に樹頂点が発生してしまうため樹頂点数の更新には不向きと考える。樹高については、DCHMを平均した値より抽出した樹頂点の高さを平均した値の方が、航空レーザとの誤差率が小さくなった。これは、樹頂点を作成することで、空中写真特有の誤差要因（ギャップや影の部分）が排除され、適切な高さ情報のみを抽出できたためと考えられる。

(4) 単木ポイントの作成  
 単木ポイントのメッシュへの集計結果参考：樹種ごとの比較

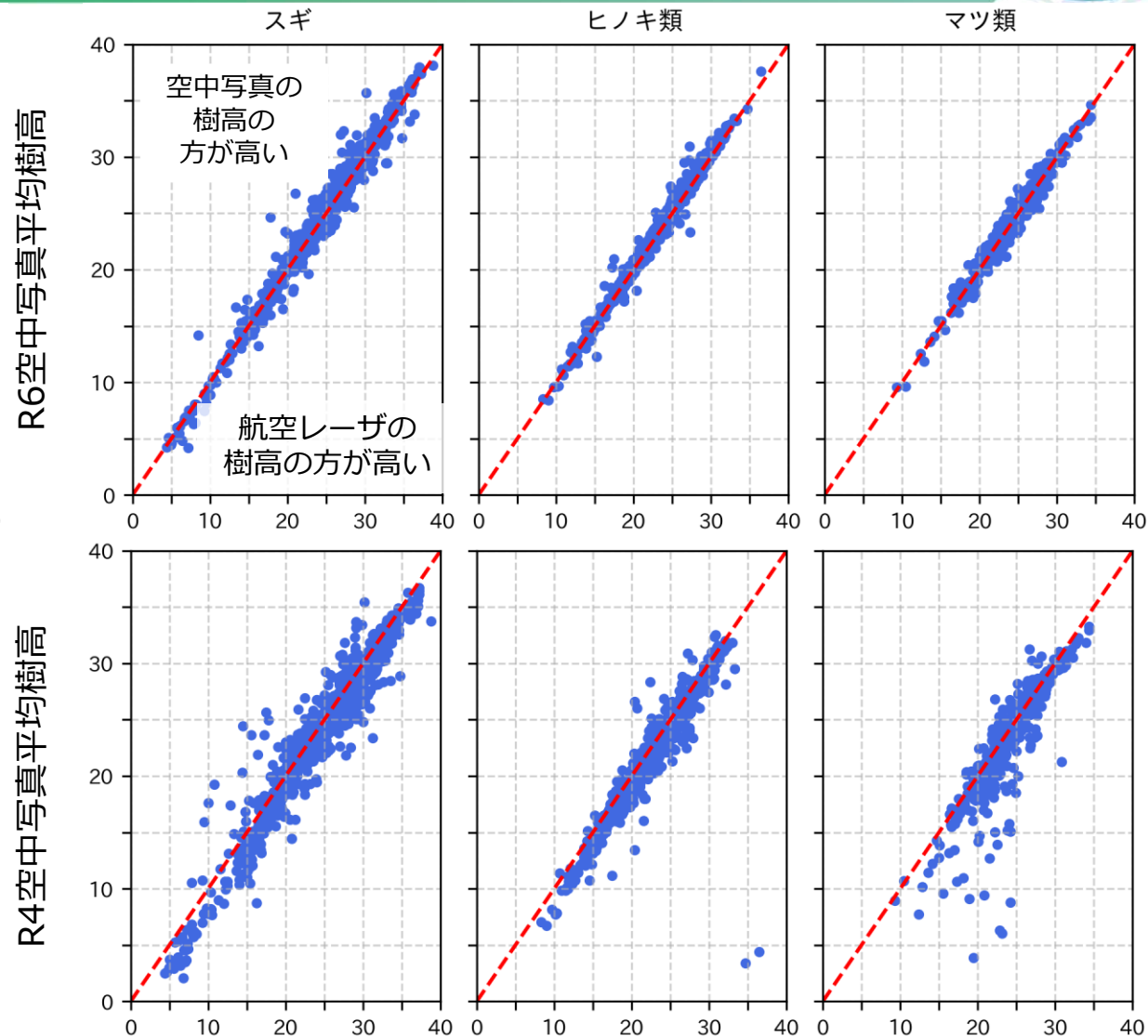
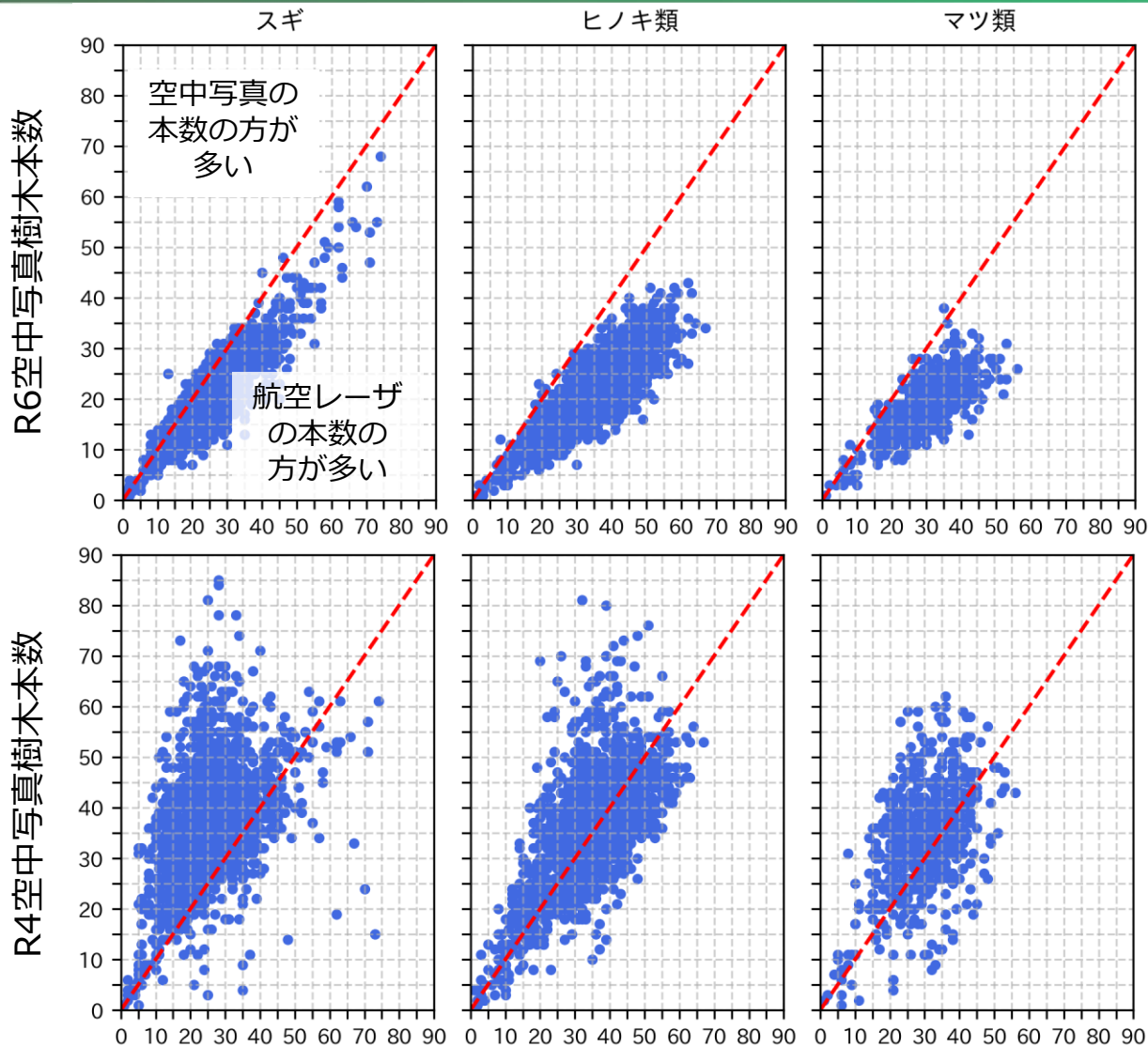


R6航空レーザー樹木本数

R6航空レーザー平均樹高

(4) 単木ポイントの作成

単木ポイントのメッシュへの集計結果参考：樹種ごとの比較



R6航空レーザー樹木本数

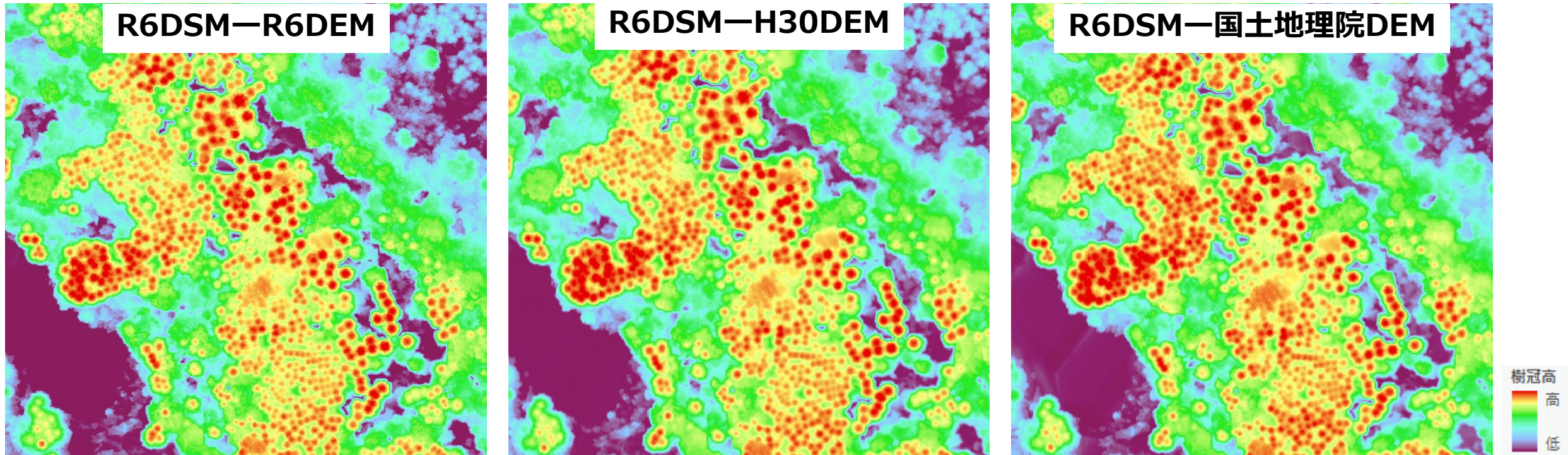
R6航空レーザー平均樹高

# 国土地理院および過年度地盤高モデルを用いた検証結果

### (3) 航空レーザ測量データを併用した空中写真に由来する樹冠高モデルの作成 DCHMの外観比較

森林情報の更新方法として、DSMのみを更新した場合の精度を検証するため、R6航空レーザDSMからH30航空レーザDEM、国土地理院の5mのDEMを減算し、DCHMを作成した。

#### DCHMの外観比較

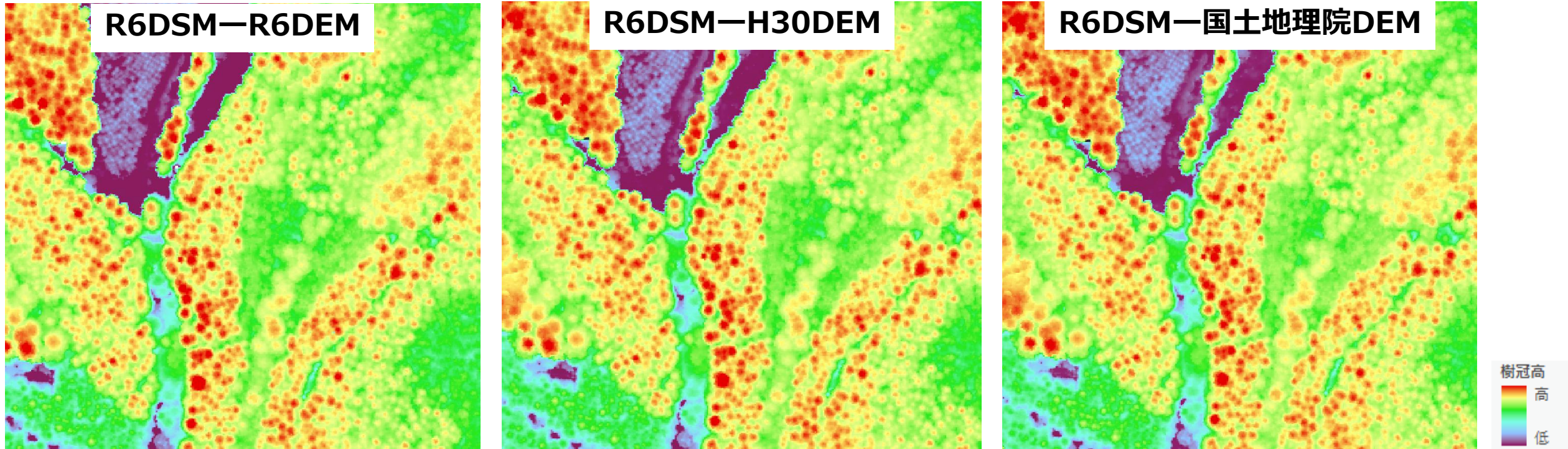


#### <氷見市特徴>

- H30および国土地理院DEMを使用し作成したDCHMについて、R6DEMを使用した場合と比較し樹冠高の相対的な高さやギャップ等が表現できており、外観に大きな差はなかった。

### (3) 航空レーザ測量データを併用した空中写真に由来する樹冠高モデルの作成 DCHMの外観比較

#### DCHMの外観比較



#### <みどり市特徴>

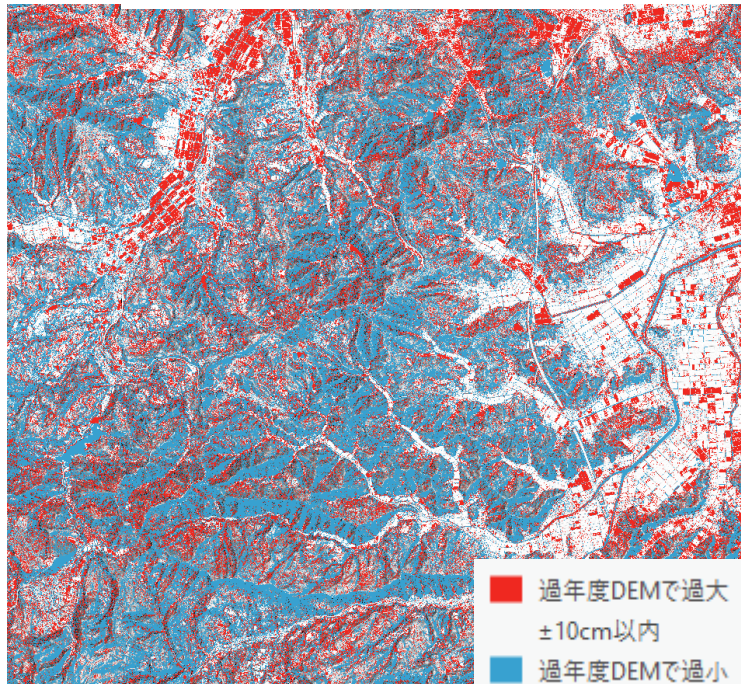
- H30および国土地理院DEMを使用し作成したDCHMについて、R6DEMを使用した場合と比較し樹冠高の相対的な高さやギャップ等が表現できており、外観に大きな差はなかった。また、新植地における幼樹についても表現ができていた。

### (3) 航空レーザ測量データを併用した空中写真に由来する樹冠高モデルの作成 DCHMの外観比較参考：2時期のDEMの比較結果

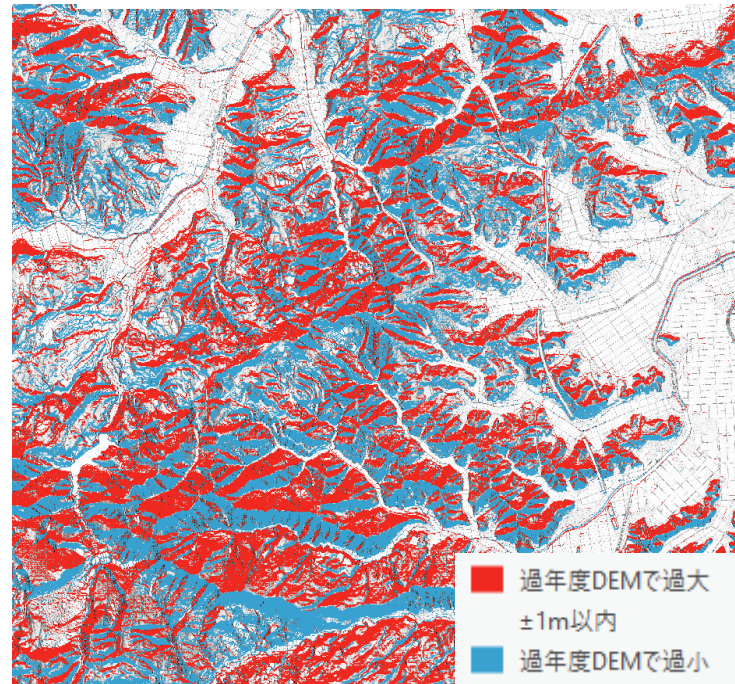
R6DEMとH30DEMおよび国土地理院DEMは、地形に沿った誤差が見られた。これは位置ずれによる誤差と考えられる。国土地理院DEMの誤差の方が大きく、国土地理院DEMは解像度が5mであることも影響していると考えられる。航空レーザ成果については、水平検証を実施しておらず、成果品間で水平位置がずれている可能性が高い。そのため、2時期の航空レーザを比較、扱う際は異方性解析により位置ずれの方向およびずれ量を解析し、補正を実施することを検討する必要がある。

#### DEMの差分結果

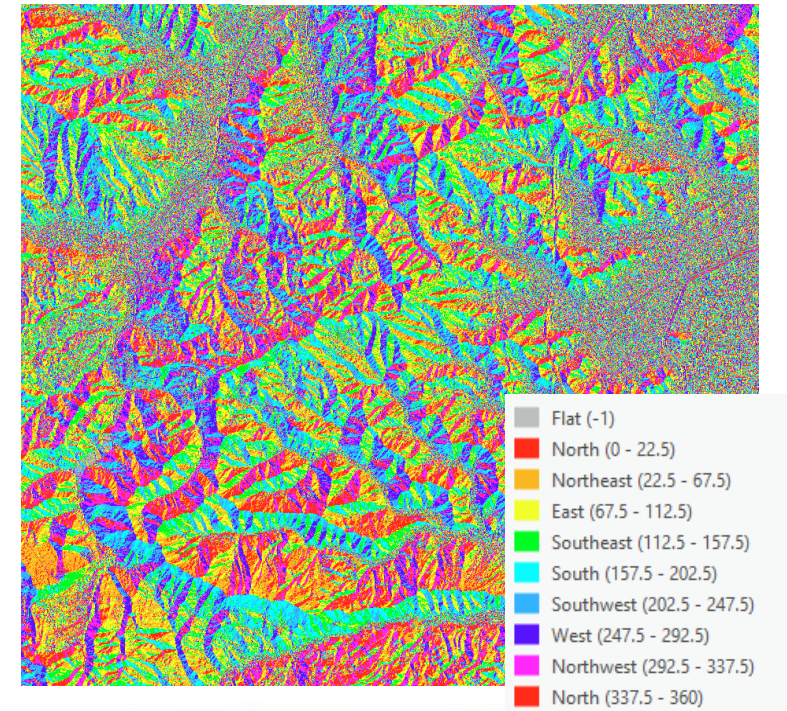
##### R6DEMとH30DEMの差分



##### R6DEMと国土地理院DEMの差分



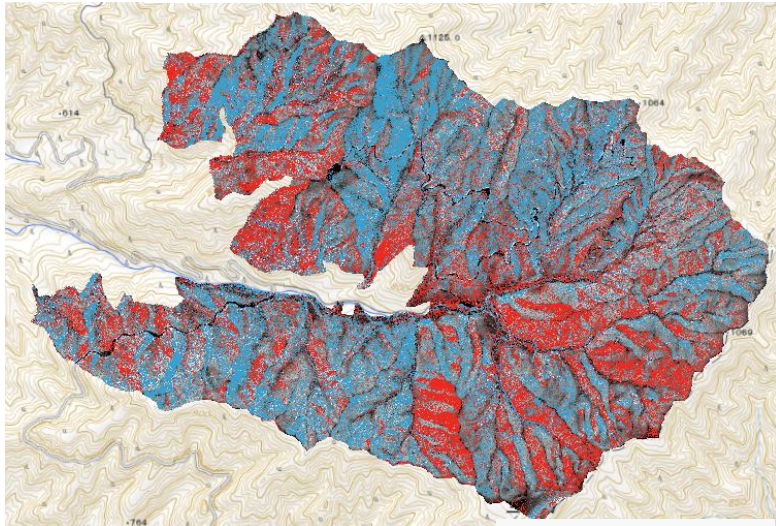
##### R6DEMの方位



### (3) 航空レーザ測量データを併用した空中写真に由来する樹冠高モデルの作成 DCHMの外観比較参考：2時期のDEM差分結果

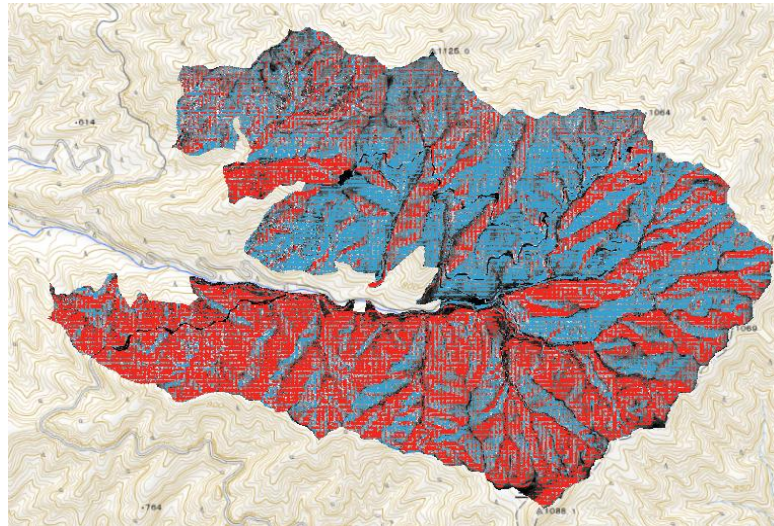
#### DEMの差分結果

R6DEMとH30DEMの差分



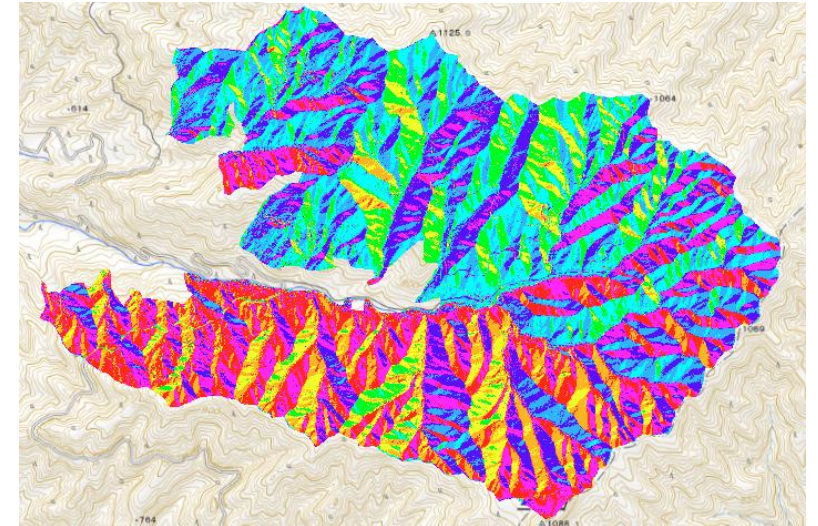
- 過年度DEMで過大 ±10cm以内
- 過年度DEMで過小

R6DEMと国土地理院DEMの差分



- 過年度DEMで過大 ±1m以内
- 過年度DEMで過小

R6DEMの方位



- Flat (-1)
- North (0 - 22.5)
- Northeast (22.5 - 67.5)
- East (67.5 - 112.5)
- Southeast (112.5 - 157.5)
- South (157.5 - 202.5)
- Southwest (202.5 - 247.5)
- West (247.5 - 292.5)
- Northwest (292.5 - 337.5)
- North (337.5 - 360)

### (3) 航空レーザ測量データを併用した空中写真に由来する樹冠高モデルの作成 DCHMのメッシュへの集計結果

作成したDCHMを20mメッシュに集計した。集計方法は、最大値、平均値、90PCT値を用いた。R6航空レーザDCHM集計値を正解データとし、各DCHMをメッシュ単位に集計した結果について、樹種ごとの平均絶対誤差率およびRMSEを算出した。

#### DCHMのメッシュへの集計結果

樹種	メッシュ数	R6航空レーザ			H30DEM									国土地理院DEM								
		樹冠高 (m)			樹冠高 (m)			平均絶対誤差率 (%)			RMSE (m)			樹冠高 (m)			平均絶対誤差率 (%)			RMSE (m)		
		平均値	最大値	90PCT	平均値	最大値	90PCT	平均	最大	90PCT	平均	最大	90PCT	平均値	最大値	90PCT	平均	最大	90PCT	平均	最大	90PCT
スギ	70,550	18.3	29.9	25.5	18.4	29.7	25.5	1.5	1.4	1.1	0.3	0.5	0.4	18.2	29.5	25.4	4.5	3.1	3.3	0.9	1.1	0.9
ヒノキ類	202	14.6	23.4	19.2	14.7	23.3	19.2	1.5	1.8	1.1	0.3	0.5	0.3	14.8	23.3	19.4	5.4	3.9	4.4	0.8	1.1	0.9
マツ類	305	7.5	15.1	11.6	7.6	14.8	11.5	3.1	3.0	2.4	0.2	0.5	0.3	7.6	14.9	11.7	12.8	6.6	7.6	0.8	1.1	0.9
カラマツ	305	17.6	27.8	23.8	17.5	27.5	23.7	1.1	1.3	0.9	0.3	0.5	0.3	17.6	27.6	23.8	2.9	2.4	2.2	0.6	0.8	0.7
その他針葉樹	155	18.2	27.7	23.7	18.3	27.6	23.7	1.3	1.4	1.3	0.3	0.5	0.3	18.8	28.0	24.2	4.9	3.0	3.4	0.9	0.9	0.9
その他L	83,123	13.4	23.0	18.8	13.5	22.9	18.8	2.6	2.1	2.0	0.3	0.6	0.4	13.3	22.6	18.6	8.5	5.3	6.0	1.0	1.4	1.2
タケ	17,364	14.2	23.2	18.7	14.3	23.0	18.6	1.9	2.2	1.7	0.3	0.7	0.4	14.2	22.8	18.5	6.4	4.8	5.1	0.9	1.3	1.1
伐採跡地	2,109	1.5	9.9	4.5	1.5	9.8	4.7	62.0	17.1	91.3	0.3	0.9	0.6	1.3	9.5	4.5	187.9	25.9	121.6	0.7	1.4	0.9
その他	17,756	2.7	13.2	7.5	2.7	12.9	7.5	32.4	12.5	30.2	0.5	0.9	0.7	2.5	12.7	7.3	71.1	17.6	56.0	0.7	1.3	1.0

#### <氷見市結果>

- H30DEMを用いた場合のDCHMの平均誤差率はスギ、ヒノキで1.5%であった。
- 国土地理院DEMを用いた場合のDCHMの平均誤差率はスギ、ヒノキで4~5%台であった。
- 過年度撮影した時点から崩壊等の地形の変化がない場合は、樹冠高の更新に過年度DEMや国土地理院DEMを使用することが可能と考えられる。ただし、航空レーザ成果間で位置ずれが発生する可能性があるため、位置精度を検証し、位置ずれが確認された場合は、位置の補正の実施を検討する必要がある。

### (3) 航空レーザ測量データを併用した空中写真に由来する樹冠高モデルの作成 DCHMのメッシュへの集計結果

#### DCHMのメッシュへの集計結果

樹種	メッシュ数	R6航空レーザ			H30DEM									国土地理院DEM								
		樹冠高			樹冠高			平均絶対誤差率 (%)			RMSE (m)			樹冠高			平均絶対誤差率 (%)			RMSE (m)		
		平均値	最大値	90PCT	平均値	最大値	90PCT	平均	最大	90PCT	平均	最大	90PCT	平均値	最大値	90PCT	平均	最大	90PCT	平均	最大	90PCT
スギ	1,669	22.9	30.7	26.7	22.8	30.6	26.7	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.2	22.7	30.5	26.6	1.4	1.5	1.2	0.4	0.6	0.4
ヒノキ	1,510	21.4	26.6	23.9	21.3	26.6	23.9	0.6	0.6	0.6	0.2	0.2	0.2	21.4	26.6	23.9	1.3	1.4	1.1	0.4	0.5	0.4
マツ	490	21.3	28.2	25.0	21.4	28.2	25.0	0.6	0.6	0.5	0.2	0.2	0.2	21.5	28.2	25.1	1.7	1.5	1.4	0.4	0.5	0.4
その他針葉樹	14	28.4	35.8	33.2	28.5	35.9	33.4	0.6	0.4	0.4	0.2	0.2	0.1	28.3	35.4	32.9	0.8	1.2	1.2	0.3	0.5	0.4
広葉樹	5,146	21.6	28.2	25.2	21.7	28.2	25.3	0.8	0.7	0.7	0.2	0.3	0.2	21.7	28.0	25.2	1.9	2.0	1.7	0.5	0.8	0.6
新植地	112	2.4	12.8	6.8	2.4	12.8	6.9	13.2	4.1	6.7	0.1	0.3	0.2	2.4	12.9	7.0	33.2	7.6	15.6	0.3	0.6	0.5
その他	34	9.0	23.5	17.6	9.0	23.5	17.7	2.6	1.7	4.3	0.2	0.3	0.2	8.9	23.4	17.6	9.5	3.2	8.7	0.4	0.6	0.4

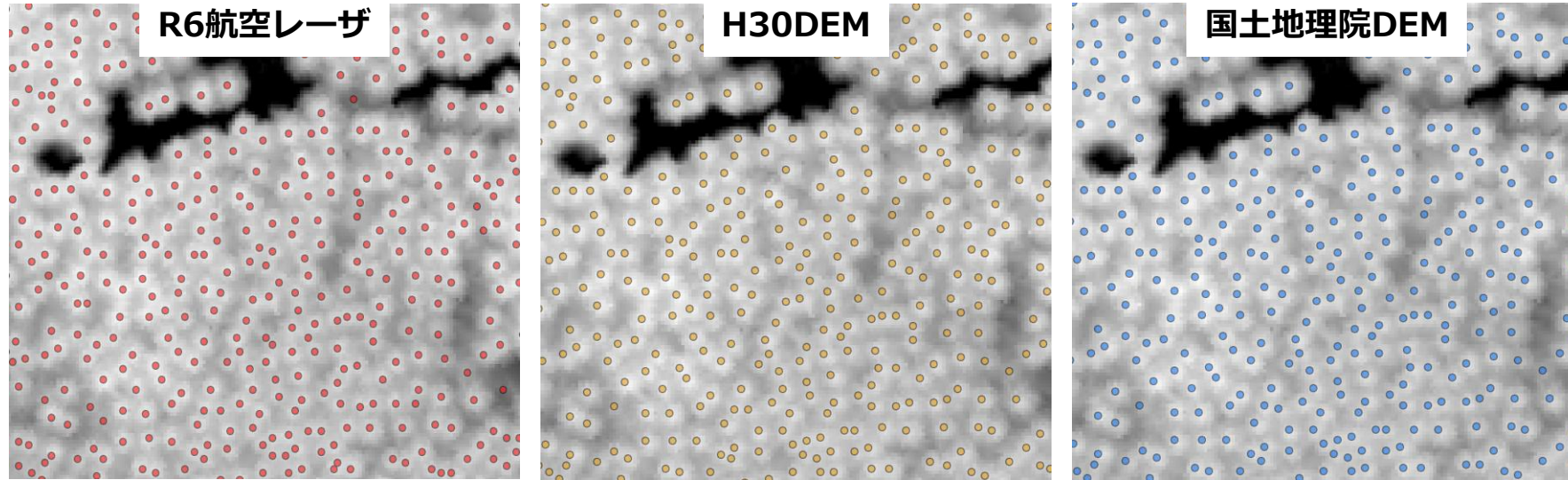
#### <みどり市結果>

- H30DEMを用いた場合のDCHMの平均誤差率は立木地においては1%以内であった。
- 国土地理院DEMを用いた場合のDCHMの平均誤差率は立木地において1~2%程度であった。
- 過年度撮影した時点から崩壊等の地形の変化がない場合は、樹冠高の更新に過年度DEMや国土地理院DEMを使用することが可能と考えられる。ただし、航空レーザ成果間で位置ずれが発生する可能性があるため、位置精度を検証し、位置ずれが確認された場合は、位置の補正の実施を検討する必要がある。

## (4) 単木ポイントの作成

## 単木ポイントの外観比較・メッシュへの集計結果

## 樹頂点の外観比較（背景R6航空レーザDCHM）



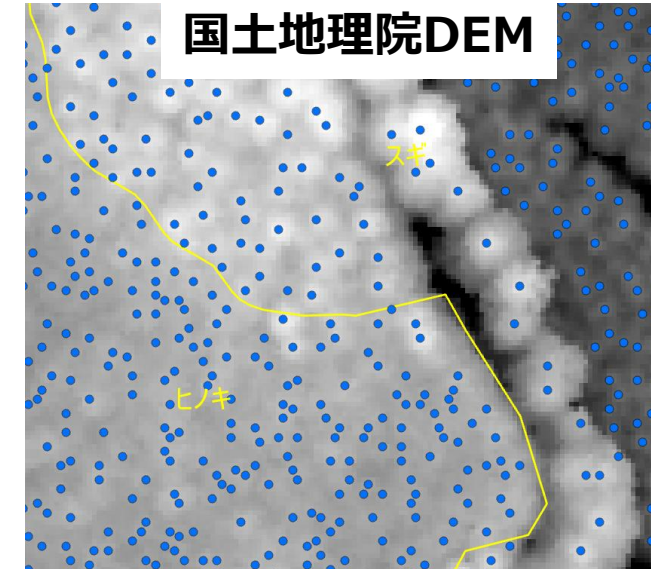
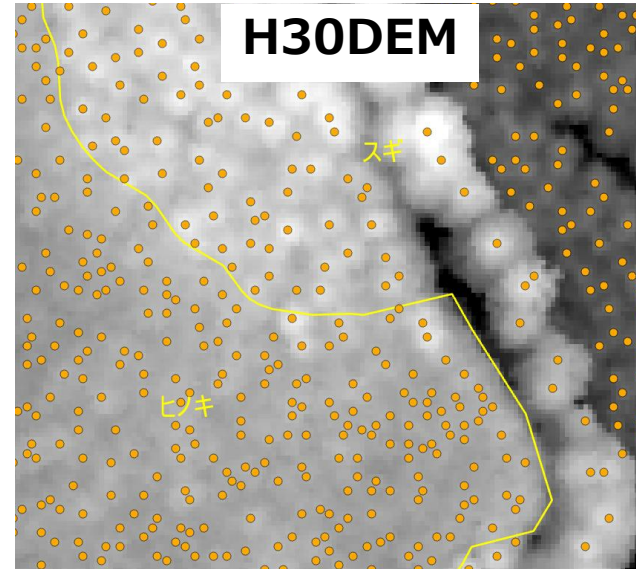
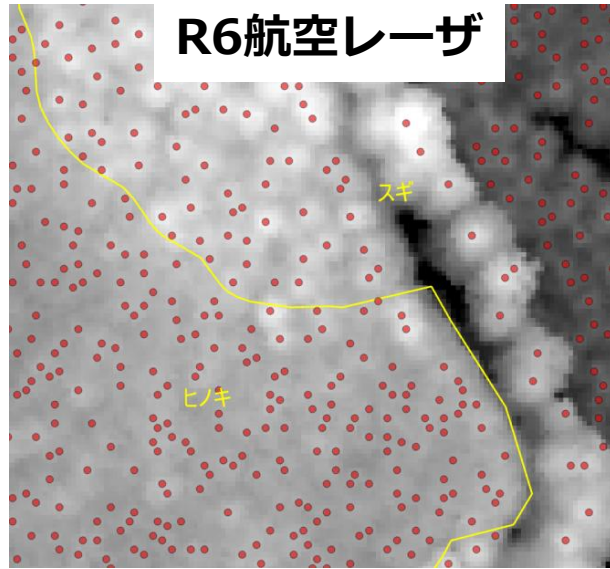
樹種	メッシュ数	H30DEM								国土地理院DEM							
		平均絶対誤差率				RMSE (m)				平均絶対誤差率				RMSE (m)			
		本数	平均	最大	90PCT	本数	平均	最大	90PCT	本数	平均	最大	90PCT	本数	平均	最大	90PCT
スギ	68,771	20.0	5.0	1.6	2.0	4.6	1.8	0.9	1.0	20.7	6.3	3.3	3.6	4.7	2.0	1.3	1.4
ヒノキ	199	31.4	3.5	4.2	4.4	9.8	0.8	1.7	1.5	32.0	6.2	6.4	6.5	10.1	1.2	2.0	1.8
マツ	302	39.5	4.5	3.9	4.6	15.0	0.7	1.1	1.1	41.3	8.5	6.9	8.4	15.4	1.1	1.4	1.6
カラマツ	302	40.2	4.7	1.6	2.4	11.5	1.3	0.7	1.0	41.8	6.2	2.4	3.6	12.0	1.9	0.9	1.3

## &lt;氷見市特徴&gt;

- H30DEM、国土地理院DEMを使用したDCHMから作成した樹頂点数はR6航空レーザより過少であったが、相対的な樹頂点数の傾向は一致している（p41）。樹高については誤差率が6～8%程度であった。過年度および国土地理院DEMを活用し樹頂点を作成する際は航空レーザよりも過少に樹木本数が推定されることに留意し解析することで、樹頂点および樹高データの更新に活用できる可能性がある。
- 国土地理院DEMについて、氷見市においては航空レーザ由来の5mDEMが整備されていたが、空中写真や等高線によるDEMが整備されている範囲については誤差が大きくなる可能性があり、使用する際は作成仕様を確認する必要がある。また、今後検証の余地があると考えられる。

## (4) 単木ポイントの作成 単木ポイントの外観比較・メッシュへの集計結果

### 樹頂点の外観比較（背景R6航空レーザDCHM）



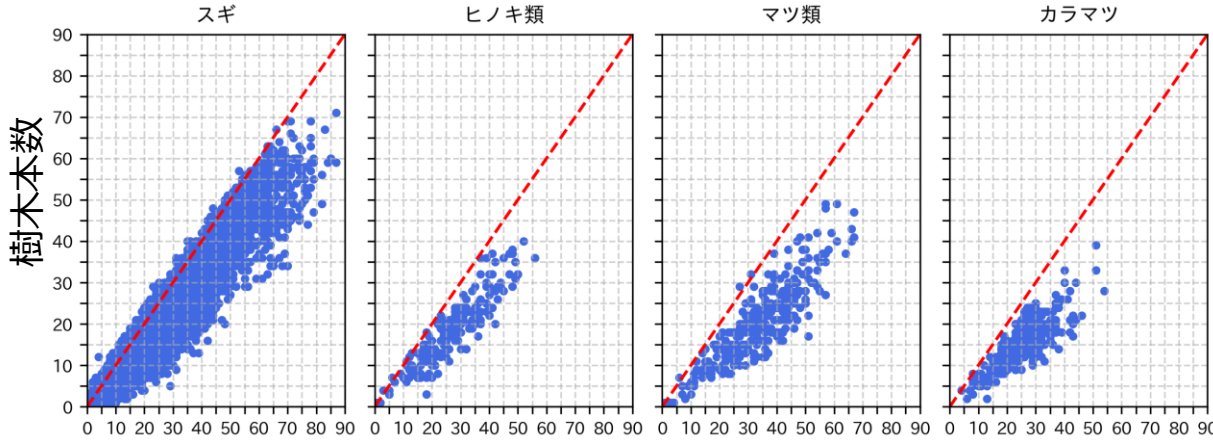
樹種	メッシュ数	H30DEM								国土地理院DEM							
		平均絶対誤差率				RMSE (m)				平均絶対誤差率				RMSE (m)			
		本数	平均	最大	90PCT	本数	平均	最大	90PCT	本数	平均	最大	90PCT	本数	平均	最大	90PCT
スギ	1,661	5.5	0.9	0.6	0.8	1.8	0.4	0.2	0.4	6.5	1.5	1.6	1.5	2.1	0.6	0.7	0.6
ヒノキ	1,499	5.9	0.8	0.7	0.8	2.4	0.3	0.3	0.3	7.1	1.3	1.4	1.3	2.9	0.4	0.5	0.4
マツ	486	6.1	0.9	0.7	0.9	2.2	0.3	0.3	0.4	7.9	1.7	1.5	1.7	2.8	0.5	0.6	0.6

### <みどり市特徴>

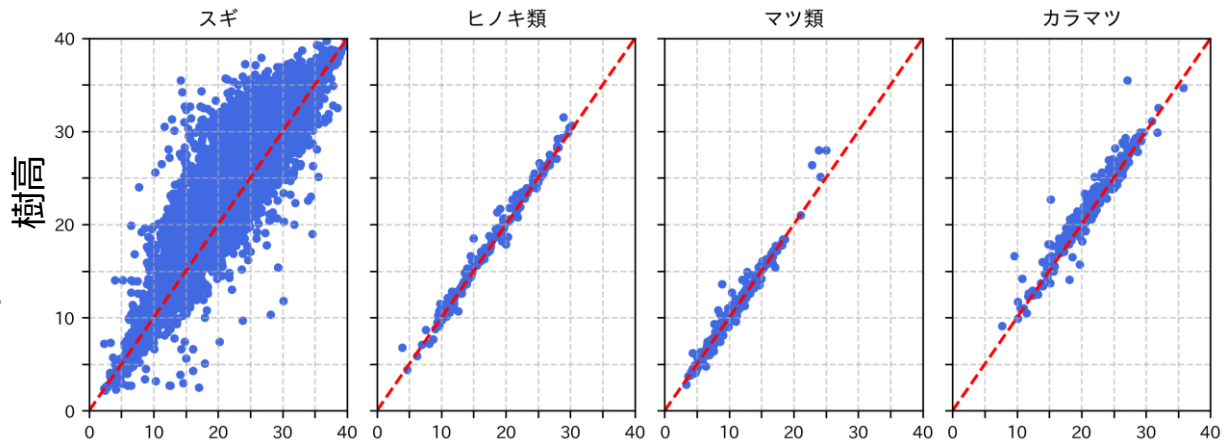
- H30DEM、国土地理院DEMを使用したDCHMから作成した樹頂点数、樹高はR6航空レーザと概ね一致していた（p42）。
- 国土地理院DEMについて、みどり市においては航空レーザ由来の5mDEMが整備されていたが、空中写真や等高線によるDEMが整備されている範囲については誤差が大きくなる可能性があり、使用する際は作成仕様を確認する必要がある。また、今後検証の余地があると考えられる。

(4) 単木ポイントの作成  
 単木ポイントのメッシュへの集計結果参考：樹種ごとの比較

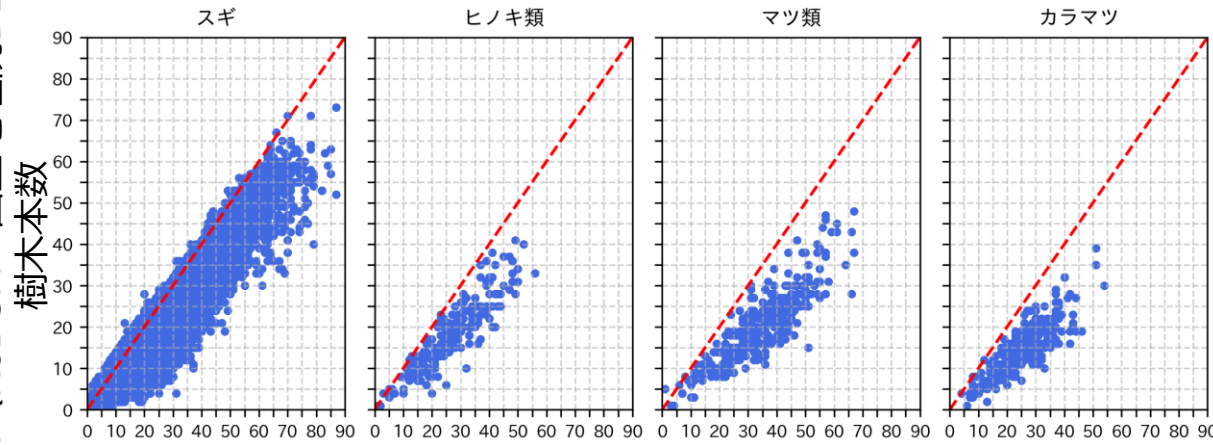
DCHM (R6DSM-H30DEM)



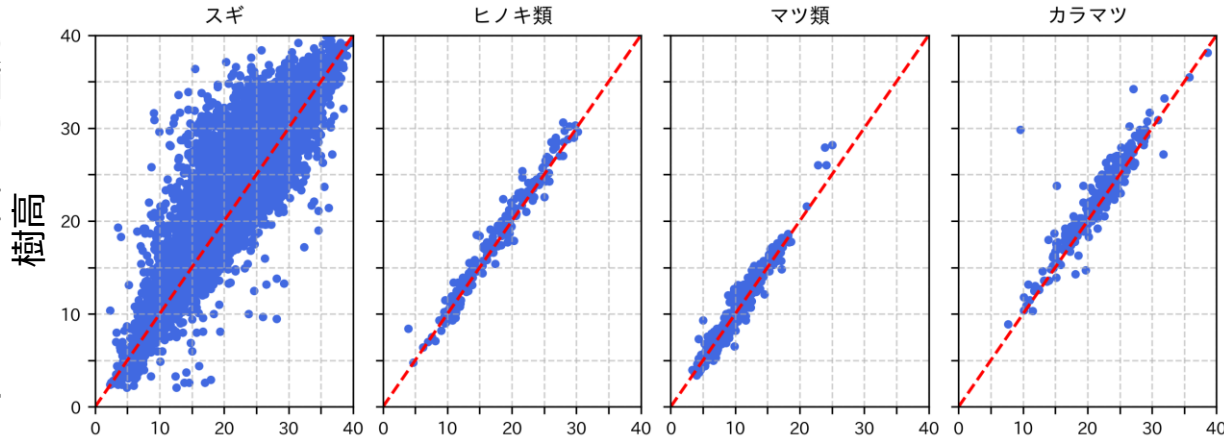
DCHM (R6DSM-H30DEM)



DCHM (R6DSM-国土地理院DEM)



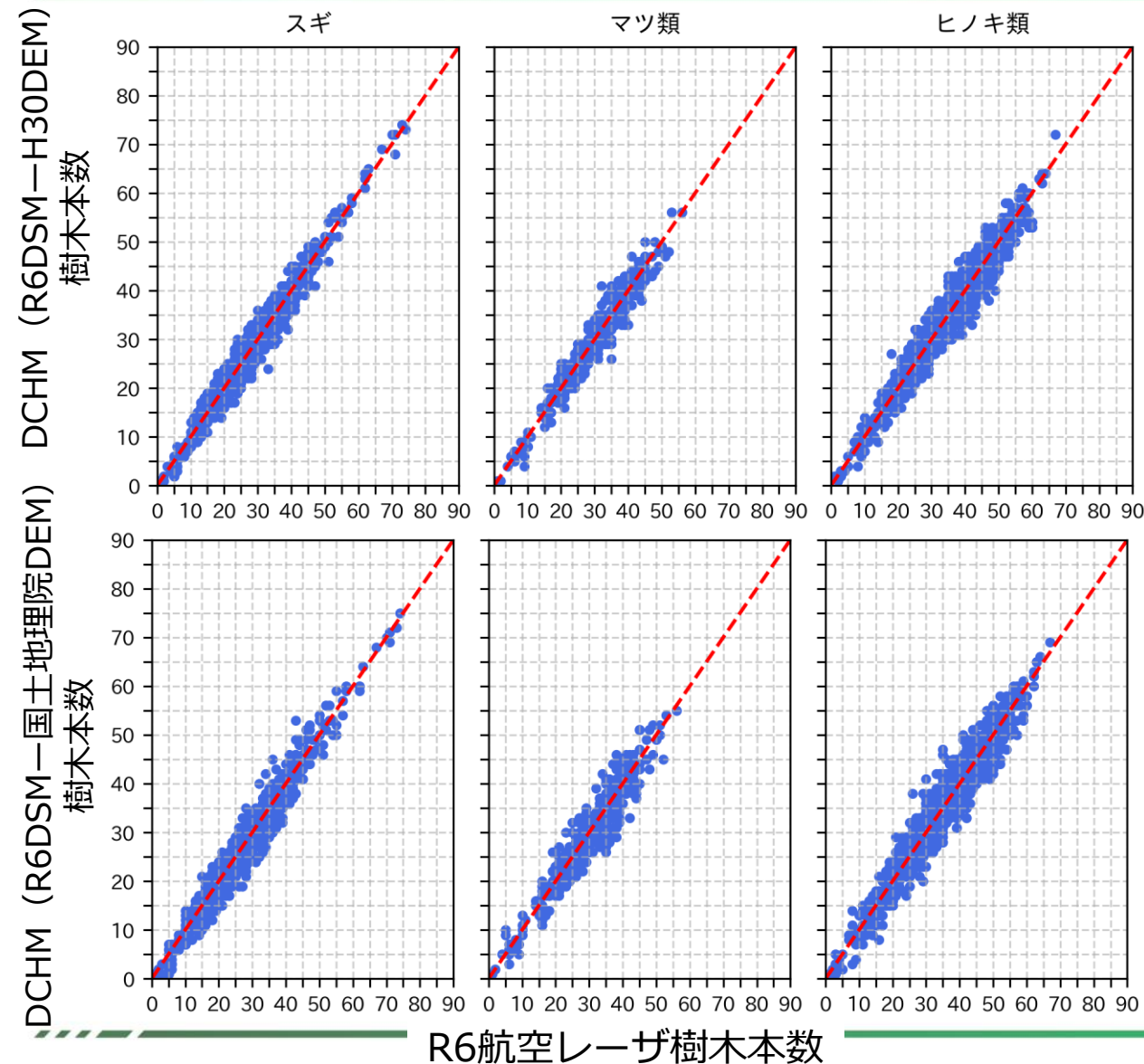
DCHM (R6DSM-国土地理院DEM)



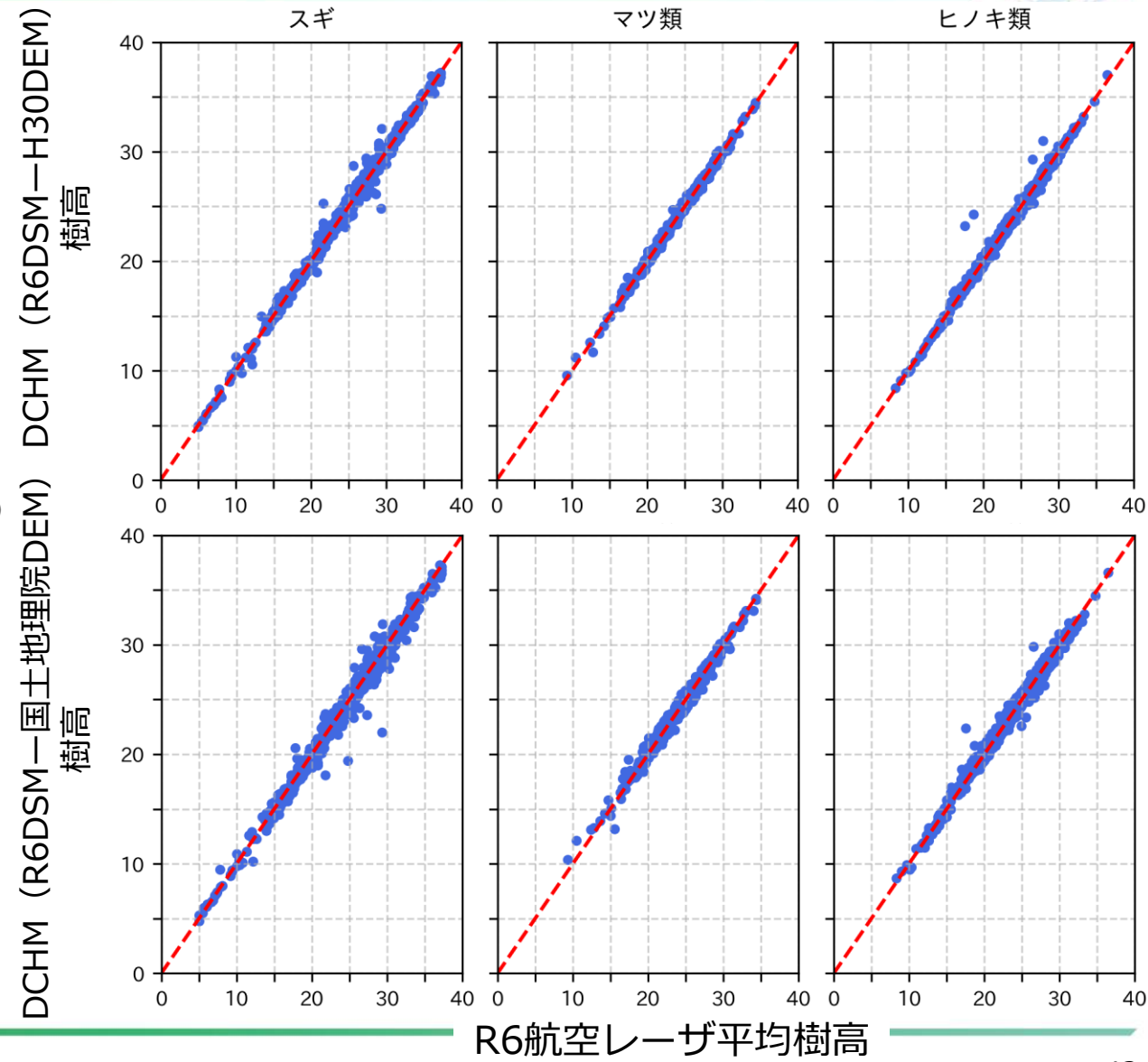
R6航空レーザ樹木本数

R6航空レーザ平均樹高

(4) 単木ポイントの作成  
 単木ポイントのメッシュへの集計結果参考：樹種ごとの比較



R6航空レーザ樹木本数



R6航空レーザ平均樹高

# ダウンサイジングした樹冠高モデルの検証結果

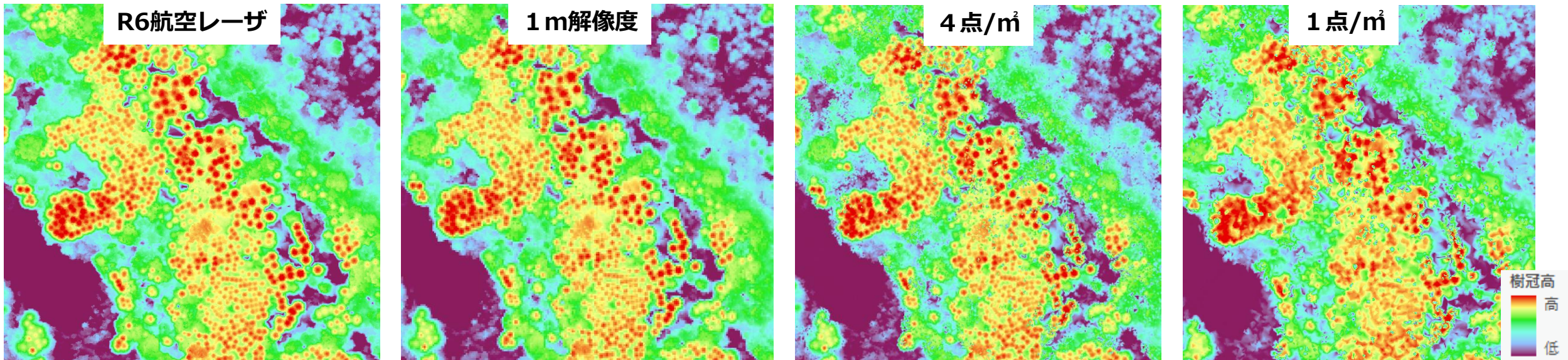
## (5) ダウンサイジングした樹冠高モデルの作成 DCHMの外観比較

森林情報の更新方法として、DCHMの解像度を下げた場合の精度を検証するため、R6航空レーザから作成した50cm解像度DCHMをリサンプリング処理し、地上解像度1mのDCHMを作成した。

また、航空レーザの点密度を下げたDSMを森林情報の更新に活用した際の精度を検証するため、R6航空レーザを点密度4点、1点に間引き、DCHMを作成した。間引きについては以下の手順で実施した。

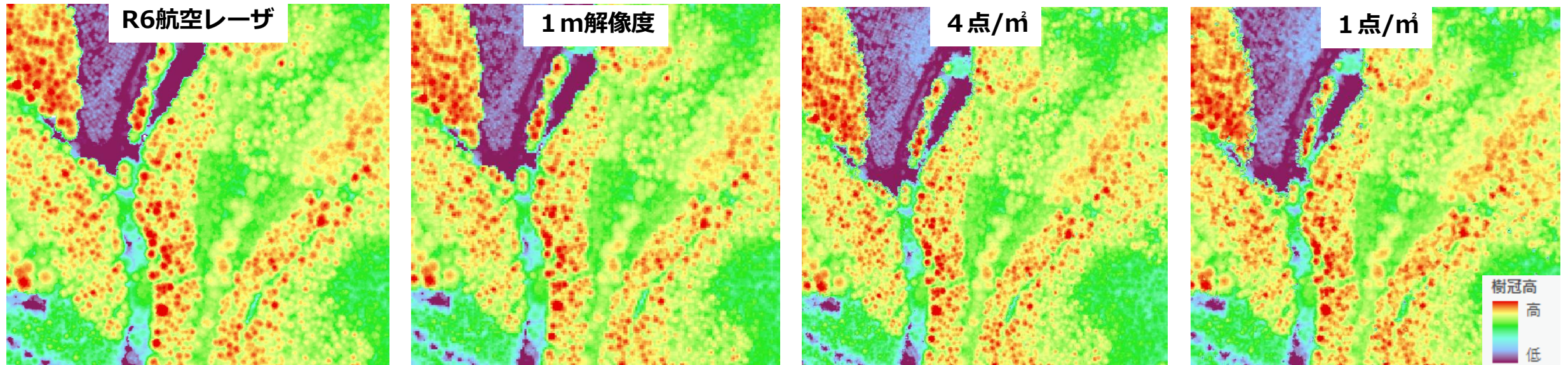
- ① R6航空レーザのオリジナルデータから、ファーストパルスを抽出
- ② ファーストパルスの点密度が4点および1点となるように間引き処理を実施
- ③ ②からDSMを作成し、高密度航空レーザ用いたDEMを差し引くことで、DCHMを作成

### DCHMの外観比較



## (5) ダウンサイジングした樹冠高モデルの作成 DCHMの外観比較

### DCHMの外観比較



### <DCHMの特徴（氷見市・みどり市共通）>

- 点密度を間引いたDCHMについては樹冠高の相対的な高さは一致しているが、点密度が少ないほどギャップ部分の境界や樹冠が不明瞭になり、ノイズが大きくなった。
- 1m解像度のDCHMについては、外観はほとんど変わらなかった。



## (5) ダウンサイジングした樹冠高モデルの作成 DCHMのメッシュへの集計結果

作成したDCHMを20mメッシュに集計した。集計方法は、最大値、平均値、90PCT値を用いた。R6航空レーザDCHMを正解データとし、各DCHMをメッシュ単位に集計した結果について、樹種ごとの平均絶対誤差率およびRMSEを算出した。

### 1mDCHMのメッシュへの集計結果

#### 氷見市

樹種	メッシュ数	1mDCHM								
		樹冠高 (m)			平均絶対誤差率 (%)			RMSE (m)		
		平均値	最大値	90PCT	平均	最大	90PCT	平均	最大	90PCT
スギ	70,550	18.3	29.5	25.4	0.9	1.3	0.7	0.2	0.6	0.3
ヒノキ類	202	14.6	23.0	19.2	0.7	1.6	0.8	0.1	0.5	0.2
マツ類	305	7.5	14.8	11.5	1.5	2.4	1.1	0.1	0.6	0.2
カラマツ	305	17.6	27.5	23.8	0.7	1.2	0.5	0.2	0.5	0.2
その他針葉樹	155	18.2	27.4	23.6	0.7	1.3	0.8	0.2	0.5	0.2
その他L	83,123	13.4	22.7	18.7	1.2	1.8	1.1	0.2	0.7	0.3
タケ	17,364	14.2	22.8	18.6	1.0	1.9	1.1	0.2	0.7	0.3
伐採跡地	2,109	1.5	9.5	4.4	5.0	9.3	6.3	0.1	1.0	0.4
その他	17,756	2.7	12.7	7.4	5.2	6.4	6.7	0.2	1.1	0.5

#### みどり市

樹種	メッシュ数	1mDCHM								
		樹冠高 (m)			平均絶対誤差率 (%)			RMSE (m)		
		平均値	最大値	90PCT	平均	最大	90PCT	平均	最大	90PCT
スギ	1,669	22.9	30.3	26.7	0.3	1.1	0.3	0.1	0.5	0.1
ヒノキ	1,510	21.4	26.4	23.9	0.3	1.0	0.3	0.1	0.4	0.1
マツ	490	21.4	27.9	25.0	0.3	0.9	0.3	0.1	0.4	0.1
その他針葉樹	14	28.3	35.6	33.1	0.5	0.7	0.4	0.1	0.3	0.2
広葉樹	5,146	21.6	27.9	25.2	0.3	1.0	0.4	0.1	0.4	0.2
新植地	112	2.4	12.3	6.8	2.6	6.0	3.5	0.1	1.0	0.5
その他	34	9.0	22.8	17.5	5.3	3.7	2.1	0.2	2.1	0.3

### <解像度を下げたデータについて>

- 解像度を50cmから1mに下げたDCHMについて、50cm解像度のDCHMとの誤差率は立木地においてみどり市で0.5%以内、氷見市で広葉樹、マツ林以外は1%以内となり、誤差率が小さかった。
- 本業務で作成した1mDCHMは50cmDCHMをリサンプリング処理して作成しているため、誤差率が小さかったと考えられるが、点密度1点の仕様で作成された1mDCHMは誤差が発生する可能性があるため、計測点密度を確認し使用する必要がある。

## (5) ダウンサイジングした樹冠高モデルの作成 DCHMのメッシュへの集計結果

### 点密度を下げたDCHMのメッシュへの集計結果

#### 氷見市

樹種	メッシュ数	R6航空レーザ			点密度4点/m <sup>2</sup>									点密度1点/m <sup>2</sup>								
		樹冠高 (m)			樹冠高 (m)			平均絶対誤差率 (%)			RMSE (m)			樹冠高 (m)			平均絶対誤差率 (%)			RMSE (m)		
		平均値	最大値	90PCT	平均値	最大値	90PCT	平均	最大	90PCT	平均	最大	90PCT	平均値	最大値	90PCT	平均	最大	90PCT	平均	最大	90PCT
スギ	70,550	18.3	29.9	25.5	17.3	29.8	25.2	6.2	0.9	1.4	1.3	0.8	0.6	17.1	29.4	24.8	7.3	2.0	3.0	1.5	0.9	1.0
ヒノキ類	202	14.6	23.4	19.2	14.1	23.4	19.0	3.5	1.1	1.9	0.7	0.4	0.6	14.0	23.1	18.8	4.5	1.9	3.0	0.9	0.6	0.9
マツ類	305	7.5	15.1	11.6	7.1	15.1	11.3	6.4	2.0	3.0	0.6	0.4	0.6	6.9	14.7	10.9	8.6	4.2	6.1	0.8	0.9	1.0
カラマツ	305	17.6	27.8	23.8	15.9	27.7	23.3	9.8	0.8	2.4	1.8	0.5	0.8	15.6	27.3	22.8	11.6	2.0	4.4	2.1	0.7	1.3
その他針葉樹	155	18.2	27.7	23.7	17.4	27.7	23.5	5.4	1.1	1.5	1.1	0.3	0.5	17.2	27.3	23.2	6.7	1.7	2.3	1.4	0.6	0.7
その他L	83,123	13.4	23.0	18.8	11.9	22.9	17.9	11.3	1.8	5.0	1.8	1.0	1.1	11.5	22.5	17.5	14.1	3.3	7.5	2.2	1.1	1.6
タケ	17,364	14.2	23.2	18.7	13.7	23.1	18.3	4.5	1.6	2.7	0.7	0.6	0.7	13.5	22.7	18.0	6.0	3.0	4.5	1.0	1.0	1.1
伐採跡地	2,109	1.5	9.9	4.5	1.3	9.9	4.0	27.5	19.9	38.1	0.5	1.0	1.6	1.3	9.5	3.7	26.9	19.6	40.5	0.6	1.3	2.0
その他	17,756	2.7	13.2	7.5	2.5	13.1	6.9	16.6	13.2	25.0	0.5	1.5	1.4	2.5	12.7	6.6	17.8	14.6	30.1	0.7	1.8	1.8

#### みどり市

樹種	メッシュ数	R6航空レーザ			点密度4点/m <sup>2</sup>									点密度1点/m <sup>2</sup>								
		樹冠高 (m)			樹冠高 (m)			平均絶対誤差率 (%)			RMSE (m)			樹冠高 (m)			平均絶対誤差率 (%)			RMSE (m)		
		平均値	最大値	90PCT	平均値	最大値	90PCT	平均	最大	90PCT	平均	最大	90PCT	平均値	最大値	90PCT	平均	最大	90PCT	平均	最大	90PCT
スギ	1,669	22.9	30.7	26.7	22.4	30.4	26.4	2.1	0.9	1.2	0.2	0.1	0.1	22.3	30.1	26.2	2.8	2.1	2.1	0.4	0.6	0.3
ヒノキ	1,510	21.4	26.6	23.9	21.1	26.4	23.7	1.5	0.9	1.1	0.1	0.1	0.1	21.0	26.2	23.5	2.0	1.8	1.7	0.2	0.4	0.2
マツ	490	21.3	28.2	25.0	20.9	28.0	24.6	2.2	0.8	1.4	0.3	0.1	0.1	20.7	27.7	24.4	3.1	1.7	2.2	0.5	0.3	0.3
その他針葉樹	14	28.4	35.8	33.2	27.9	35.7	33.0	1.7	0.4	0.9	0.2	0.0	0.1	27.8	35.5	32.9	2.5	0.9	1.3	0.4	0.1	0.2
広葉樹	5,146	21.6	28.2	25.2	21.3	28.0	25.0	1.9	0.8	1.1	0.2	0.1	0.1	21.1	27.8	24.8	2.7	1.5	1.8	0.4	0.3	0.3
新植地	112	2.4	12.8	6.8	2.2	12.6	6.4	15.8	5.1	11.5	0.1	0.2	0.6	2.1	12.3	6.1	20.6	9.8	16.7	0.2	1.1	1.7
その他	34	9.0	23.5	17.6	8.6	23.2	17.2	6.0	1.4	4.2	0.2	0.4	0.3	8.4	22.7	16.9	9.0	4.7	11.8	0.5	4.1	1.2

## (5) ダウンサイジングした樹冠高モデルの作成 DCHMのメッシュへの集計結果

氷見市

みどり市

### <点密度を下げたDCHMのメッシュへの集計結果について>

- 点密度4点、1点に間引いたデータと間引き前のデータを比較した結果、平均樹冠高が氷見市では約1m、みどり市では約50cm低くなった（p47 樹冠高平均値参照）。点密度が下がると、樹木の最も高い箇所当たる点が増えるため、平均樹冠高が低くなると考えられる。
- 点密度4点、1点に間引いたデータを比較した結果、1点の方がDCHMの外観として樹冠が明瞭に見えなくなるものの、両者の間引き前のデータとの誤差率は大きく変わらなかった。森林の樹冠高情報のみの更新を目的とする場合は1点程度の低密度航空レーザも活用可能と考えられる。
- ただし、本業務での点密度の間引きはランダムに実施しており、実際の低密度航空レーザデータとは異なる可能性があることに留意する必要がある。

# 評価検証 空中写真解析のまとめ



## (6) 評価検証 空中写真解析のまとめ

本業務で作成した樹冠高モデルの成果の検証目的について再度以下に示す。

番号	項目	樹冠高モデル		検証目的	検証内容
		DSM	DEM		
①	航空レーザ	R6航空レーザ	R6航空レーザ	樹冠高、樹頂点データを本検証の正解データとして使用	
②	空中写真	空中写真 (R6・R4)	R6航空レーザ	森林情報の更新方法として、空中写真由来のDSMを活用した場合の精度を検証	①の樹冠高および樹頂点との比較
③	航空レーザ (表層のみ)	R6航空レーザ	H30航空レーザ 国土地理院レーザ	森林情報の更新方法として、航空レーザでDSMのみを更新した場合の精度を検証	
④	解像度のダウンサイジング	①の樹冠高モデルの解像度を1mに変換		森林情報の更新方法として、解像度を下げた場合の精度を検証	
⑤	点密度のダウンサイジング	R6航空レーザを間引いたデータ	R6航空レーザ	森林情報の更新方法として、点密度を下げた場合の精度を検証	①の樹冠高との比較



## (6) 評価検証

# 空中写真解析のまとめ：樹冠高モデルの比較

R6 航空レーザから作成した結果を正解データとした場合の精度検証結果を以下に示す。

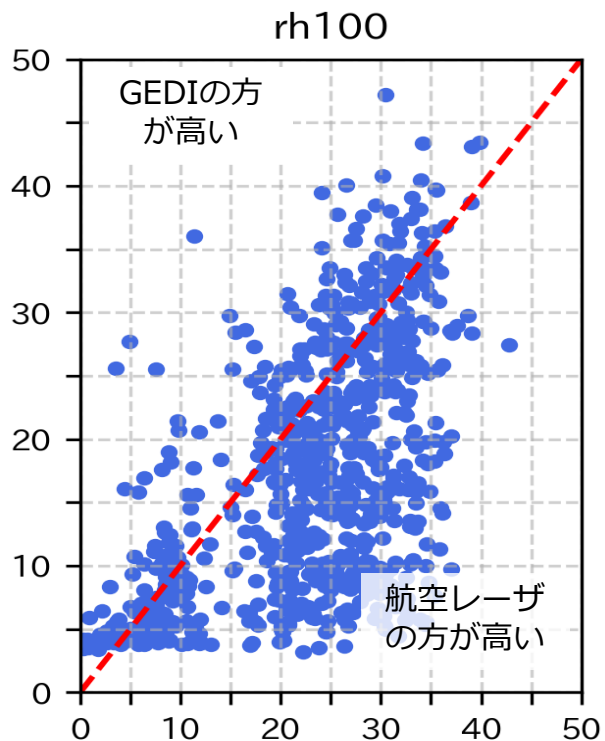
使用データ	氷見市			みどり市			高点密度航空レーザの更新と比較したコスト	留意点
	樹冠高 平均絶対誤差率	本数 平均絶対誤差率	樹高 平均絶対誤差率	樹冠高 平均絶対誤差率	本数 平均絶対誤差率	樹高 平均絶対誤差率		
② 空中写真	R6空中写真(高ラップ)	—	—	—	立木地：2%以内	スギ：19% ヒノキ：39% 位置精度は高いが過小	スギ、ヒノキ：2%	<ul style="list-style-type: none"> <li>高圧電線箇所は高さのエラーとなる</li> <li>航空レーザとの高さ方向の誤差が数10cm発生する可能性がある</li> <li>広葉樹は落葉期のため、正確な評価はできていない</li> </ul>
	R6空中写真(低ラップ)	スギ：11%	スギ：91% 位置精度が低く過大	スギ：8%	—	—	—	
	R4固定資産空中写真	スギ：16%	スギ：107% 位置精度が低く過大	スギ：8%	スギ、ヒノキ：5~7%	スギ：58% ヒノキ：23% 位置精度が低く過大	スギ：5% ヒノキ：4%	
③ 表層高のみ更新	過年度DEM	スギ：2%	スギ：20%	スギ：5%	立木地：1%以内	スギ、ヒノキ：6%	スギ、ヒノキ：1%	<ul style="list-style-type: none"> <li>航空レーザ成果間の位置ずれが発生する可能性がある</li> <li>国土地理院DEMについては、作成仕様（航空レーザ、空中写真、等高線）を確認する必要がある</li> </ul>
	国土地理院DEM	スギ：5%	スギ：21%	スギ：6%	立木地：2%以内	スギ、ヒノキ：7%	スギ、ヒノキ：1.5%	
④ 解像度ダウンサイジング	立木地：1~2%以内	—	—	立木地：0.5%以内	—	—	—	—
⑤ 点密度ダウンサイジング	1点：スギ8% 4点：スギ7%	—	—	1点：スギ3% 4点：スギ2.5%	—	—	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>点の間引き方法が実際の点密度と異なる</li> <li>点密度が下がるほど推定樹高が低くなる</li> </ul>



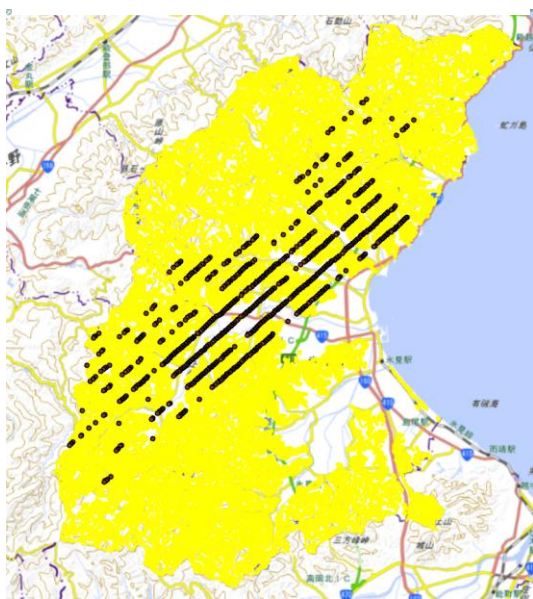
## (6) 評価検証

# 空中写真解析のまとめ参考：衛星LiDARとの樹冠高データの比較

衛星ライダーであるGEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation) のR6以降のデータを富山県氷見市の対象エリアで収集し、樹冠高データの精度検証を行った。GEDIは、フットプリント直径が約25mのフルウェーブフォームLiDARである。樹冠高は、各フットプリント内で検出された地表面を基準点(ゼロ)とし、その上部に存在する樹木の垂直分布を、1%から100%までのパーセンタイルで示す相対的な高さ(RH: Relative Height)として解析されている。氷見市の解析範囲においてRH100(最大高)のデータを収集し、R6航空レーザの最大値と比較した。



収集したGEDIデータの分布



- 航空レーザDCHMの最大値とGEDIのRH100の精度検証を行った結果、平均絶対誤差率は53%、RMSEは24.4mであった。
- GEDIのRH100の値は航空レーザDCHMの最大値よりも過小であることが多かった。フットプリントが25mと大きく、フットプリント内の真の最大樹高(DCHM最大値)を十分に推定できていないと考えられる。
- また、日本国内でデータ分布に偏りがあり、みどり市の本業務対象地においてはデータ取得ができなかった。今後、JAXAが打ち上げ予定のMOLI (Multi-footprint Observation Lidar and Imager) とGEDIを併用することで、日本国内の衛星LiDARの観測頻度が向上する可能性がある。
- ただし、現状の衛星LiDARデータでは航空レーザと同等の空間スケールでの森林の高さ情報の算出は困難である。フットプリント径がより小さな次世代の衛星ライダーが開発・運用されれば、森林構造のより詳細な解析が可能となり、森林情報の更新への活用が期待される。



## (6) 評価検証

### 空中写真解析のまとめ参考：衛星画像と空中写真の比較

「令和6年度森林資源調査手法の複合利用に関する評価検証委託事業」において、栃木県佐野市の25km<sup>2</sup>の範囲を対象に、Maxar、BlackSky、Satellogicの3種類の衛星画像から作成したDCHMと航空レーザDCHMとの比較検証を実施した。※詳細な解析結果および評価については報告書を参照。

#### <衛星画像：10mメッシュごとの98PCT値の差分平均 (m) >

	スギ	ヒノキ	広葉樹
MaxarDSM-航空レーザDEM	1.65	1.27	1.14
BlackSkyDSM-航空レーザDEM	0.77	1.1	0.06
SatellogicDSM-航空レーザDEM	1.39	1.34	0.74

#### <空中写真：20mメッシュごとの90PCT値の差分平均 (m) >

		スギ	ヒノキ	広葉樹
みどり市	R6空中写真DSM-R6航空レーザDEM	-0.07	0.16	-0.11
	R4空中写真DSM-R6航空レーザDEM	-0.94	-0.73	-7.94
氷見市	R6空中写真DSM-R6航空レーザDEM	0.14	0.08	-1.41
	R4空中写真DSM-R6航空レーザDEM	0.53	0.32	-0.42

衛星画像DCHMと航空レーザDCHMの10mメッシュごとの98PCT値の差分平均と、本事業で作成した空中写真DCHMと航空レーザDCHMの20mメッシュごとの90PCT値の差分平均を比較した。ただし、使用しているメッシュサイズ、検証場所、およびパーセンタイル値が異なっていることに留意する必要がある。また、この値は航空レーザとの差分値を平均化した値であり、誤差率やRMSEとは異なる指標であることにも留意する。

- スギ、ヒノキについては、衛星画像DCHMの中で最も差分が小さかったBlackSkyと比較した結果、みどり市R4のスギを除き、空中写真DCHMの方が差分の絶対値が小さくなった。計測時期が空中写真と航空レーザで異なるため、成長分の誤差も含んでいる可能性がある。
- 広葉樹については、BlackSkyと比較して空中写真DCHMの差分が大きくなった。空中写真が落葉期の画像を用いて作成されたDCHMであるためと考えられる。
- 衛星画像DCHMは空中写真DCHMよりも精度が劣ると考えられるが、対象地の面積や既存データの種類、許容する精度によっては森林情報の更新に活用できる可能性がある。



## (6) 評価検証

# 空中写真解析のまとめ：航空レーザDSMと比較した空中写真DSMの特性

### <空中写真から作成するDSMの推定精度に影響を及ぼす誤差要因>

- 写真上で影になる部分：推定精度が低下する（主に過大となる）傾向が見られた。
- ギャップ（無立木地等）：樹高が過大に推定される傾向が見られた。
- 林縁等の急激な高さの変化箇所：空中写真では変化を捉えきれないため、樹高が過小に推定される傾向が見られた。
- 落葉している箇所：空中写真から高さの計測が困難で、樹高が過小に推定される傾向が見られた。

### <空中写真のラップ率と精度>

- 高ラップの空中写真DCHMの樹冠高および樹高は精度が高かった。本数は過少抽出であるが位置精度は高かった。高ラップの空中写真から樹頂点を作成する際は航空レーザよりも過少に樹木本数が推定されることに留意し解析することで、樹頂点および樹高データの更新に活用できる可能性がある。
- 低ラップの空中写真DCHM、固定資産業務の空中写真DCHMは、樹頂点の位置精度は低かったが、樹高については、樹冠高より航空レーザとの誤差率が小さくなった。樹頂点を作成することで、ギャップや影等の空中写真の高さの誤差要因が軽減すると考えられる。

### <検証場所による精度の違いについて>

- 空中写真DCHMは、樹冠高、樹頂点本数、樹高のすべての検証項目でみどり市の方が氷見市よりも精度が高い結果となった。対象とした範囲の面積が大きく異なるため単純な比較はできないが、みどり市の対象範囲は東京農工大学の演習林として管理されており、針葉樹林内のギャップや広葉樹の混交が少ないため誤差要因が少ない。その結果として精度が高くなったと考えられる。
- 氷見市の対象範囲については、樹種区分のスギ内で広葉樹の混交やギャップが多く見られた。樹種区分の精度向上（針葉樹ポリゴン内の最小判読面積を小さくする等）やその上でメッシュサイズを10m等に小さくすることにより、メッシュへの集計値の精度向上が見込まれる。



## (6) 評価検証

# 空中写真解析のまとめ：森林情報更新における留意事項

森林情報を更新する際は、以下の要素に基づき、最適なデータ更新手法を検討・選択する必要がある。

- 対象範囲における既存データの種類、計測データの緒元
- 森林解析において許容できる誤差の範囲、および集計したい解像度（メッシュサイズ）
- 対象地の特性（林分密度、針広の混交具合）

### <更新手法による留意点>

- 空中写真DCHM

高ラップであるほど樹冠高、樹頂点の精度が高くなる。ギャップ部分等の急激に高さが変化する部分や影の部分において航空レーザよりも過大推定になる場合が多い。この影響を小さくするため、なるべく影の少ない時間帯に撮影した成果を使用することが望ましい。また、落葉広葉樹が分布する地域について、広葉樹の樹高も併せて評価する場合は着葉期の撮影成果を利用するべきである。ただし、地図情報レベルの規格の違い等により、航空レーザと比較して数10cmの誤差が発生する可能性があることに留意する（p18参照）。

- 過年度および国土地理院DEM

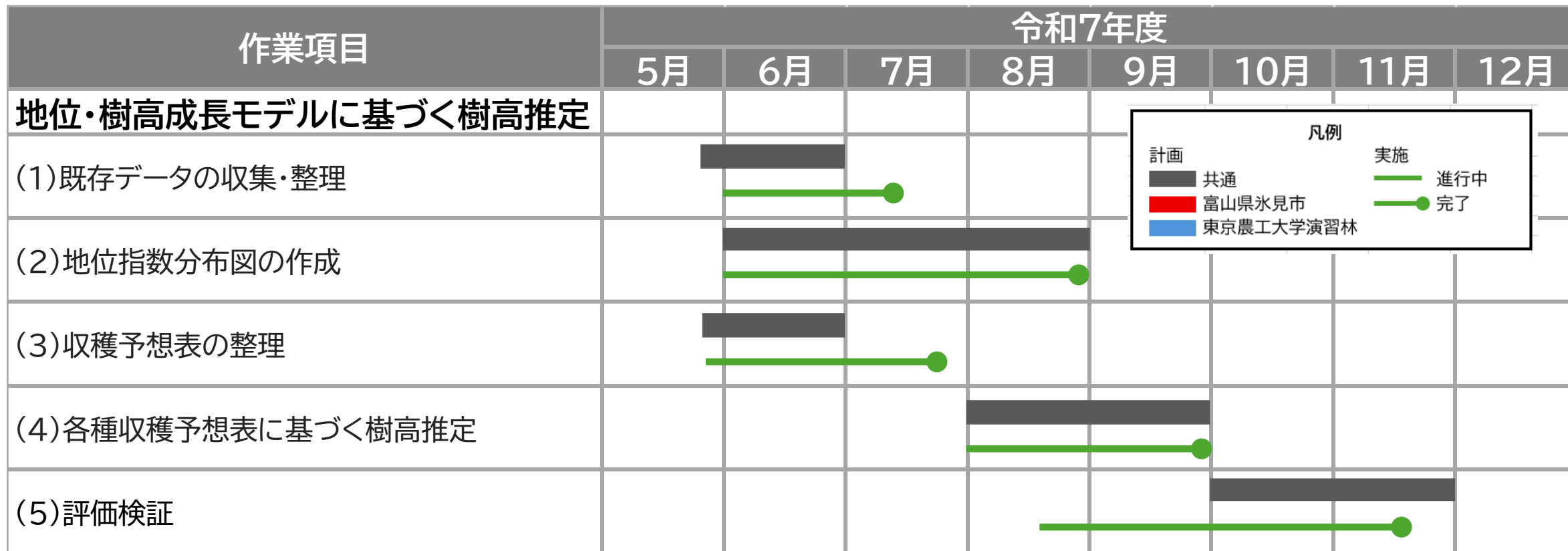
過年度撮影した時点から大きな地殻変動がない場合は、過年度DEMや国土地理院DEM（航空レーザから作成されたDEM）を使用することでDEMの作成コストを削減することが可能と考えられる。ただし、航空レーザ成果間で位置ずれが発生する可能性があるため、位置精度を検証し、位置ずれが確認された場合は、位置の補正の実施を検討する（p35参照）。

- 低密度の航空レーザおよび1mのDCHM

森林の樹冠高を更新する場合、低密度（1～4点）の航空レーザを活用することが可能と考えられる。ただし、高密度航空レーザと比較し、高さが過小となる可能性があることに留意する。また、50cmのDCHMをリサンプリング処理して作成した1mのDCHMについては50cmと同等の精度であり、樹冠高データの更新に活用可能と考えられる。ただし、点密度1点の仕様で作成された1mDCHMは誤差が発生する可能性があるため、計測点密度を確認し使用する必要がある。

# 地位・樹高推定モデルに基づく樹高推定

# 業務項目



# (1) 既存データの収集・整理



以下の資料を収集しデータ内容を確認した。解析に係る情報について表の備考欄に示す。

検証場所	成果	作成年度	備考欄
氷見市	航空レーザ成果	平成30年度	・ オリジナルデータに高圧電線あり→ <b>解析時に除外する</b>
		令和6年度	・ 過年度成果データのDCHMを解析に使用する
	収穫予想表	昭和55年度	・ 昭和55年度版はタテヤマスギのみ、昭和40年度版はタテヤマスギ・ボカスギの両樹種あり→ <b>昭和40年度版を使用する</b> ・ 昭和40年度版は樹高成長曲線なし→ <b>収穫予想表から式を作成する</b>
		昭和40年度	
森林計画図 ・ 森林簿	令和4年度	・ 森林計画図図形に森林簿の複数レコードがリンクする ・ <b>図形の境界と林齢の精度は低い</b>	
富山県独自の樹高表	平成19年以降 (詳細不明)	・ 森林簿の樹高更新に利用されている富山県独自の樹高表 →今回は樹高推定に使用しない	
みどり市	航空レーザ成果	平成30年度	・ オリジナルデータに高圧電線なし
		令和6年度	・ オリジナルデータに高圧電線なし
	収穫予想表	平成15年度	・ 樹高成長曲線あり
	森林計画図	令和7年度	・ <b>図形の境界と林齢の精度は高い</b>

※以降のページでは、昭和を「S」、平成を「H」、令和を「R」と記載する

# (1) 既存データの収集・整理

## 氷見市の現況確認

氷見市のスギ人工林の現況および森林簿の樹高更新方法など、解析に必要な情報について確認するため、富山県に対しR7年7月12日にヒアリングを実施した。その要点を以下に示す。

### <氷見市のスギ人工林について>

- これまでボカスギが植栽されてきたため、ボカスギ人工林が多い
- 新規の造林地ではタテヤマスギが植栽されている
- ボカスギとタテヤマスギで形質が異なる（ボカスギの方が成長が早い）

### <森林簿の樹高の更新方法>

- 富山県独自の樹高表に基づき、樹高を更新している
- 富山県独自の樹高表の内容は、収穫予想表とは異なる

# (1) 既存データの収集・整理

## 課題整理 (対応方針)

現在、富山県の森林簿の樹高更新には収穫予想表は使用されていないが、業務の目的を考慮し、本解析では富山県の収穫予想表を採用することとした。富山県の収穫予想表を用いて樹高を解析する上での主要な課題、およびその対応方針を以下に示す。

- ① スギの種類がボカスギ・タテヤマスギと2つあるが、解析時の扱いはどうか  
→**氷見市で主要なスギの樹種であるボカスギのみを対象とする**
- ② 収穫予想表に樹高成長曲線の式の情報が無いためどうするか  
→**収穫予想表のデータを基に樹高成長曲線を作成する**
- ③ 推定した地位指数を、収穫予想表の地位（3区分）にどうあてはめるか  
→**収穫予想表の3区分の地位の地位指数を求め、値の近さで地位指数を地位に変換する**

次項では、解析方針の詳細について具体的に記述する。

# (1) 既存データの収集・整理

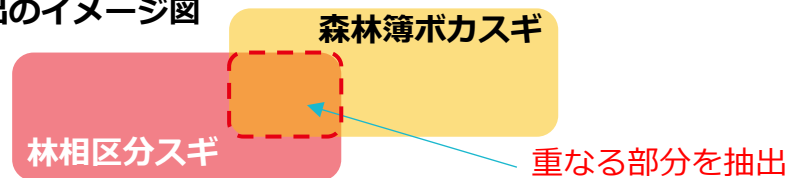
## 課題① (対応方針)

課題	対応方針
①ボカスギとタテヤマスギの解析時の扱いをどうするか	氷見市のスギ人工林で主要な樹種である、ボカスギのみを対象とする <ul style="list-style-type: none"> <li>ボカスギで地位指数分布図を作成する</li> <li>S40年度のボカスギの収穫予想表を使用する</li> </ul>

※GIS上でボカスギを抽出する際の留意点

森林簿や森林計画図上はスギでも、現況がスギではない箇所が見られたため、借用したGISデータ「森林計画図（森林簿）」と「H30林相区分」を重ねて、両方スギである箇所を抽出した。以下の図表は、抽出結果を森林簿のスギの種類で場合分けした結果である。本業務ではボカスギを対象を絞って解析するため、「ボカスギのみ」の範囲を抽出した。1つの図形にボカスギの林齢情報が複数ある場合は最大林齢を採用した。

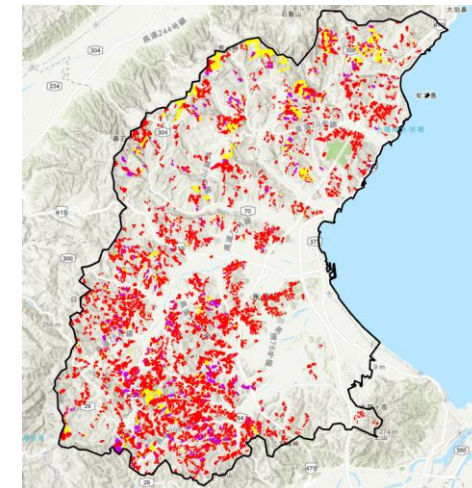
ボカスギの抽出のイメージ図



森林簿の樹種情報	面積（割合）※
ボカスギのみ→対象	2,024ha (74%)
タテヤマスギのみ→対象外	376ha (14%)
両方含まれる→対象外	353ha (13%)



赤いエリアが今回の対象範囲



※最終的な解析面積とは異なる。解析は20mメッシュを用いており、各スライドに記載のサンプル数が実際の検証数である。

# (1) 既存データの収集・整理

## 課題② (対応方針)

### 課題

②収穫予想表に樹高成長曲線の情報がないためどうするか

### 対応方針

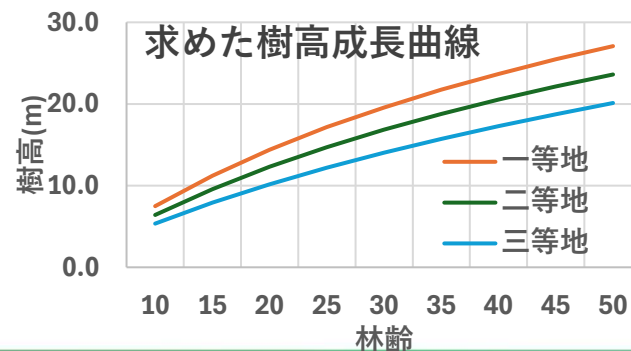
収穫予想表の林齢と上層樹高から新たに樹高成長曲線を作成する

S40年度の富山県収穫予想表のボカスギの二等地のデータを用いて、『林分密度管理図による収穫予想表作成の手順書－民有林スギ・ヒノキ・カラマツ人工林用－』（林野庁R7年3月）に記載の5つの式の精度を比較し、最も精度の高いコルフ式を採用することとした。一等地、三等地についても、同様に収穫予想表のデータをコルフ式にあてはめて係数を求めた。

第二表 富山県収穫予想表

林令	平均			単木材積	材積			幹材積	幹材積	幹材積	幹材積
	樹高	樹高	樹高		材積	材積	材積				
10	11.2	6.4	5.9 ~ 6.9	0.0413	1,355	13.5	56.0	17.0	5		
15	16.3	9.6	6.7 ~ 10.4	0.1151	1,225	26.4	141.6	19.0	9		
20	20.2	12.3	7.2 ~ 13.3	0.2124	1,111	36.8	296.0	19.6	11		
25	23.5	14.7	7.4 ~ 15.9	0.3287	1,016	45.8	394.0	20.8	13		
30	26.3	16.8	7.5 ~ 18.2	0.4674	937	53.0	438.0	21.2	14		
35	28.7	18.8	7.3 ~ 20.3	0.6253	870	58.7	544.0	20.0	15		
40	30.9	20.6	6.9 ~ 22.1	0.7941	811	63.5	644.0	14.8	16		
45	32.9	22.1	7.4 ~ 23.8	0.9908	764	67.8	718.0	9.2	16		
50	34.7	23.6	7.8 ~ 25.3	1.0611	720	71.1	764.0		15		

式	a	b	K	決定係数	RMSE (m)	AIC	
ゴンペルツ式	$H = a \times \exp(-b \times \exp(-k \times \text{林齢}))$	27.79009922	2.388605469	0.052436318	0.99768198	0.20964	23.38005
ミッチャーリッヒ式	$H = a \times (1 - b \times \exp(-k \times \text{林齢}))$	35.48494998	1.020925982	0.022201946	0.999847347	0.053798	-1.10266
リッチャーズ式	$H = a \times (1 - \exp(-k \times \text{林齢}))^b$	34.4359014	1.089235741	0.024429377	0.999766357	0.066557	2.72798
ロジスティック式	$H = a / (1 + b \times \exp(-k \times \text{林齢}))$	25.47470673	5.954921037	0.082282706	0.993692233	0.345823	32.38966
コルフ式 <b>採用</b>	$H = a \times \exp(-b \times \text{林齢}^{-k})$	131.670683	6.778877833	0.350794813	0.999937128	0.034526	-9.08633

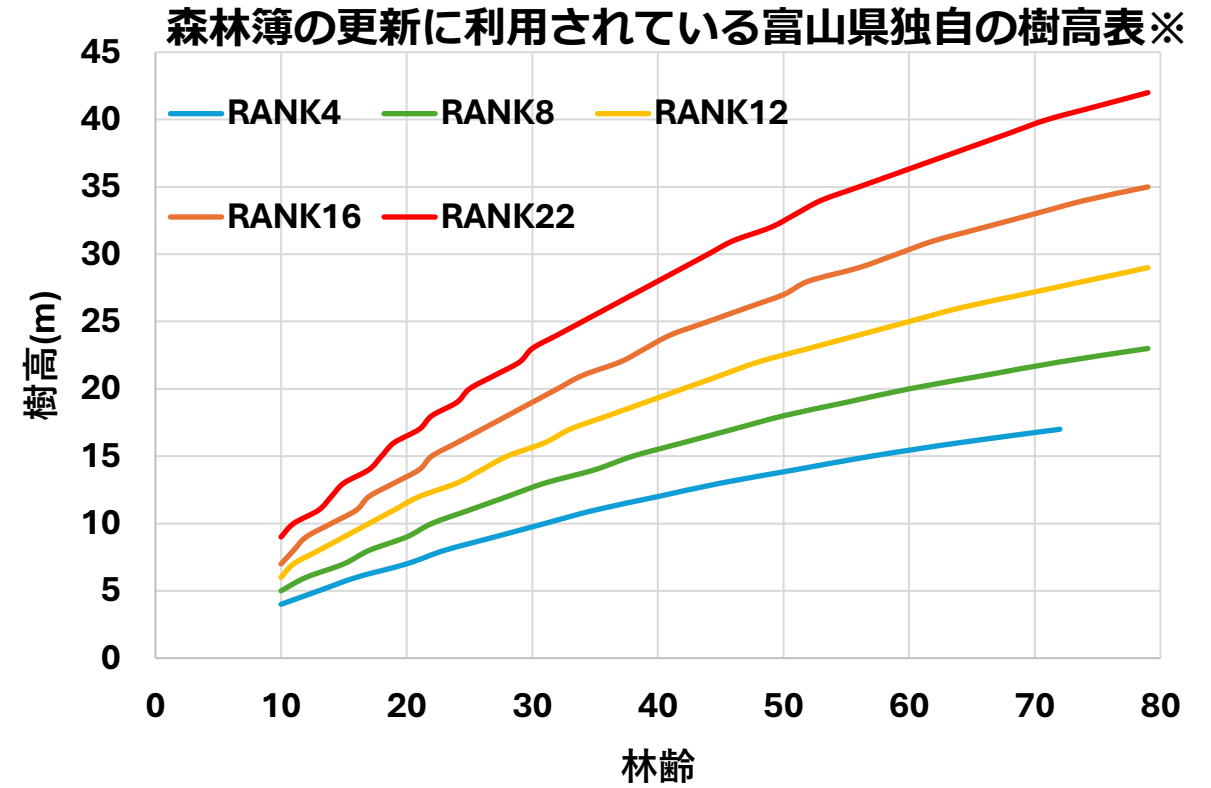
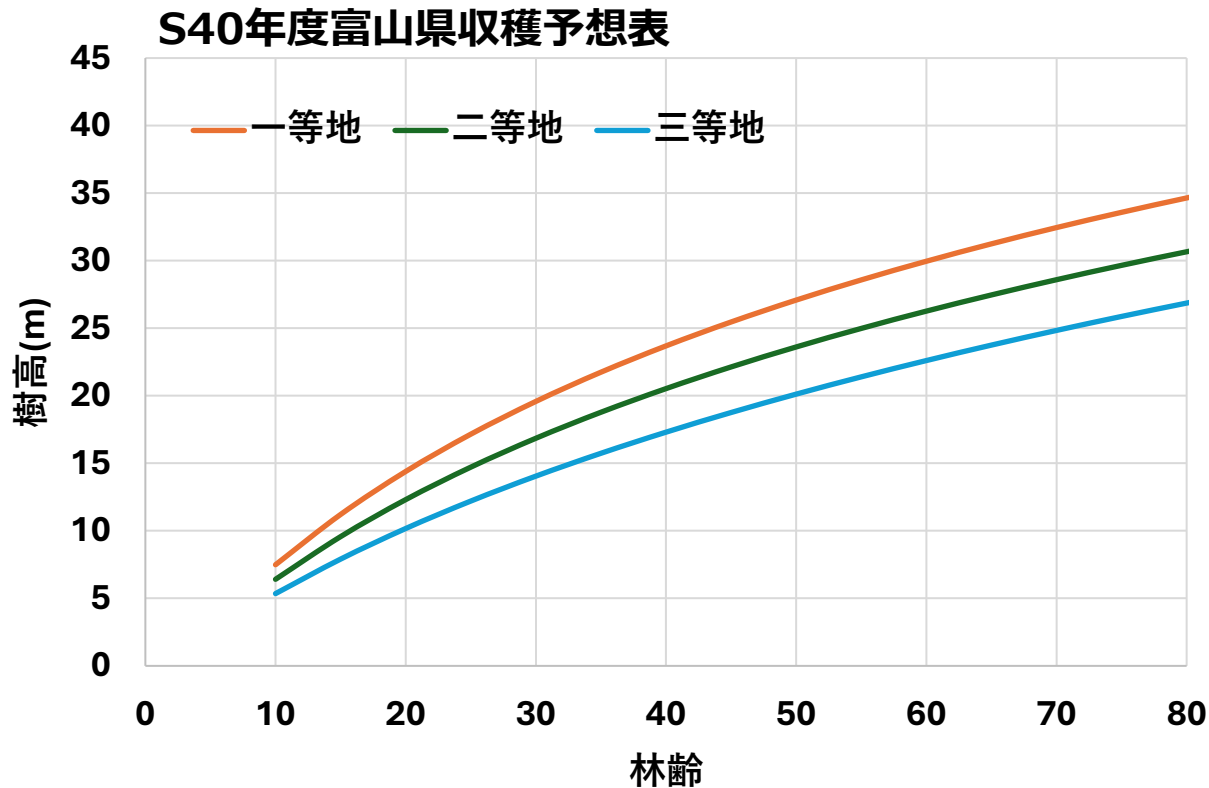


セルが赤いほど精度が高いことを示す。

# (1) 既存データの収集・整理

## 課題② (対応方針) 参考

S40年度富山県収穫予想表は50年生までのデータしかないため、高齢林にも対応した富山県独自の樹高表（80年生までの樹高を設定）を参考として比較した。その結果、収穫予想表の樹高成長曲線は、富山県独自の樹高表のRANK12～16と類似しており、高齢林の成長傾向についても比較的類似した傾向を示すことが分かった。



※RANKは富山県の地位級を示しており、実際は4～22までの19区分あるが、右上のグラフでは、グラフを見やすくするために5区分の結果のみ示している。また、本来は林齢と樹高の対のデータであるが、わかりやすいように曲線で表現している。

# (1) 既存データの収集・整理

## 課題③ (対応方針)

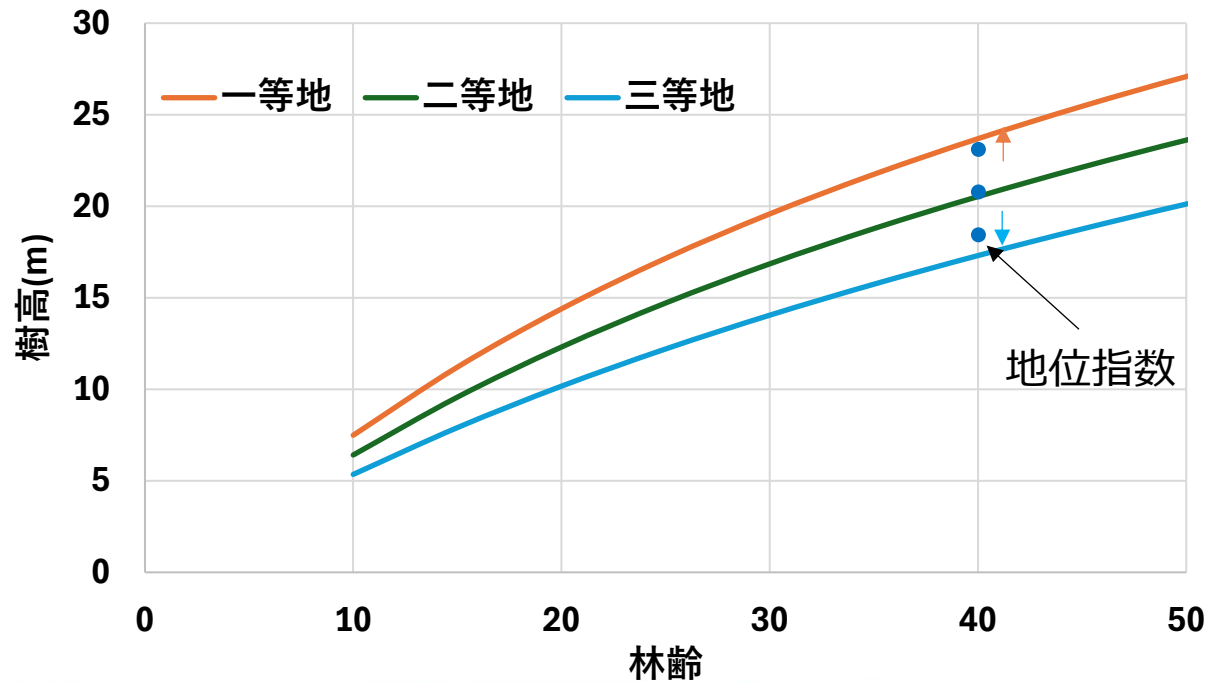
### 課題

③推定した地位指数を、収穫予想表の地位（3区分）にどうあてはめるか

### 対応方針

- 前頁で作成した3区分の地位の樹高成長曲線の地位指数（40年生の樹高）を求め、推定した地位指数との値の近さで地位指数を地位に変換する

一等地、二等地、三等地の樹高成長曲線に林齢=40を代入し、地位指数を算出した。結果を右下に示す。  
本業務で推定された地位指数を一等地、二等地、三等地に変換する際は、最も地位指数の近い地位を採用することとした。



	地位指数
一等地	= 23.7
二等地	= 20.5
三等地	= 17.3



## (2) 地位指数分布図の作成 作業手順

地位指数分布図を『航空機LiDARを使った地位指数分布図の作成の手引き』（林野庁R4年3月）に基づき作成した。  
作成手順と使用したデータを以下に示す。

### <作業概要>

- ① 正しい林齢情報を確認する
- ② 20mメッシュで樹高・樹種・林齢を集計する
- ③ 各齢級で10程度を基準にサンプリングする
- ④ サンプルから樹高成長曲線のガイドカーブを求める
- ⑤ ガイドカーブで求めた係数を用いて地位指数分布図を作成する

### <20mメッシュに集計する情報>

	氷見市	みどり市
樹高（平均値）	H30航空レーザDCHMの10mメッシュ内の最大値	H30航空レーザDCHMの10mメッシュ内の最大値
樹種（最頻値）	H30林相区分とR6林相区分 (スギは林相区分 = スギかつ森林簿ボカスギの箇所)	R6林相区分
林齢（最頻値）	森林簿の林齢に重複あり (ボカスギの林齢のうち最大の林齢を採用)	小班の林齢に重複なし (小班の林齢をそのまま採用)

### ※補足

以下の条件のメッシュは、解析の精度に影響する可能性が高いため、解析時に除外した。

- ・ 平均樹高が5m未満  
→ 森林域ではない可能性あり
- ・ 2時期の航空レーザ樹高の差分が負の値  
→ 高圧電線や鉄塔、伐採地の可能性あり



## (2) 地位指数分布図の作成

## サンプリングの留意点

サンプリング時の留意点を林野庁マニュアルで確認した。マニュアルに記載されている「面積1ha以上の小班」などの一部条件は、氷見市の森林計画図や森林簿のデータ内容では難しかったため、目視で状況を確認しながら今回のサンプリング手法を整理して作業した。また、みどり市も同様の条件でサンプリングした。

### <氷見市データの確認結果>

- 小班の境界の精度が低い
- 1つの小班に複数の林齢情報がある
- 1つの小班内に複数の樹種が侵入している



正確な林齢情報の面積1ha以上のスギの小班が少ない

林野庁マニュアルのサンプリング手法	今回のサンプリング手法
<p>以下の条件で、各齢級から、均等に、合計100以上のサンプルを抽出する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>林齢が確実なところ（最優先の条件）</b></li> <li>• 育成単層林で、面積1ha以上の小班</li> <li>• 林縁が含まれるメッシュは除外する</li> <li>• 谷部、尾根部が含まれるメッシュはできるだけ避け、平衡斜面からサンプリングする</li> </ul>	<p>以下の条件で、3 齢級～20 齢級で各齢級10程度を目安に100以上のサンプルを抽出した。不足する場合は近い齢級からサンプリングした。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 森林簿の樹種 = ボカスギかつ林相区分 = スギのメッシュ</li> <li>• 森林簿の樹種 = タテヤマスギが含まれていないメッシュ</li> <li>• 目視確認で、周囲にまとまったスギ人工林があるメッシュ</li> <li>• 小班の境界にかぶらないメッシュ</li> <li>• できるだけ平衡斜面にあるメッシュ</li> </ul>

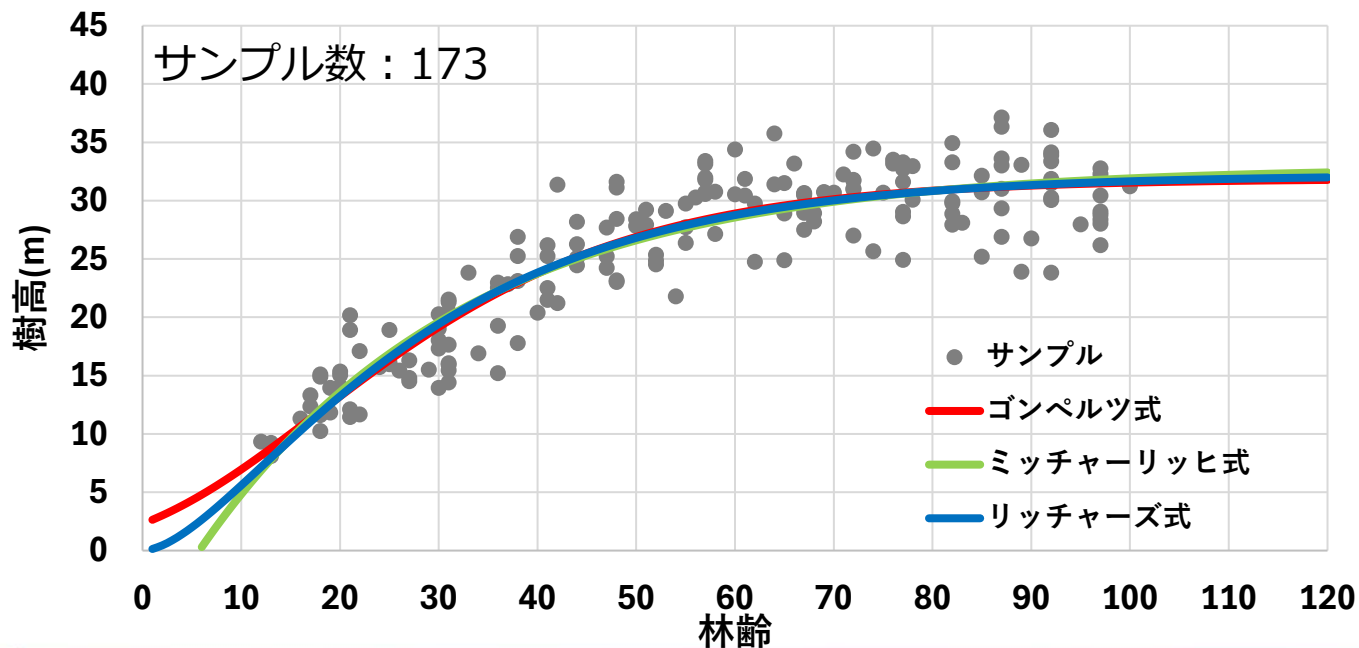
## (2) 地位指数分布図の作成 樹高成長曲線

氷見市のサンプルの樹高と林齢の情報から3つの樹高成長曲線を作成した。精度は同程度だったが、数値で比較すると、ゴンペルツ式の精度が最も良かった。3つの曲線とサンプルの散布図を以下に示す。

### 氷見市の樹高成長曲線の検討

式		a	b	k	決定係数	RMSE(m)	AIC
ゴンペルツ式	$H = a \times \exp(-b \times \exp(-k \times \text{林齢}))$	31.89408231	2.632277168	0.05473233	0.8298	2.910168	804.1794
ミッチャーリッヒ式	$H = a \times (1 - b \times \exp(-k \times \text{林齢}))$	32.87756316	1.240273333	0.03741343	0.820519	2.98846	813.524
リッチャーズ式	$H = a \times (1 - \exp(-k \times \text{林齢}))^b$	32.21265834	1.764162971	0.046297725	0.824894	2.951813	809.1808

セルが赤いほど精度が高いことを示す。



3つの樹高成長曲線の違いは、20年生未満で見られるが、全体的には同じような曲線となった。曲線の傾向として、40年生まで、急激に成長し、70年生以降で成長が緩やかになっていた。

## (2) 地位指数分布図の作成

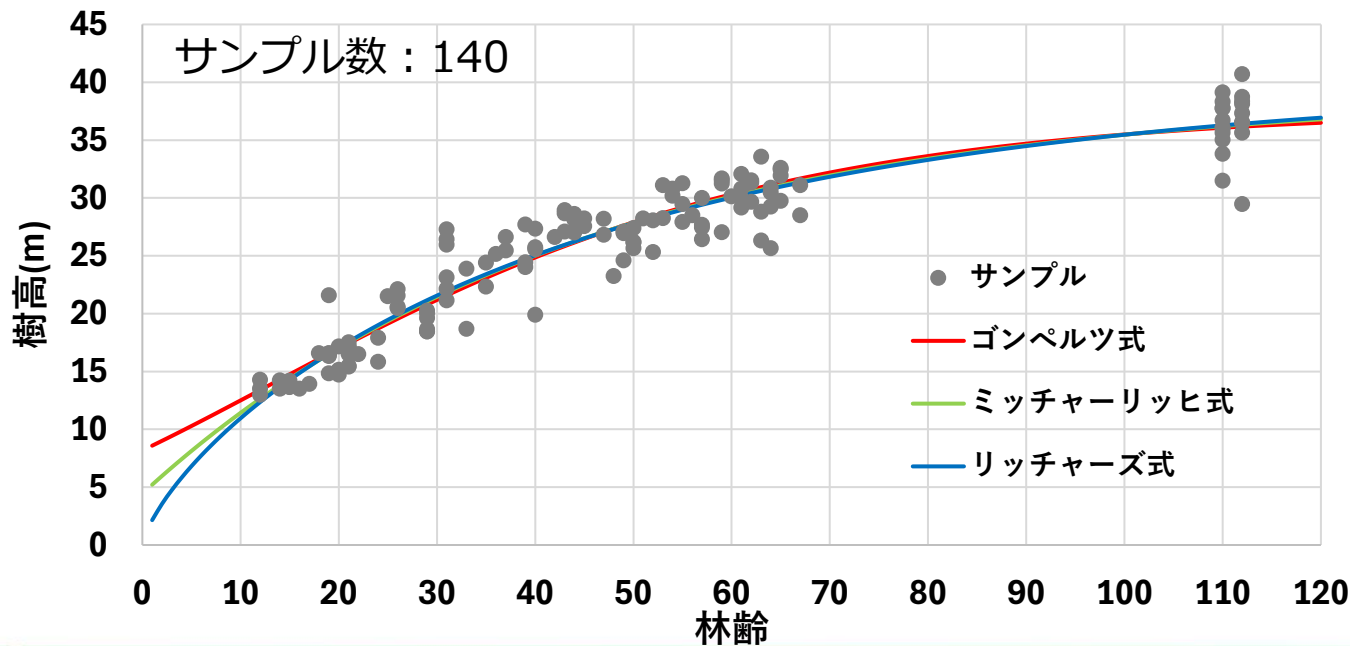
## 樹高成長曲線

みどり市のサンプルの樹高と林齢の情報から3つの樹高成長曲線を作成した。精度は同程度だったが、数値で比較すると、リッチャーズ式の精度が最も良かった。3つの曲線とサンプルの散布図を下に示す。

### みどり市の樹高成長曲線の検討

式		a	b	k	決定係数	RMSE(m)	AIC
ゴンペルツ式	$H = a \times \exp(-b \times \exp(-k \times \text{林齢}))$	37.63189646	1.526719842	0.032576426	0.908816	2.091093	558.5452
ミッチャーリッヒ式	$H = a \times (1 - b \times \exp(-k \times \text{林齢}))$	39.13324467	0.88653138	0.02246983	0.911565	2.059329	554.2593
リッチャーズ式	$H = a \times (1 - \exp(-k \times \text{林齢}))^b$	40.10818946	0.733469221	0.018681356	0.911934	2.055029	553.674

セルが赤いほど精度が高いことを示す。



みどり市は70～100年生のサンプルがなかったため、110年生付近でサンプルを取得した。

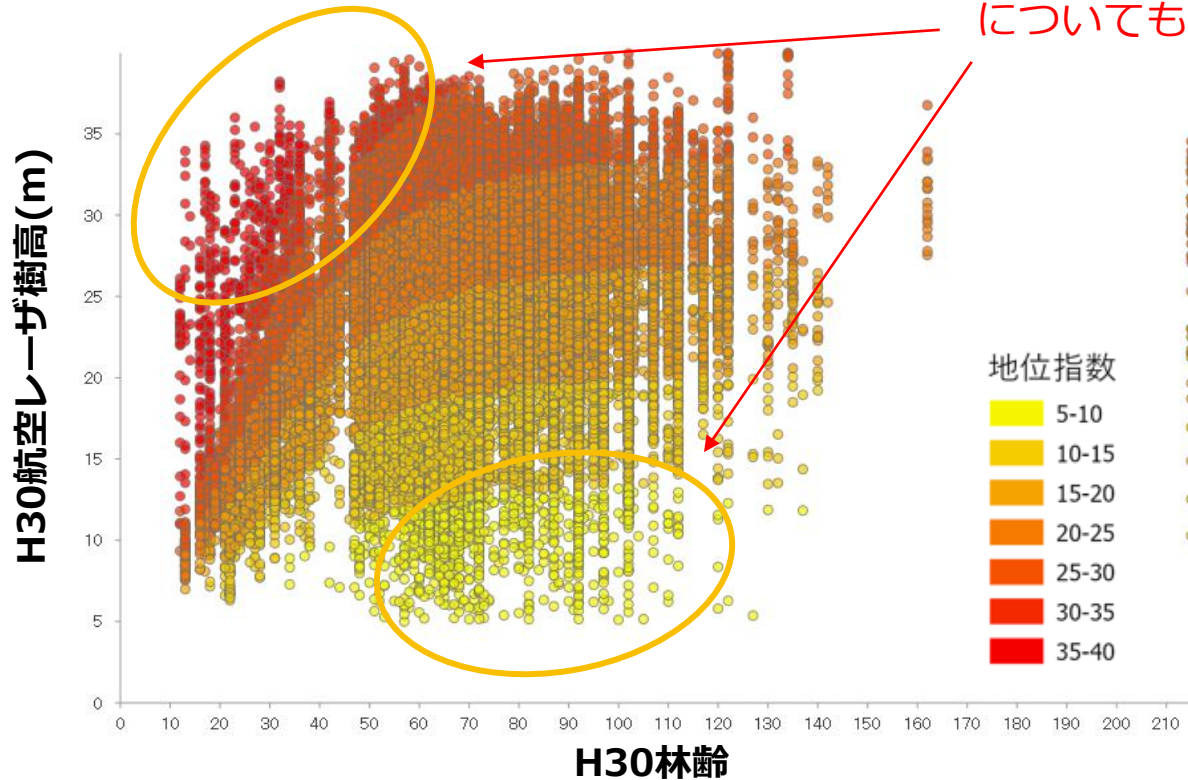
氷見市の曲線は70年生で成長が緩やかになっていたが、みどり市の曲線は高齢林でも樹高成長が続いていた。また氷見市よりも、全体的に緩やかな成長をする曲線となった。

## (2) 地位指数分布図の作成

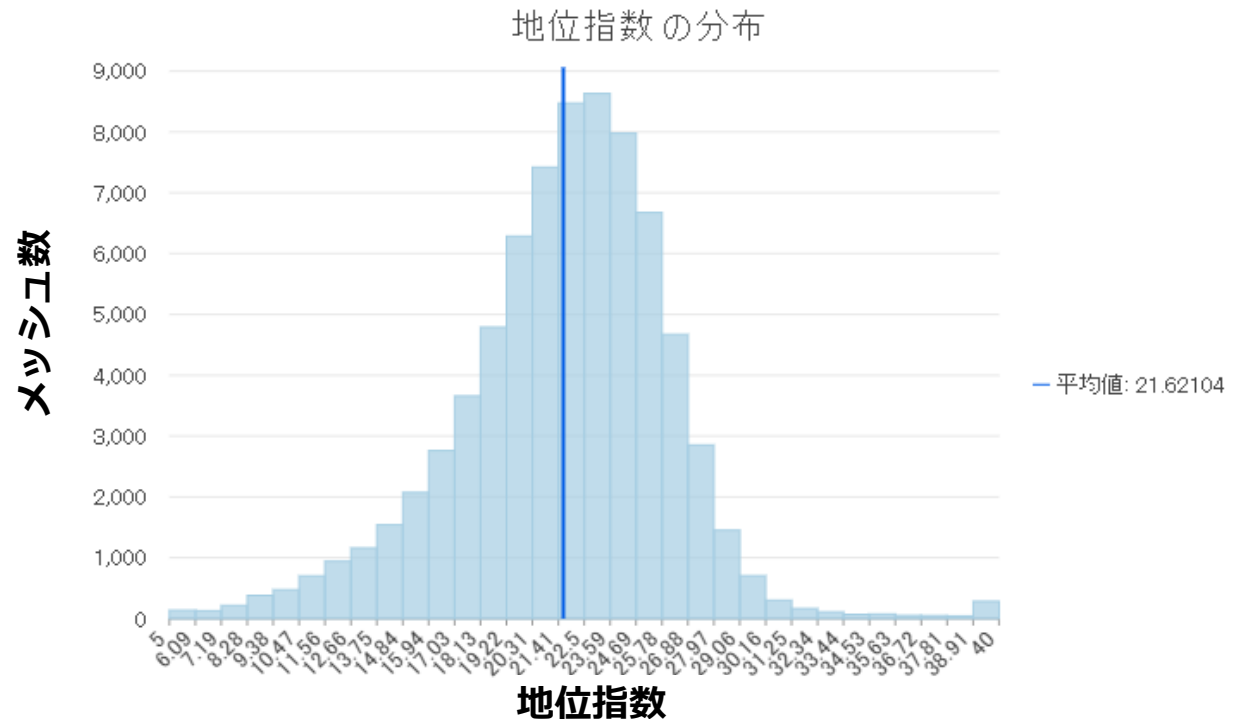
## 地位指数の推定

作成した樹高成長曲線で地位指数を推定した。地位指数で、林齢に対して極端に樹高が小さい場合や大きい場合、地位指数が異常値を示すため、地位指数の下限値を5、上限値を40に設定した。すべてのモデルで地位指数分布図を作成しているが、以降は最も精度の高かったゴンペルツ式の推定結果を示す。左の図は、林齢と樹高の散布図を推定した地位指数で色分けしている。また氷見市の地位指数の平均値は21.6だった。

### 氷見市の地位指数の分布 (ゴンペルツ式)



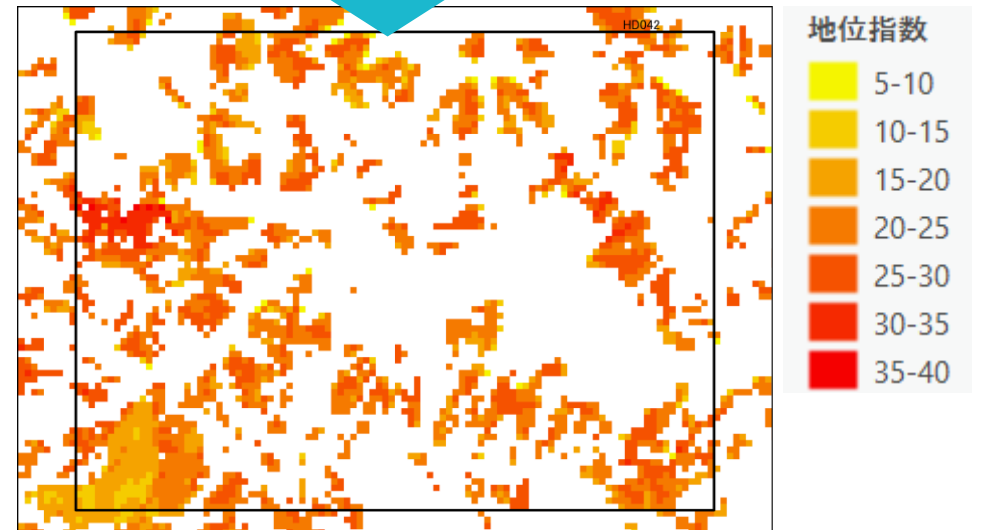
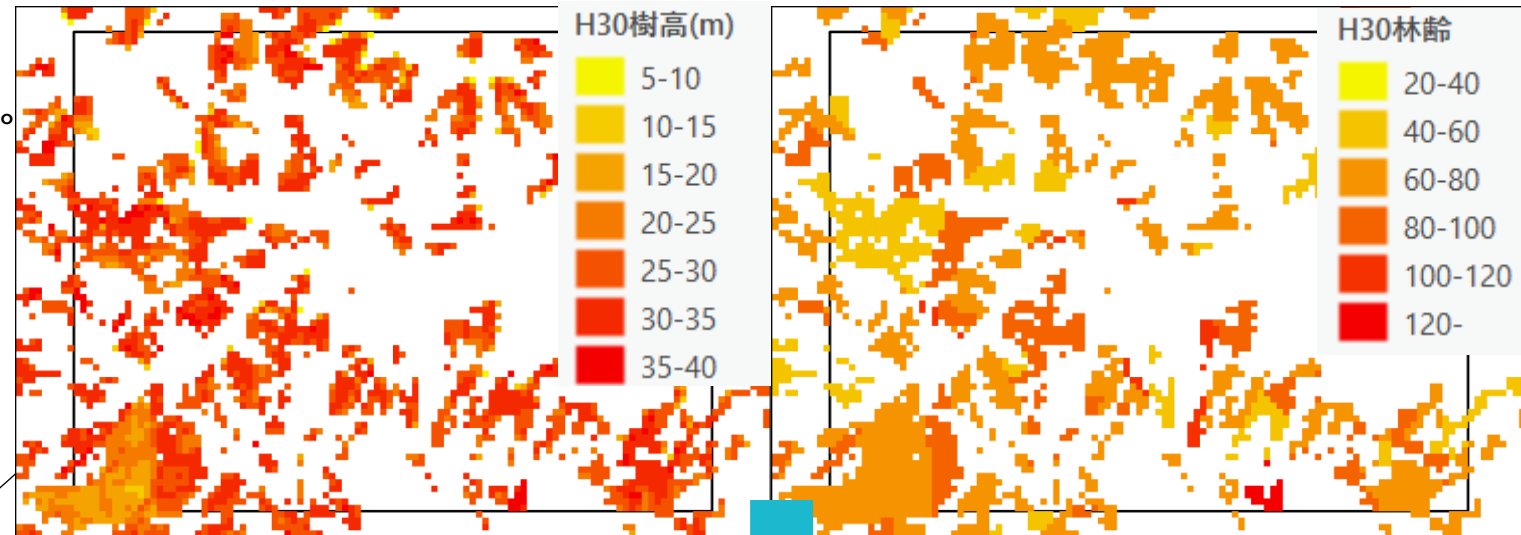
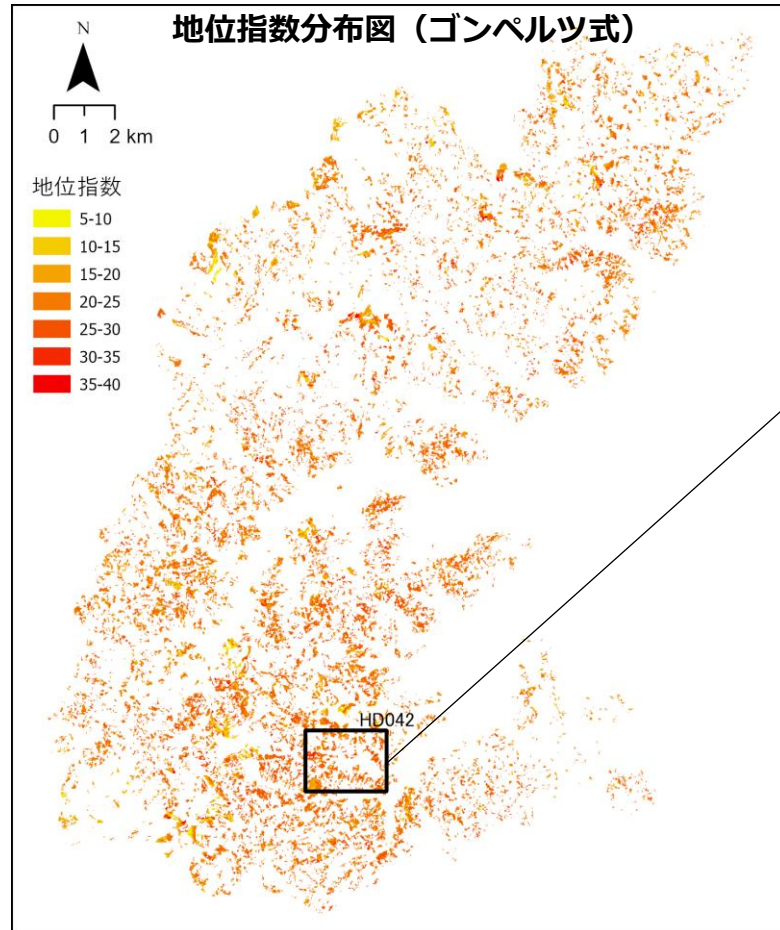
林齢と樹高の関係より、林齢情報が間違っている可能性のあるデータがみられる。(本業務の検証では外れ値を除外した場合についても検討した。)



## (2) 地位指数分布図の作成

## 地位指数分布図

地位指数分布図を示す。右は拡大図で、樹高と林齢、そこから推定される地位指数を示す。



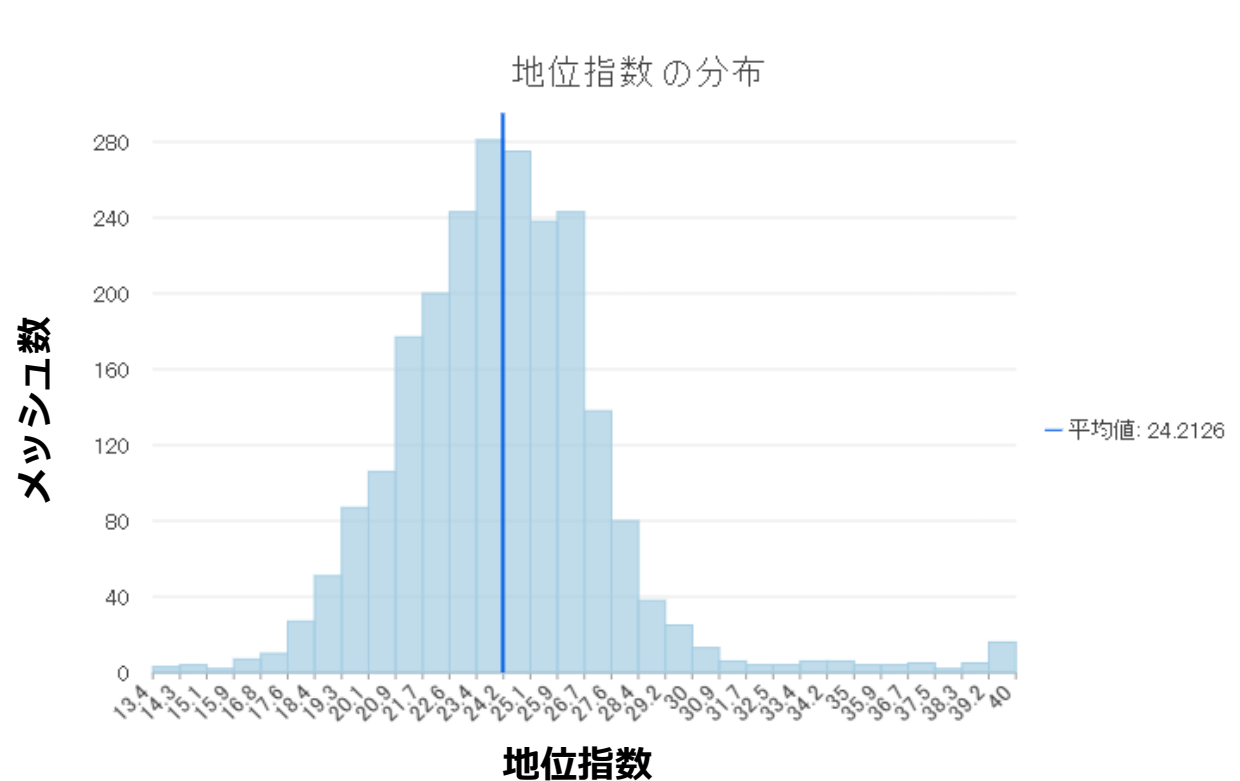
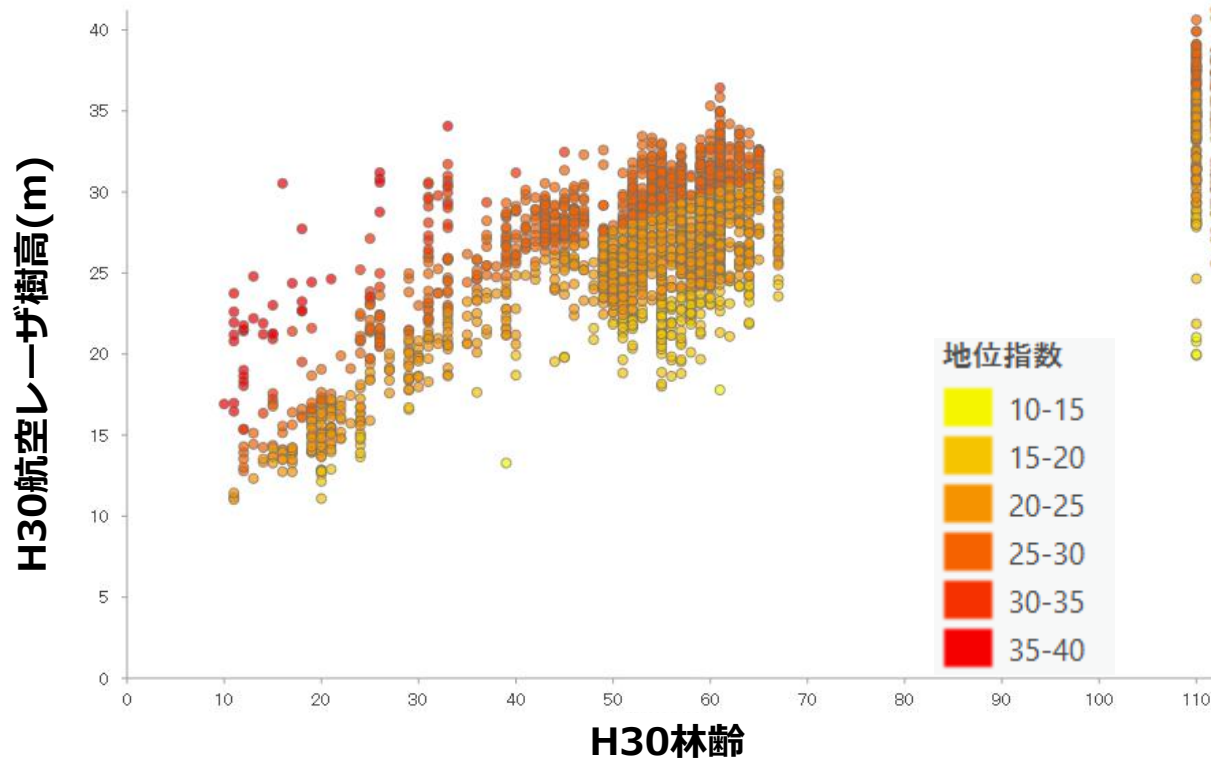
## (2) 地位指数分布図の作成

## 地位指数の推定

作成した樹高成長曲線で地位指数を推定した。氷見市と同様に、地位指数の下限値を5、上限値を40に設定した。

最も式の精度が高かったリッチャーズ式を使った推定結果を以下に示す。みどり市の地位指数の平均値は24.2で、氷見市の地位指数の平均値21.6より高かった。

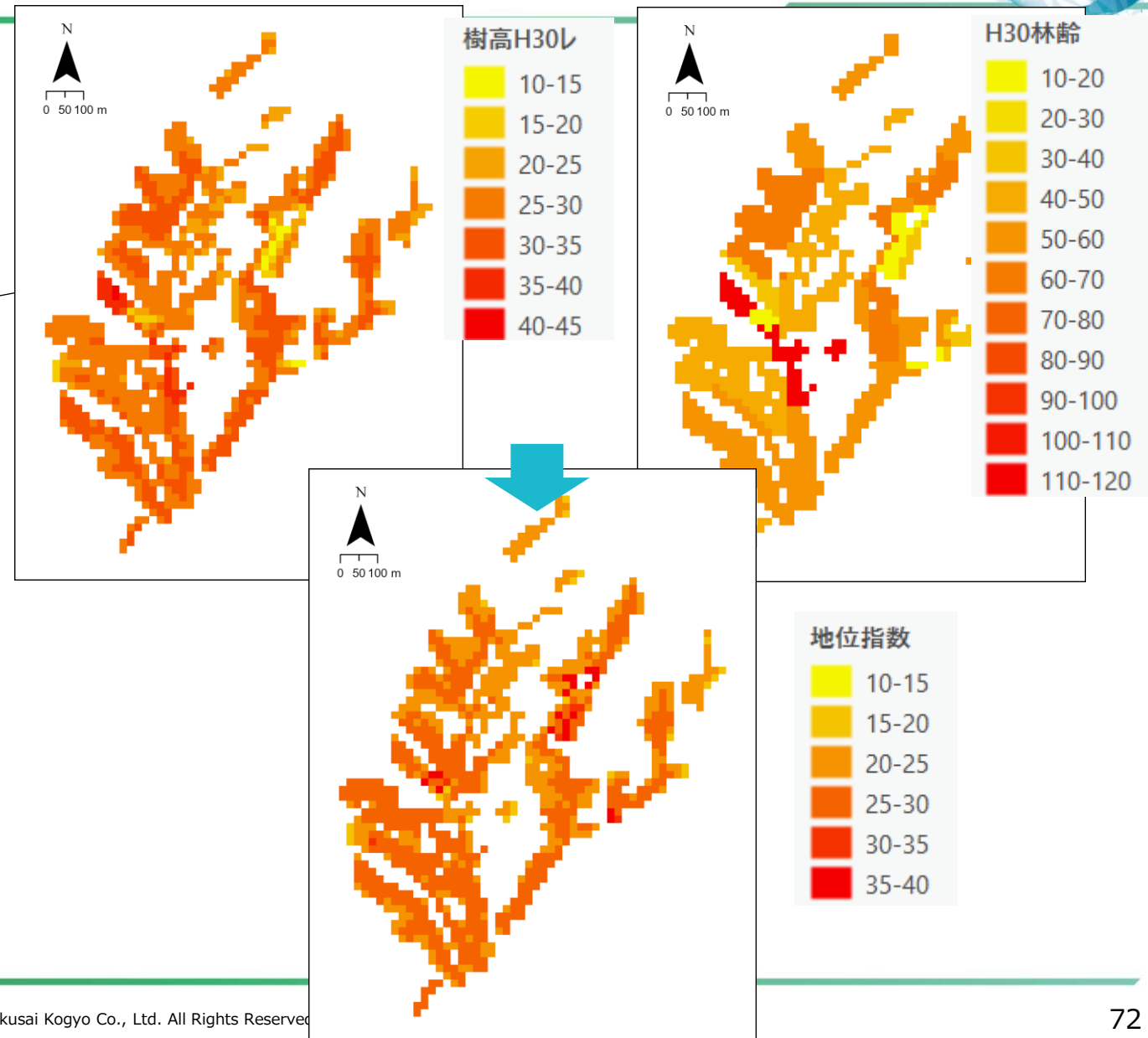
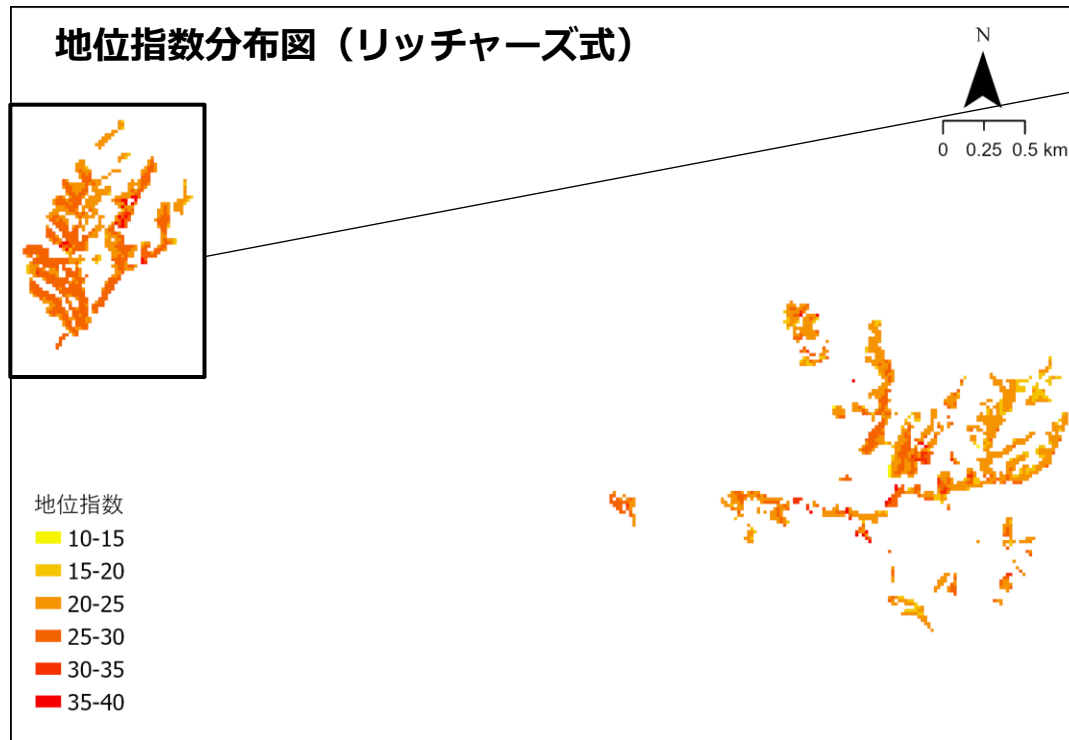
### みどり市の地位指数の分布（リッチャーズ式）



## (2) 地位指数分布図の作成

## 地位指数分布図

地位指数分布図を示す。右は拡大図で、樹高と林齢、そこから推定される地位指数を示す。



## (2) 地位指数分布図の作成

## 妥当性の確認



新規で作成した樹高成長曲線がサンプルに対して高い適合度を示したとしても、現実の林分は様々な構造の林分があるため、モデルの高適合性 = 高妥当性とは限らない可能性がある。そのため、それぞれの式から地位指数分布図を作成し、H30とR6の航空レーザを用いて妥当性を検証した。

### 妥当性確認①

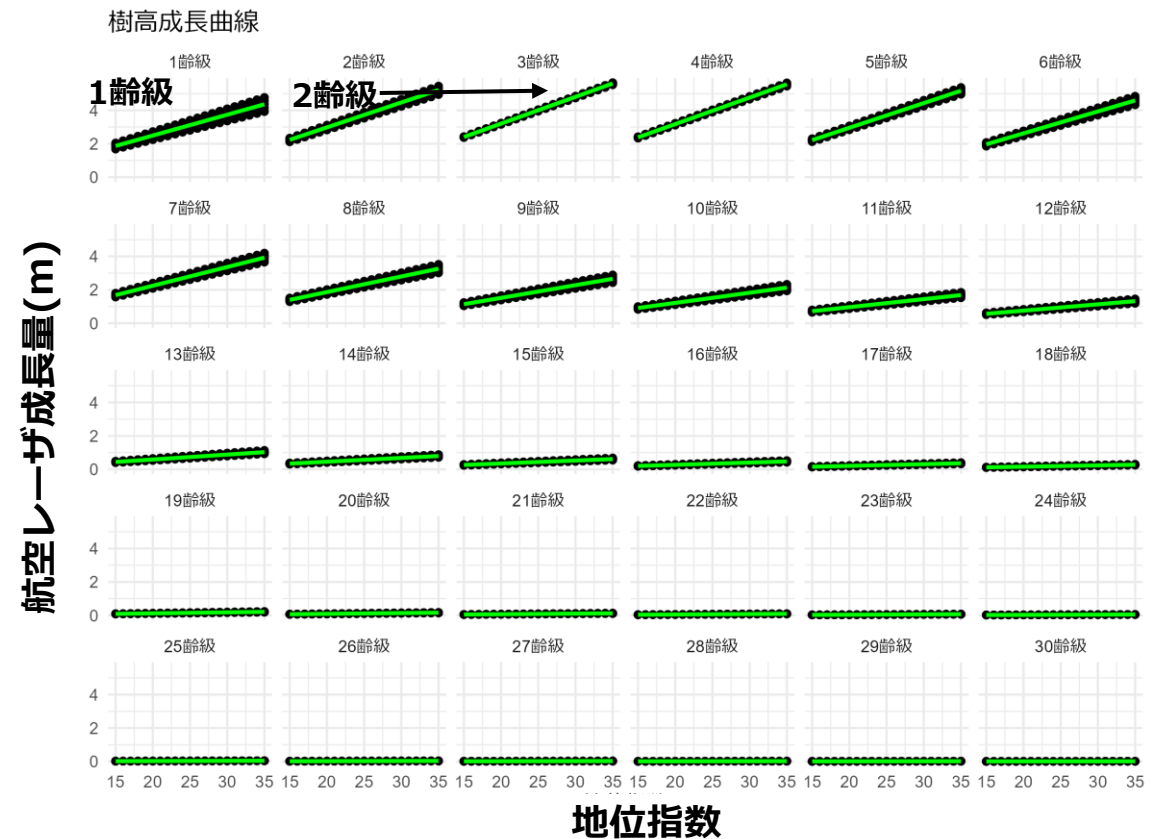
妥当性確認の第一段階として、同一齢級の林分を抽出し、2時期の航空レーザ成長量と推定された地位指数の相関関係を確認した。一般的に高齢林では成長量の差が小さくなる傾向のため、以下の仮説は若齢林において顕著に現れると想定される。

- ・ <推定手法の前提> 樹高と成長量の間には正の相関（「樹高が大きい = 成長量大きい」）が成立する。
- ・ <妥当性の判断基準> 地位指数の妥当性が確認されるためには、地位指数と成長量の間には正の相関（「地位指数が高い = 成長量大きい」）が成立する。

### 妥当性確認②

樹高成長曲線の精度検証のため、式の作成に使用していないR6航空レーザを用いて、航空レーザ樹高と推定樹高、H30からR6の航空レーザ成長量と推定成長量をそれぞれ比較した。

### 樹高成長曲線から推定される妥当性がある場合の散布図



※以降のページでは、H30からR6の6年間の成長量を「成長量」と記載する。

## (2) 地位指数分布図の作成

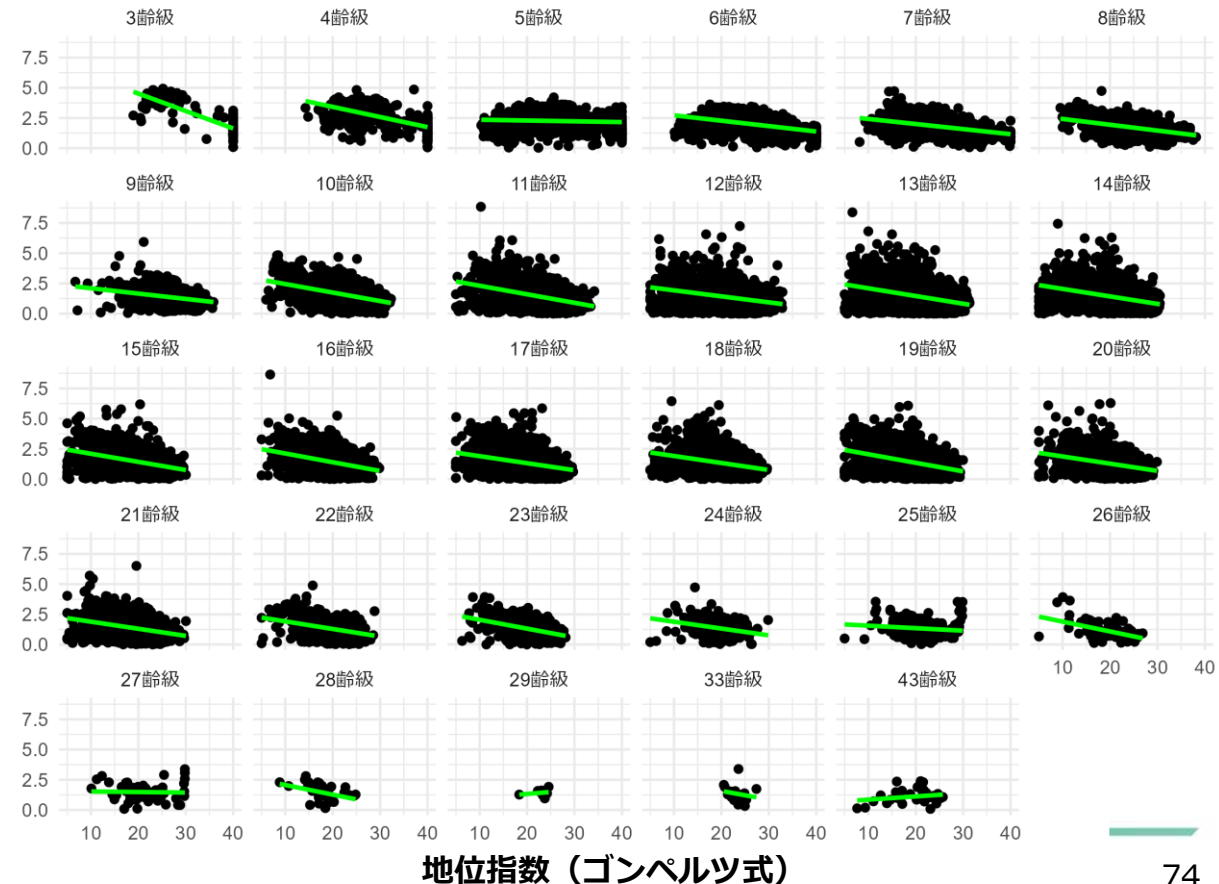
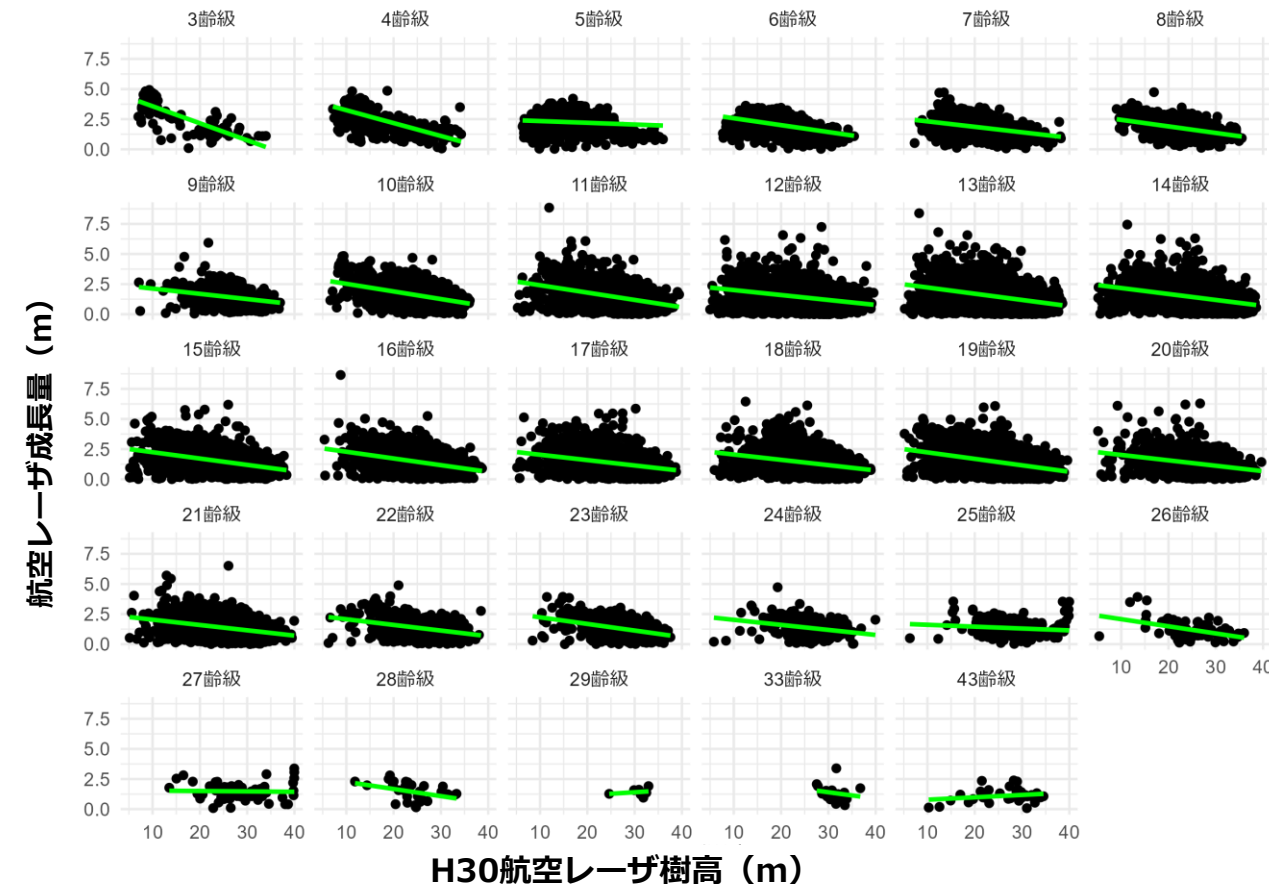
## 妥当性確認①

左が各齢級の航空レーザ樹高と航空レーザ成長量の関係、右が各齢級の地位指数と航空レーザ成長量の関係である。まずは、樹高と成長量の関係が地位指数と樹高の関係に直接影響していることが分かる。妥当性の判断として、右のグラフの若い齢級の結果が「地位指数が高い=成長量大きい」傾向があると望ましいが、グラフは逆の傾向を示していた。原因としては、林齢の情報がないデータが含まれていることが1つの要因と考えられる。

サンプル数：75,225

H30航空レーザ樹高（横軸）と航空レーザ成長量（縦軸）

推定した地位指数（横軸）と航空レーザ成長量（縦軸）



## (2) 地位指数分布図の作成

## 妥当性確認①

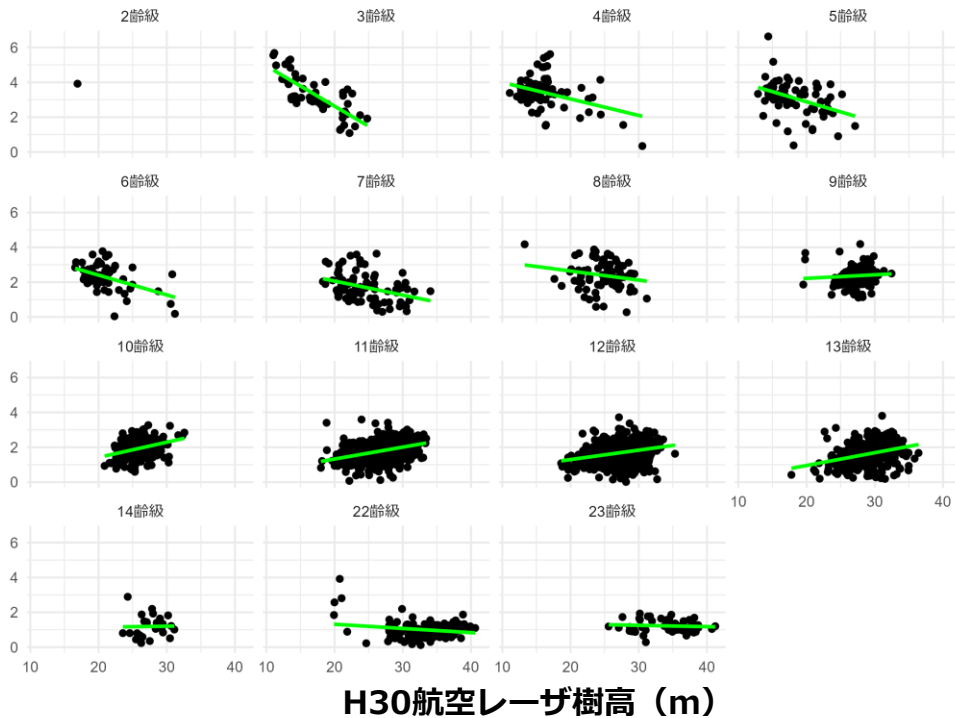
みどり市も同様に確認し、8 齢級未満で「地位指数が高い=成長量大きい」とは逆の傾向を示していた。みどり市は林齢が比較的正確なデータであるが、林齢に対して樹高が高いメッシュがいくつかあった。GIS上で状況を確認したところ、若齢林が樹高の高い林分と隣接している場合、メッシュで樹高最大値が集計されるため、本来の若齢林の樹高より高い樹高が算出されていた。該当箇所を右下に示す。一方、9 齢級以上の結果は、比較的、妥当な地位指数の推定結果だった。

サンプル数：2,310

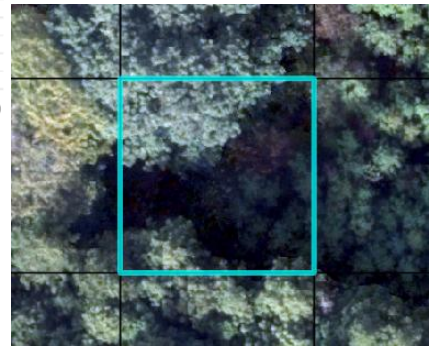
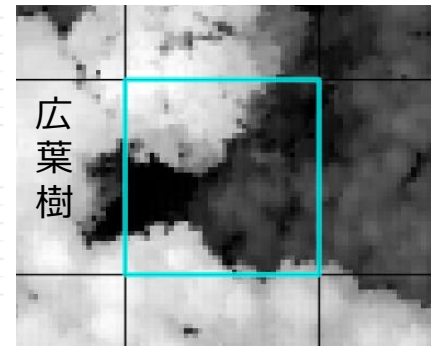
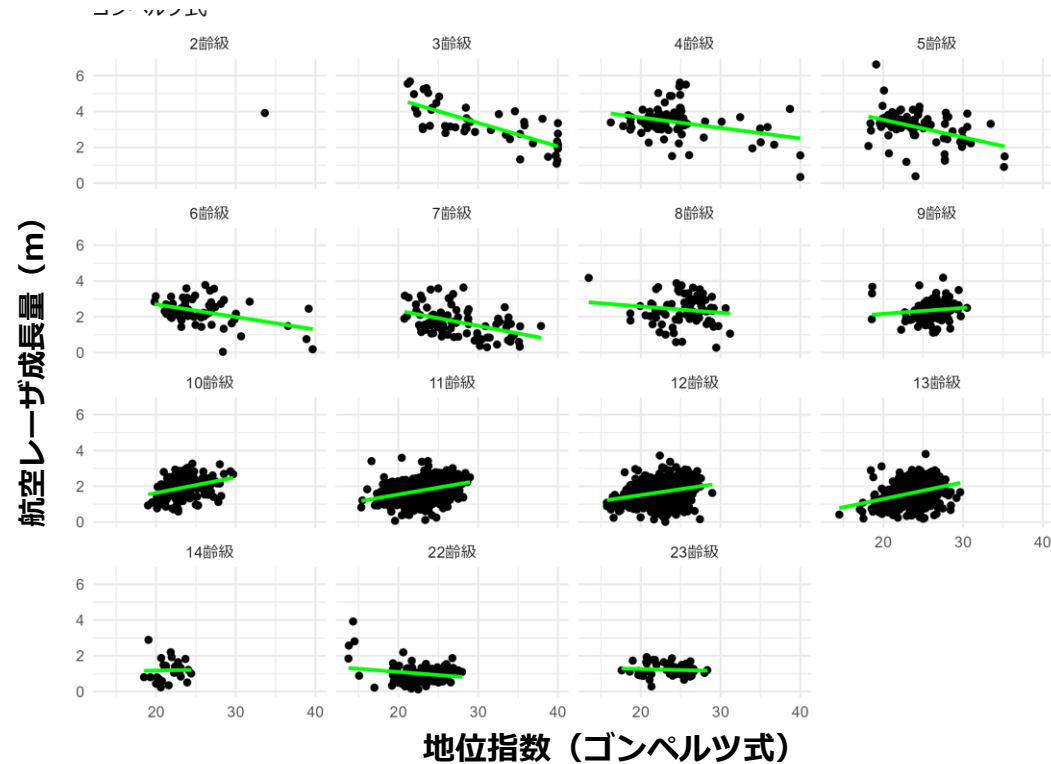
林齢に対して樹高が高く算出される箇所の例

H30航空レーザ樹高（横軸）と航空レーザ成長量（縦軸）

ゴンペルツ式



推定した地位指数（横軸）と航空レーザ成長量（縦軸）



航空レーザ成長量 (m)

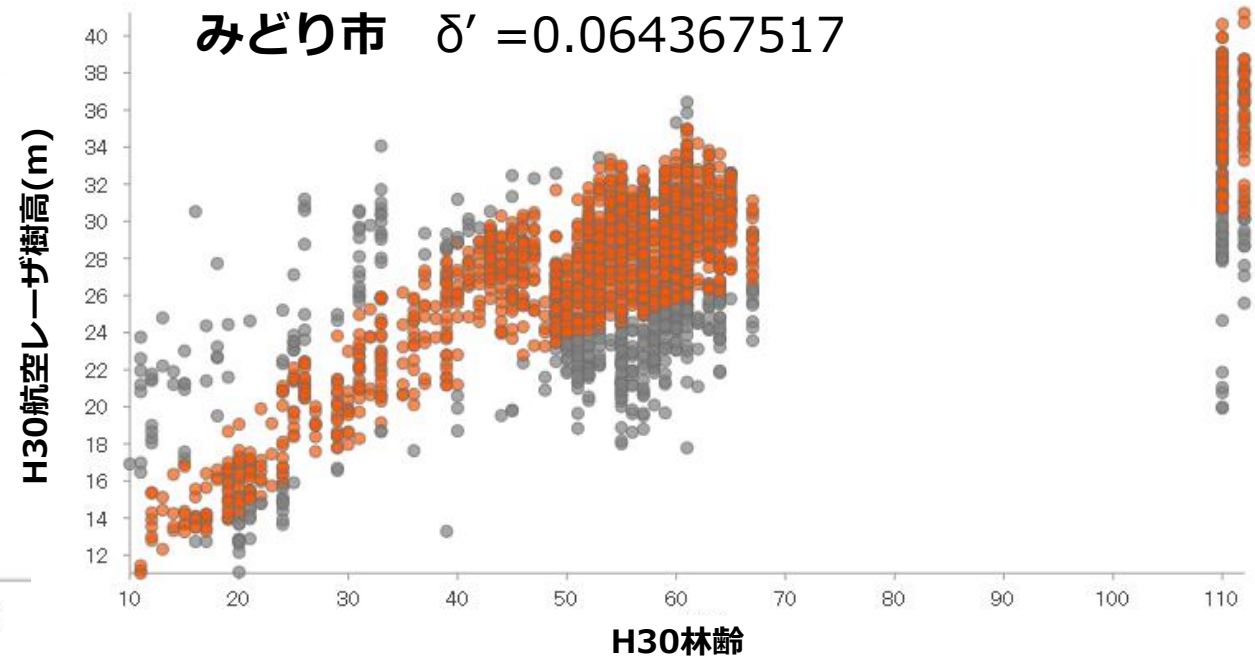
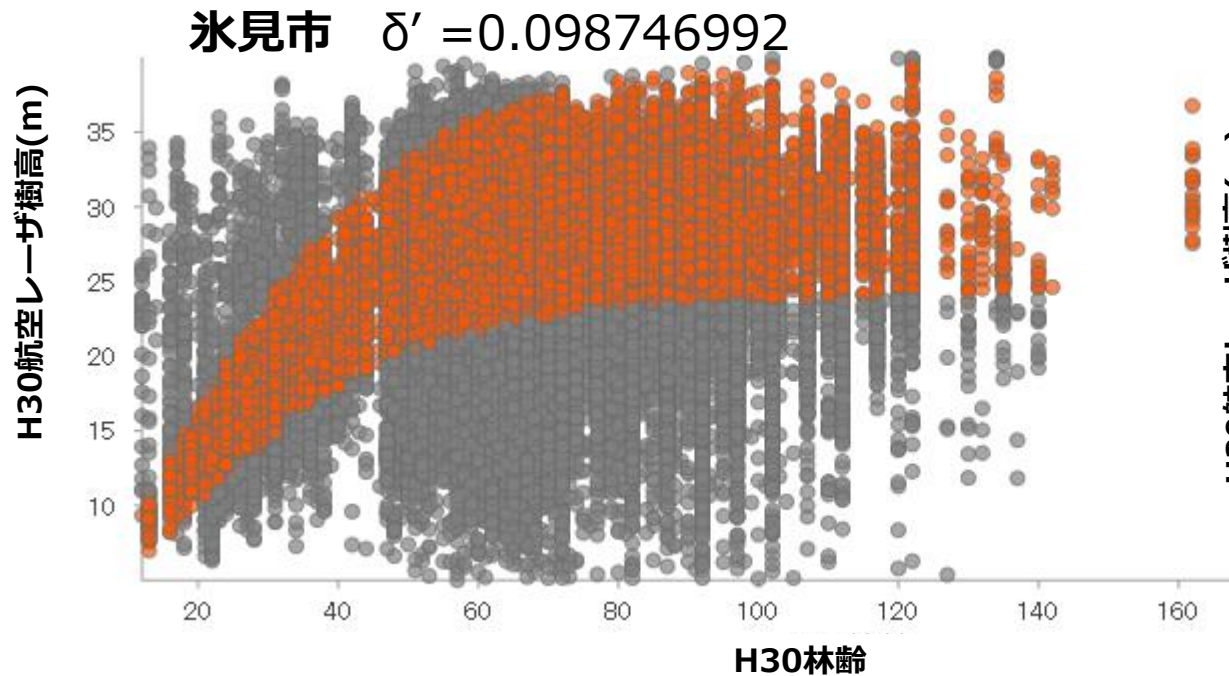
航空レーザ成長量 (m)



## (2) 地位指数分布図の作成 外れ値の除外

精度検証を行うにあたり、林齢と航空レーザ樹高の関係から外れ値と判断されるメッシュを除外した場合も検討した。外れ値の基準を定量的に設定するため、山田・村松(1971)<sup>1</sup>を参考に、独自に作成した樹高成長曲線と平均偏差率( $\delta'$ )を用いて、林齢に対する樹高の上限と下限を算出した。外れ値を除外した結果、残ったメッシュから推定される地位指数は、氷見市は最小17.9、最大29.6、農工大は最小20.9、最大28.8となったため、比較的保守的な外れ値の設定であると考えられる。

$$\text{樹高の上限値または下限値} = (1 \pm m * \delta') \times \text{推定樹高} \quad \leftarrow m=2.5$$



<sup>1</sup>山田茂夫・村松保男「再訂増補 例解測樹の実務」(1971)

## (2) 地位指数分布図の作成

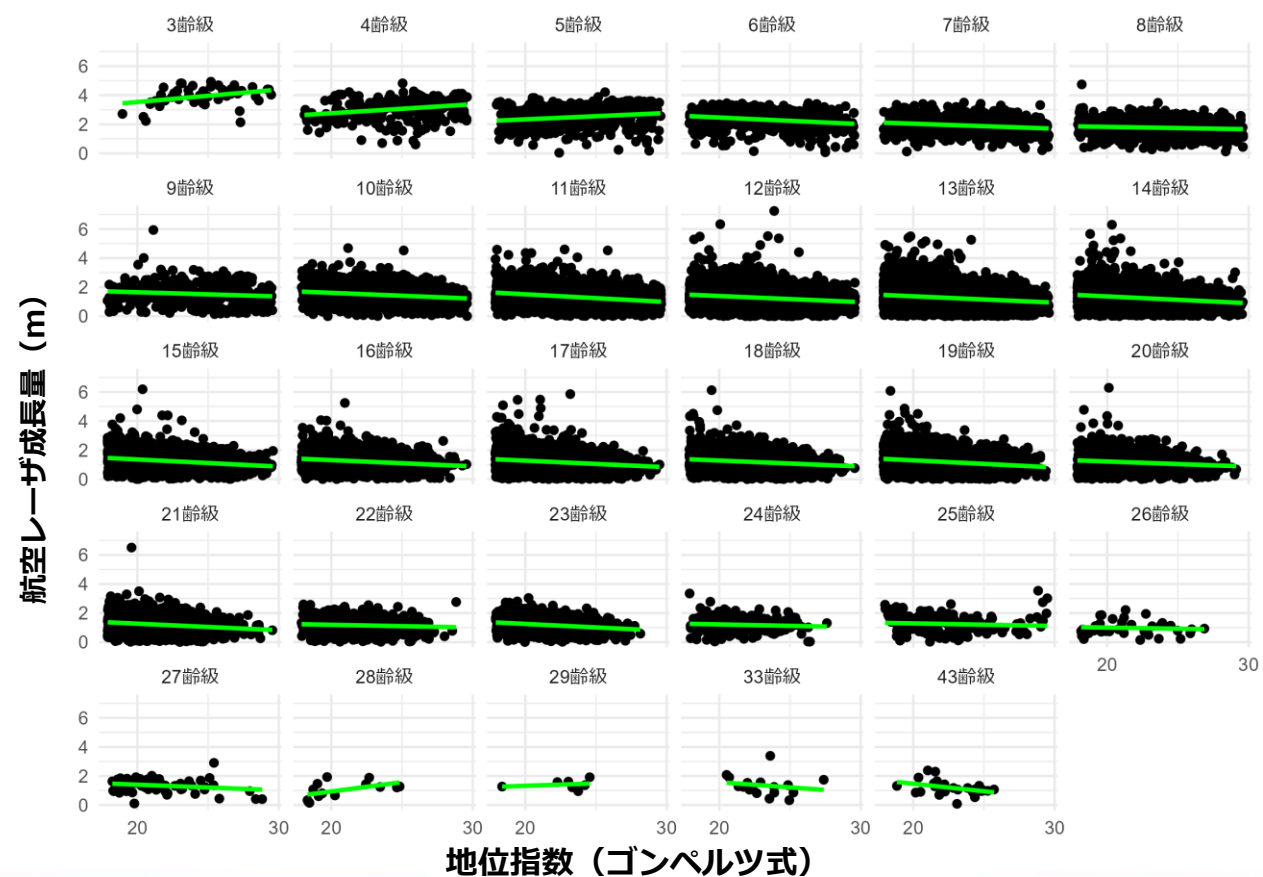
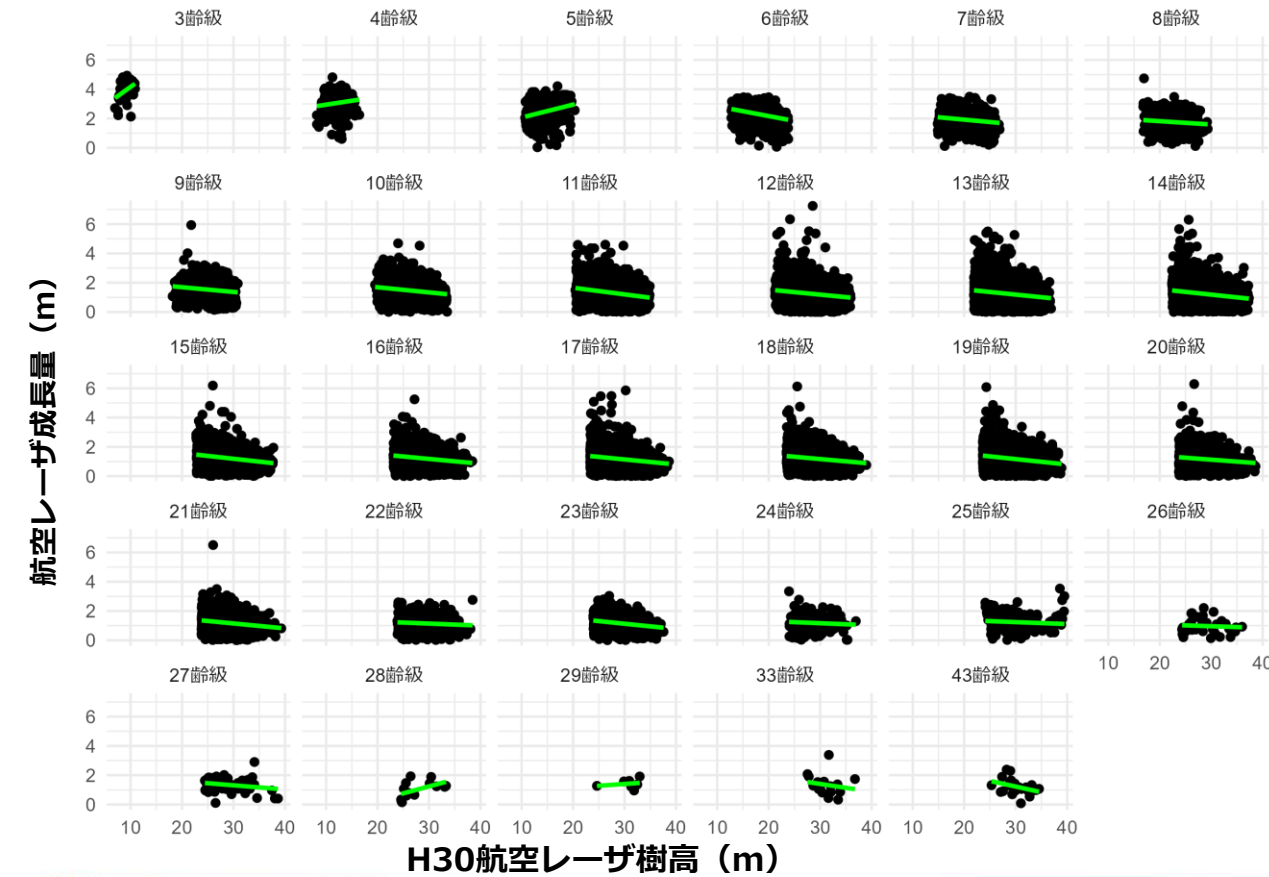
## 妥当性確認① 外れ値除外

氷見市の外れ値を除外したデータの、樹高と成長量の関係、地位指数と成長量の間を以下に示す。若齢林は「地位指数が高い = 成長量大きい」関係が若干みられ、高齢林では成長量に差がなくなっていたため、外れ値を除いたデータについては、比較的、妥当な地位指数の推定結果となっていると考えられる。

サンプル数：60,501

H30航空レーザ樹高（横軸）と航空レーザ成長量（縦軸）

推定した地位指数（横軸）と航空レーザ成長量（縦軸）



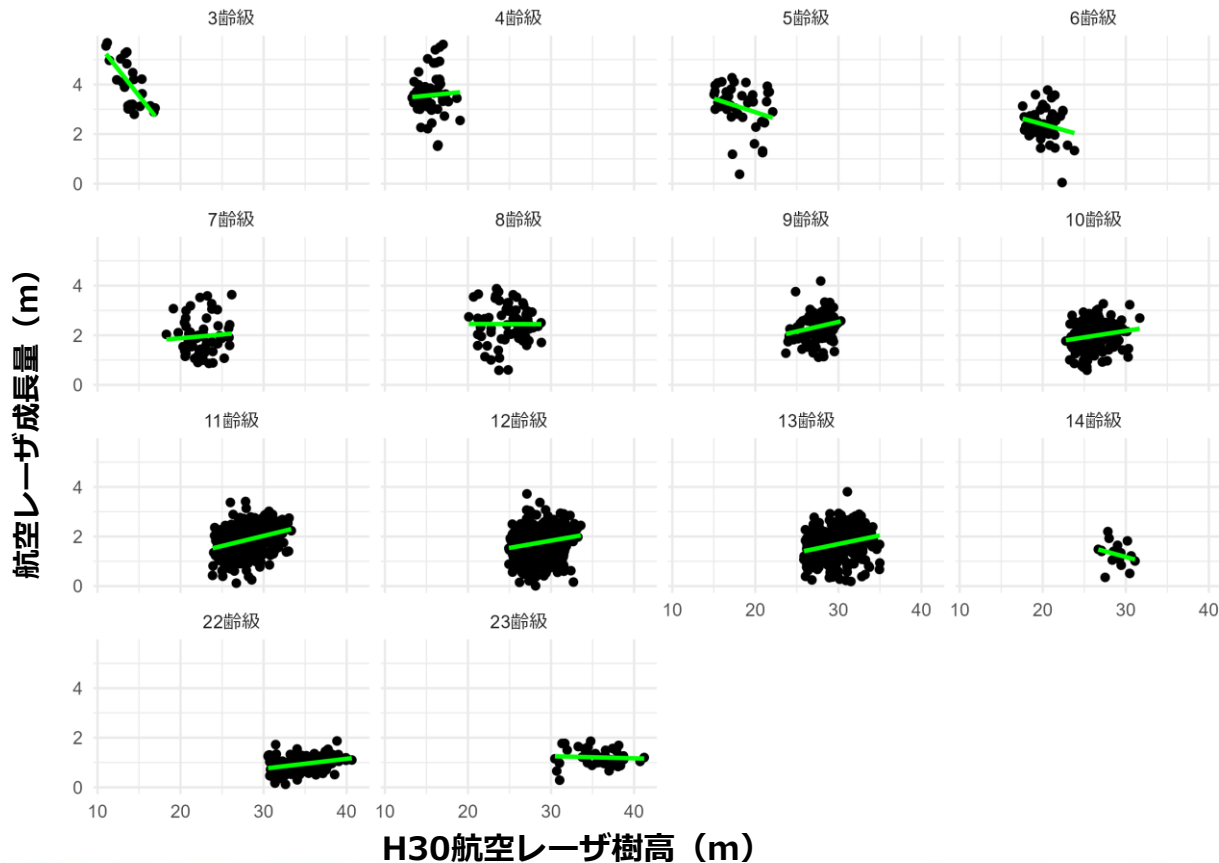
## (2) 地位指数分布図の作成

## 妥当性確認① 外れ値除外

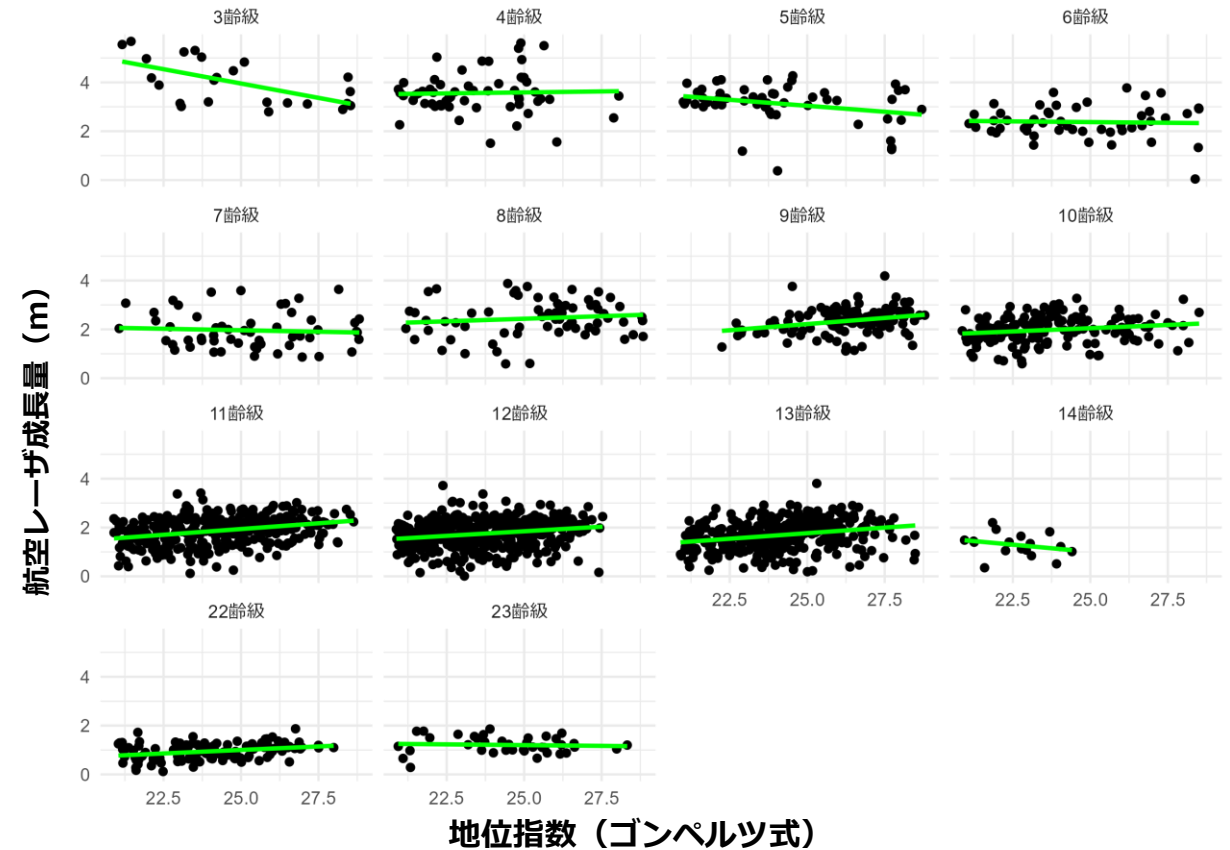
みどり市の外れ値を除外したデータの、樹高と成長量の関係、地位指数と成長量の関係を以下に示す。3~6齢級では、まだ「地位指数が高い=成長量大きい」の逆の傾向を示したが、8齢级以上については、比較的、妥当な地位指数の推定結果となっていると考えられる。

サンプル数：1,874

H30航空レーザ樹高（横軸）と航空レーザ成長量（縦軸）



推定した地位指数（横軸）と航空レーザ成長量（縦軸）

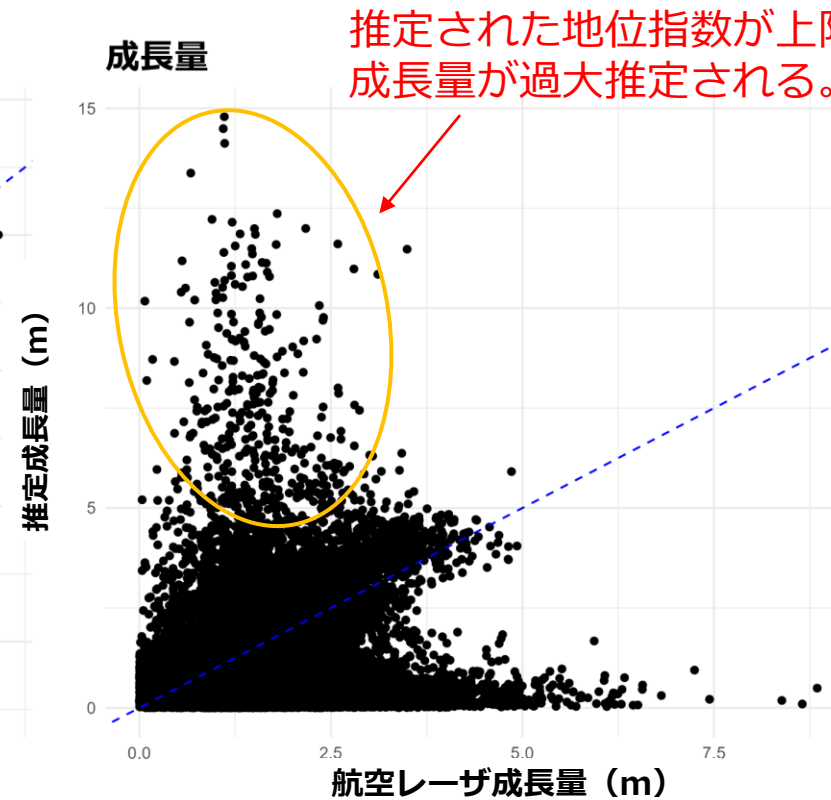
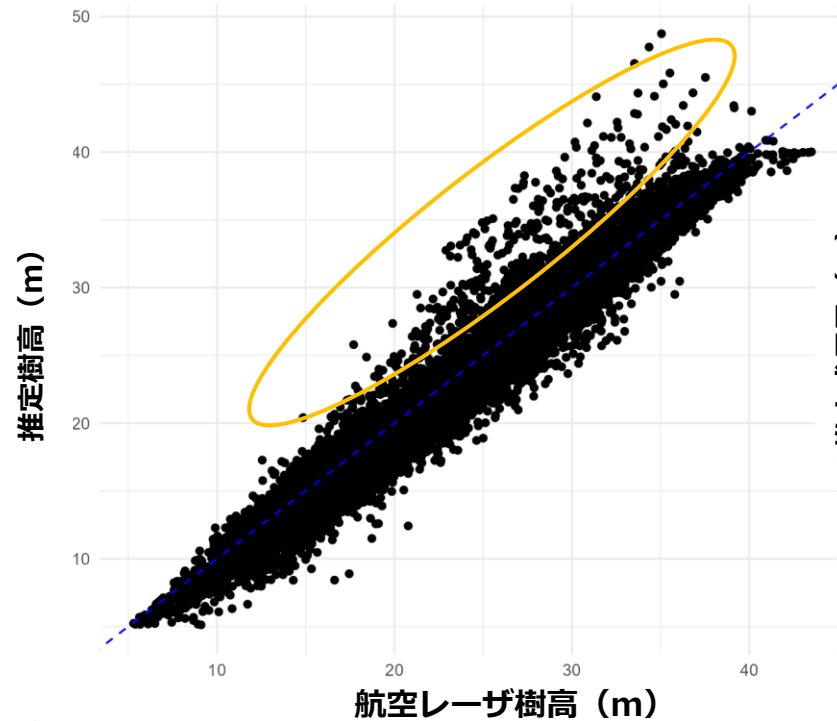


## (2) 地位指数分布図の作成

## 妥当性確認②

妥当性確認②として、樹高成長曲線の作成に利用していないR6航空レーザを正解データとして、推定樹高と推定成長量を比較した。左下の図がR6樹高、右下の図が成長量を比較した結果である。多くのデータがX=Yの線付近に集中していたが、一部のデータは樹高と成長量が過大推定されていた。また、サンプルの精度検証と全データの精度検証の結果はどちらもゴンペルツ式の精度が良かったが、外れ値除外後はミッチャーリッヒ式が良かった。総合的に判断し、サンプルの精度検証と全データの精度検証どちらも精度の高かったゴンペルツ式を採用することとした。

・ゴンペルツ式 サンプル数：75,225  
R6樹高



サンプル数：75,225

モデル	成長量RMSE(m)
ゴンペルツ式	1.22
ミッチャーリッヒ式	1.22
リッチャーズ式	1.24

外れ値除外後 サンプル数：60,501

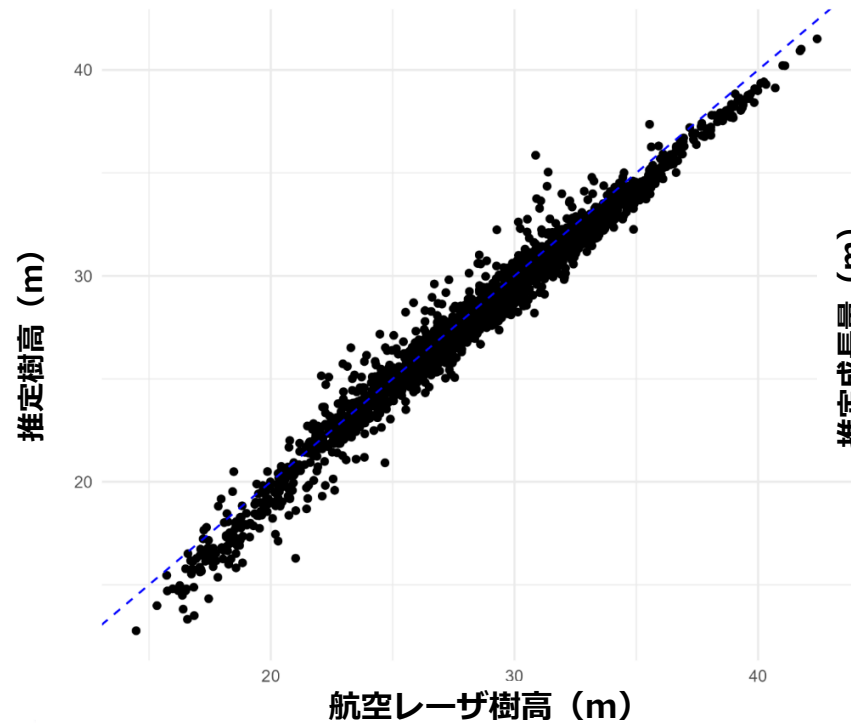
モデル	成長量RMSE(m)
ゴンペルツ式	0.95
ミッチャーリッヒ式	0.89
リッチャーズ式	0.93

## (2) 地位指数分布図の作成

## 妥当性確認②

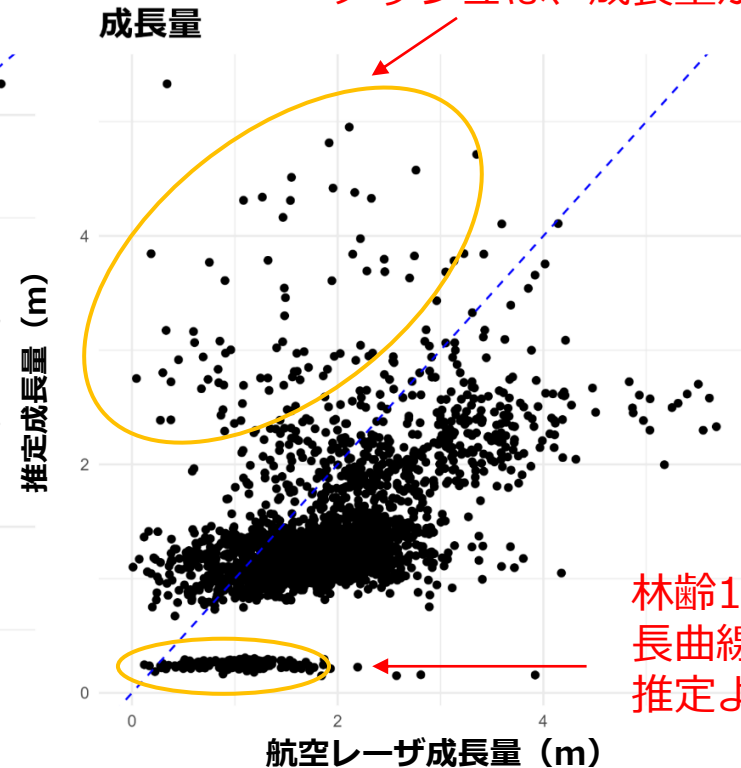
みどり市の場合も、多くのデータが $X=Y$ の線付近に集中していたが、一部のデータは成長量が過大推定されていた。また、林齢が110年以上の高齢林で成長量が過小推定される傾向が確認された。この要因として、樹高成長曲線で高齢林の成長の停滞を予測する一方、現地には局所的に成長を続ける林分が存在する可能性が考えられる。サンプルでの精度検証はリッチャーズ式の精度が最も良かったが、全体データと外れ値除去後のデータで精度精度が良かったゴンペルツ式を採用することとした。

・ゴンペルツ式 サンプル数：2,310  
R6樹高



推定された地位指数が上限の40付近かつ林齢が若いメッシュは、成長量が過大推定される。

サンプル数：2,310



モデル	成長量RMSE(m)
ゴンペルツ式	0.90
ミッチャーリッヒ式	0.94
リッチャーズ式	0.96

外れ値除外後 サンプル数：1,874

モデル	成長量RMSE(m)
ゴンペルツ式	0.83
ミッチャーリッヒ式	0.84
リッチャーズ式	0.84

林齢110年以上の高齢林のメッシュは、樹高成長曲線で成長の停滞が予測されるが、実際には推定よりも成長していた。



### 地位指数分布図の妥当性の検証結果まとめ

#### 妥当性確認①

- 地位指数の推定結果が妥当な場合、若齢林ほど「地位指数が高い＝成長量大きい」傾向を示すはずだが、氷見市もみどり市も、若齢林で逆の傾向を示していた。要因としては林齢情報が間違っていたり、メッシュ内に樹高の異なる林分（対象林分より樹高が高い林分など）が混在することにあると考えられる。
- 林齢が正確で林分が一様なデータでは比較的安定した地位指数の精度が期待できる。しかし、データ利用時には、上述した要因により推定精度が低下するメッシュが存在する可能性を考慮する必要がある。

#### 妥当性確認②

- 樹高成長曲線の推定樹高と推定成長量を航空レーザと比較した散布図では、多くのデータが $X=Y$ の線付近に集中していたが、一部のデータは樹高と成長量が過大推定されていた。その多くが、地位指数が上限の40付近で、林齢が若いメッシュであった。
- みどり市のデータは、林齢が110年以上の高齢林で成長量が過小推定される傾向が確認され、これ樹高成長曲線が推測する成長の停滞期を超えて、実際は成長を続ける林分が存在することが推察される。
- 氷見市、みどり市について、全体データで成長量のRMSEが最も小さいゴンペルツ式を採用することとした。氷見市のRMSEは1.22m、みどり市のRMSEは0.9mであり、比較的高い推定精度と考えられる。

## (2) 地位指数分布図の作成

## 地形データに基づく地位指数の推定

森林の地位は、地形、土壌、水分、日射量といった様々な環境条件に影響されることが先行研究で報告されている。そこで、本業務では、林野庁マニュアルの地位指数推定に加え、傾斜・地上開度・TWIを用いて、地形データから地位指数推定が可能かについても検証した。検討時、富山県<sup>1</sup>、福岡県<sup>2</sup>、山形県<sup>3</sup>の先行事例（地形データを用いた地位指数評価）を参考にした。地位指数の正解データとして40年生林分の航空レーザ樹高を使用した。サンプルが不足したため38～42年生の林分の樹高を使用した。みどり市は林齢に幅をもたせてもサンプルが不足したため、氷見市のみで検証を実施した。

### <作業概要>

- ① 38～42年生の林分を抽出する
- ② 20mメッシュで樹高、傾斜、地上開度、TWIを集計する
- ③ 地位指数と各指標の相関関係を確認する
- ④ 相関のある指標と地位指数で回帰分析をする

### <20mメッシュに集計するデータ>

集計情報	氷見市
樹高（平均値）	H30航空レーザDCHM
傾斜（平均値）	H30航空レーザ傾斜量図
地上開度（平均値）	H30航空レーザ地上開度
TWI（平均値）	H30航空レーザTWI

#### ◆地上開度

ある地点から空が見える範囲を数値化した指標

#### ◆TWI（地形湿潤指数）

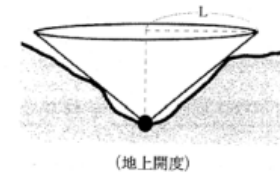
$$TWI = \ln(a / \tan\beta)$$

a：集水面積

特定の地点に水が流れ込む上流の面積。この値が大きいほど、その地点に集まる水の量が多いことを示す。

β：傾斜角（ラジアン）

傾斜が緩やかなほど、水が滞留しやすいことを示す。



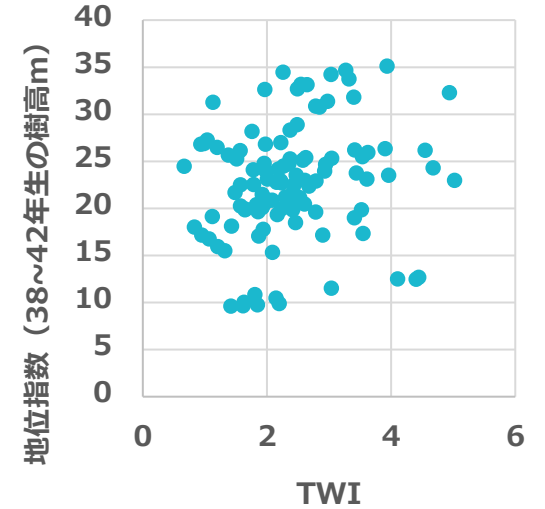
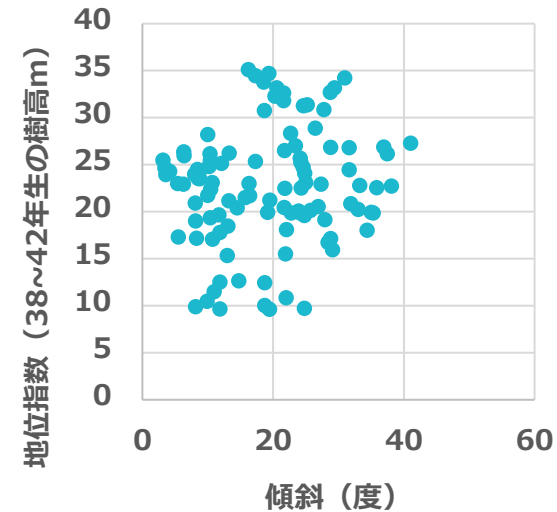
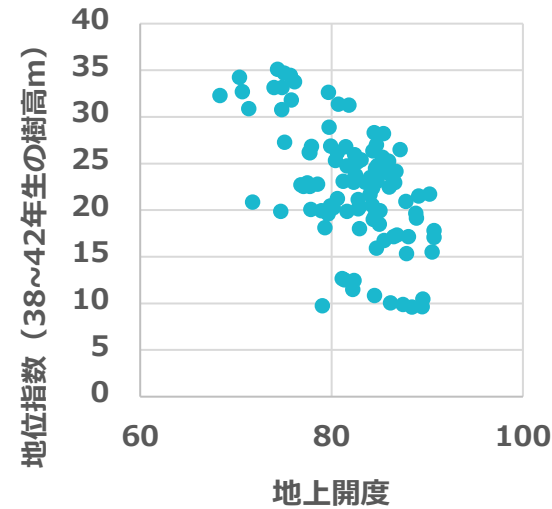
<sup>1</sup>関子光太郎「富山県におけるスギ生育適地の空間分布推定のための数値地形解析に関する研究」（2010）<sup>2</sup>鶴崎幸・檜崎康二「高精度な林地生産力分布図を搭載した森林管理支援システムの構築」（2018）<sup>3</sup>森林研究研修センター森林生態保全部「林業に適した森林の詳細マップの作成」（2023）

## (2) 地位指数分布図の作成

## 地形データに基づく地位指数の推定

まず、地形データと地位指数（40年生の樹高）の相関関係を確認した。相関係数が絶対値0.5以上の場合に中程度の相関があるとしたところ、地上開度のみ負の相関を示し、傾斜やTWIには有意な相関は認められなかった。地上開度が低いということは、凸型の地形であることを表している。一般的に、スギは谷部で成長が良い傾向があるため、地上開度と地位指数に相関がみられたと考えられる。次に、地上開度と地位指数を用いて単回帰分析をした。また、富山県の論文の既存式を今回のサンプルに適用した場合の精度も確認した。結果は、単回帰分析はRMSE = 5.07m、既存式はRMSE = 6.27mと、いずれも推定精度は低かった。

相関係数		サンプル数：107	
	地位指数	傾斜	TWI
地位指数			
傾斜	0.14		
TWI	0.19	-0.51	
地上開度	-0.56	-0.47	-0.29

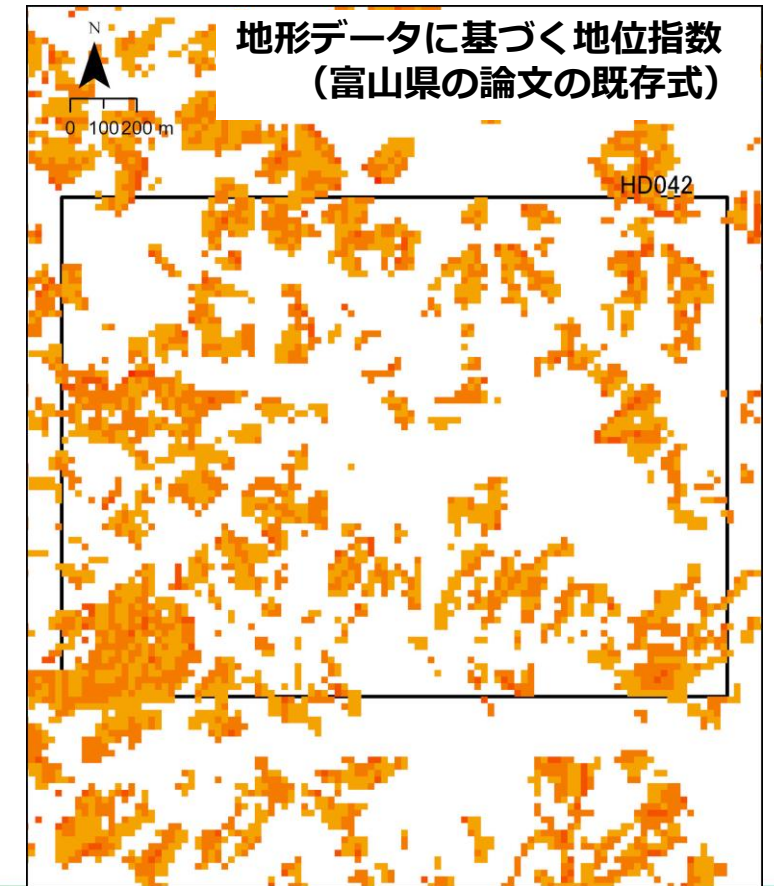
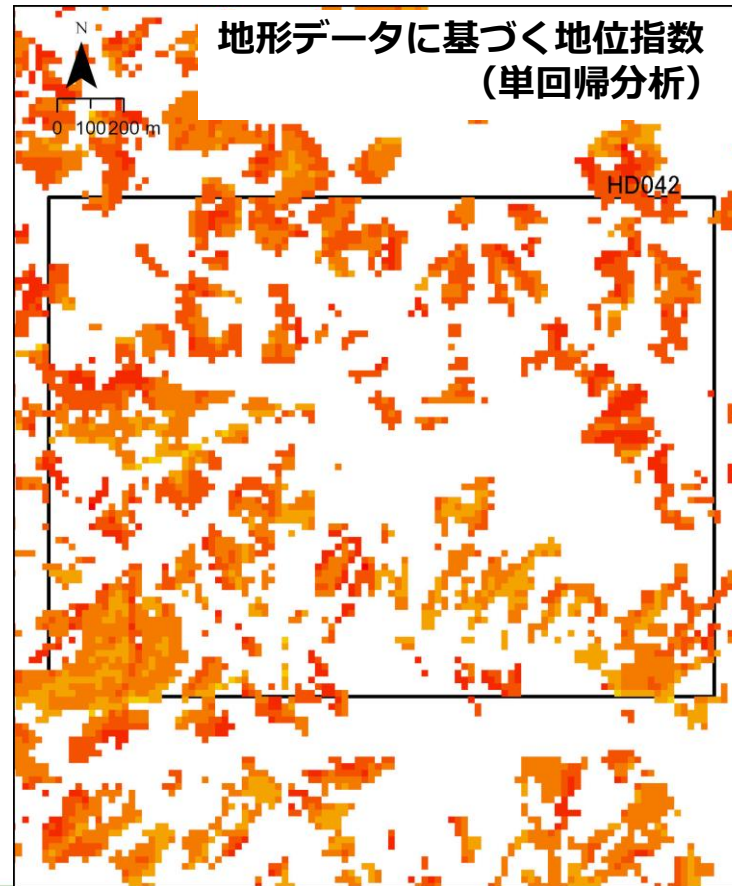
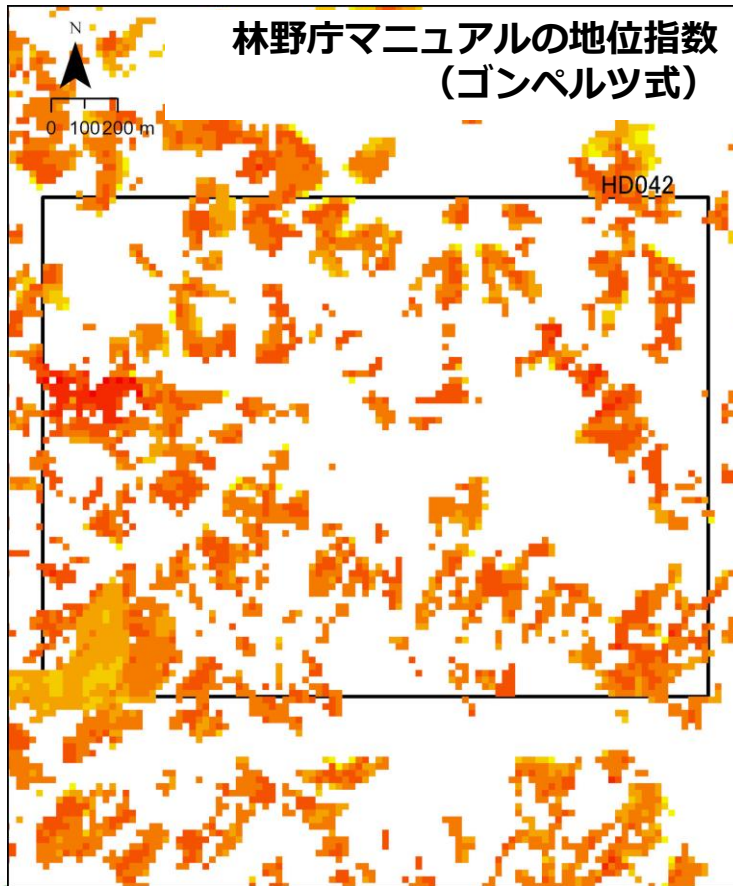


式の情報		決定係数	RMSE	AIC
今回作成した式	地位指数 = $80.7796 + (-0.7063 * \text{地上開度})$	0.3139	5.07	655.0719
富山県の論文の既存式	地位指数 = $25.476 + (1.771 * \text{TWI}) + (-0.115 * \text{地上開度})$	-0.0484	6.27	-

## (2) 地位指数分布図の作成

## 地形データに基づく地位指数推定 まとめ

地形データに基づく地位指数を林野庁マニュアルで推定した地位指数と比較した結果、林野庁マニュアルで推定した地位指数が最も高い推定精度を示した。これは、林野庁マニュアルの地位指数は航空レーザ樹高から直接算出されるため、局所的な条件をより詳細に反映することが推測される。一方、地形データに基づく地位指数は、変動が小さく、局所的な条件を反映できていない可能性がある。本検証では、精度の高かった林野庁マニュアルの地位指数推定手法を採用することとした。





### (3) 収穫予想表の整理

今回使用する収穫予想表の概要を以下に示す。これらの収穫予想表に示される樹高成長曲線と、本業務で作成した地位指数および林齢を用いて、樹高を推定する。

留意点として、富山県の樹高成長曲線は10～50年生のデータに基づいて導出されているため、高齢林においては推定誤差が増大する可能性がある。また、林野庁の樹高成長曲線は地位による区分（地位指数）を考慮せず、林齢のみで樹高が決定される単一の曲線である。実際の林分では同一林齢でも様々な樹高の林分が存在するため、誤差が大きくなる可能性がある。

	富山県	群馬県	林野庁
収穫予想表名	富山県主要樹種林分収穫表 (S40年5月)	スギ収穫予想シミュレーション(林試樹高曲線)	林分密度管理図による収穫予想表作成の手順書（私有林スギ・ヒノキ・カラマツ人工林用）
作成年度	昭和40年度	平成15年度	令和7年度
樹高成長曲線	式の情報なかったため、本業務で作成→コルフ式	ミツチャーリツヒ式	コルフ式
地位	3区分	5区分	区分なし
対応林齢	10～50年	～117年	11～100年

### (3) 収穫予想表の整理

### 樹高成長曲線の比較

氷見市に適用した樹高成長曲線の内容を以下に示す。また比較のために本業務の地位指数の推定のために作成した樹高成長曲線を示す。富山県と林野庁の樹高成長曲線のモデルはどちらもコルフ式であった。また、各式に林齢=40を代入し求めた地位指数で比較すると、林野庁の樹高成長曲線は、富山県の三等地と同程度であった。富山県の樹高成長曲線から樹高を推定する際は、「(2) 地位指数分布図の作成」で推定した地位指数が最も近い式を採用した。

樹高成長曲線式				a	b	k	地位指数
収穫 予想表	富山県 (一等地)	コルフ式	$H = a \times \exp(-b \times \text{林齢}^{-k})$	117.4331589	6.77239908	0.391003	23.7
	富山県 (二等地)			131.670683	6.778877833	0.350795	20.5
	富山県 (三等地)			221.1454885	6.983232387	0.273317	17.3
	林野庁 (裏東北・北陸**)			52.67	8.72784	0.56677	17.9
航空レーザに基づくモデル		ゴンペルツ式	$H = a \times \exp(-b \times \exp(-k \times \text{林齢}))$	31.89408231	2.632277168	0.054732	23.8

※地位指数分布図はゴンペルツ式の結果を採用

### (3) 収穫予想表の整理

### 樹高成長曲線の比較

みどり市に適用した樹高成長曲線の内容を以下に示す。群馬県の樹高成長曲線はミッチャーリッヒ式であった。また、各式に林齢=40を代入し求めた地位指数で比較すると、林野庁の樹高成長曲線は、群馬県の三等地と同程度であった。群馬県の樹高成長曲線から樹高を推定する際は、「(2) 地位指数分布図の作成」で推定した地位指数が最も近い式を採用した。

		樹高成長曲線式	a	b	k	地位指数	
収穫 予想表	群馬県 (一等地)	ミッチャーリッヒ式	$H = (46.45 - 3.80 \times a) \times (1 - b \times \exp(-k \times \text{林齢}))$	1	1.084	0.022	23.5
	群馬県 (二等地)			2			21.4
	群馬県 (三等地)			3			19.3
	群馬県 (四等地)			4			17.2
	群馬県 (五等地)			5			15.1
	林野庁 (北関東・東山)	ゴルフ式	$H = a \times \exp(-b \times \text{林齢}^{-k})$	34.45	12.59937	0.84181	19.6
航空レーザに基づくモデル		ゴンペルツ式	$H = a \times \exp(-b \times \exp(-k \times \text{林齢}))$	37.6319	1.52672	0.032576	24.9

※地位指数分布図はゴンペルツ式の結果を採用

## (3) 収穫予想表の整理

## 樹高成長曲線の比較

富山県および林野庁の樹高成長曲線、航空レーザに基づく樹高成長曲線の違いを把握するため、右のグラフで比較した。ただし、上層樹高の定義がモデルごとに異なる可能性がある点に留意が必要である。

### <富山県の樹高成長曲線>

50年生までのサンプルで作成されたため、50年生以降は外挿となり、成長傾向が過度に維持され、高齢林での樹高を過大に推定する可能性がある。

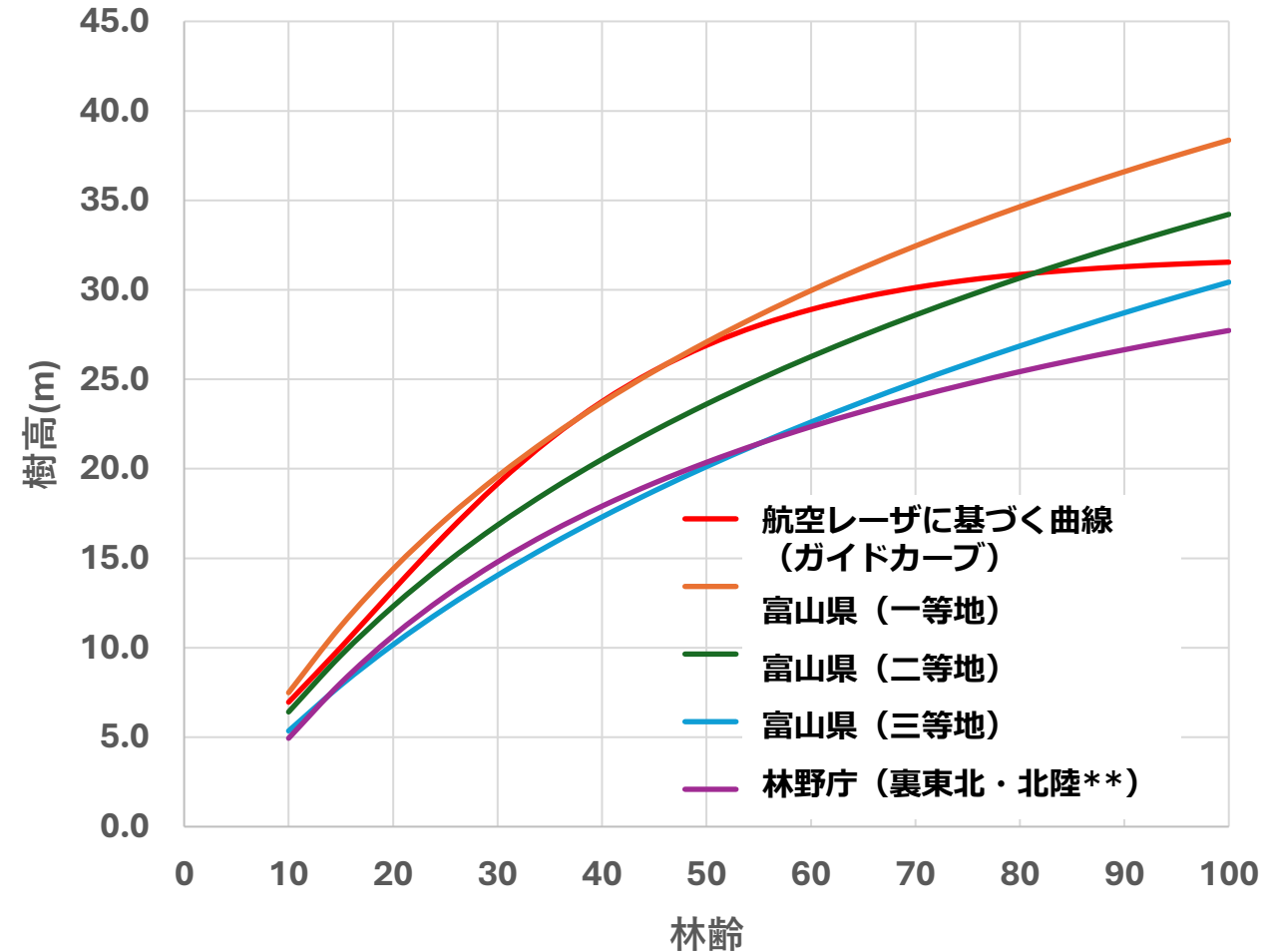
### <林野庁の樹高成長曲線（裏東北・北陸\*\*）>

約60年生まで富山県の三等地の曲線と概ね一致する。その後は全体的に推定樹高が小さくなる傾向を示す。

### <航空レーザに基づく樹高成長曲線（ゴンペルツ式）>

12～102年生のサンプルに基づいており、約50年生を境に成長が緩やかになる傾向を示す。

樹高成長曲線



### (3) 収穫予想表の整理

## 樹高成長曲線の比較

群馬県および林野庁の樹高成長曲線、航空レーザに基づく樹高成長曲線についても同様に比較した。

#### <群馬県の樹高成長曲線>

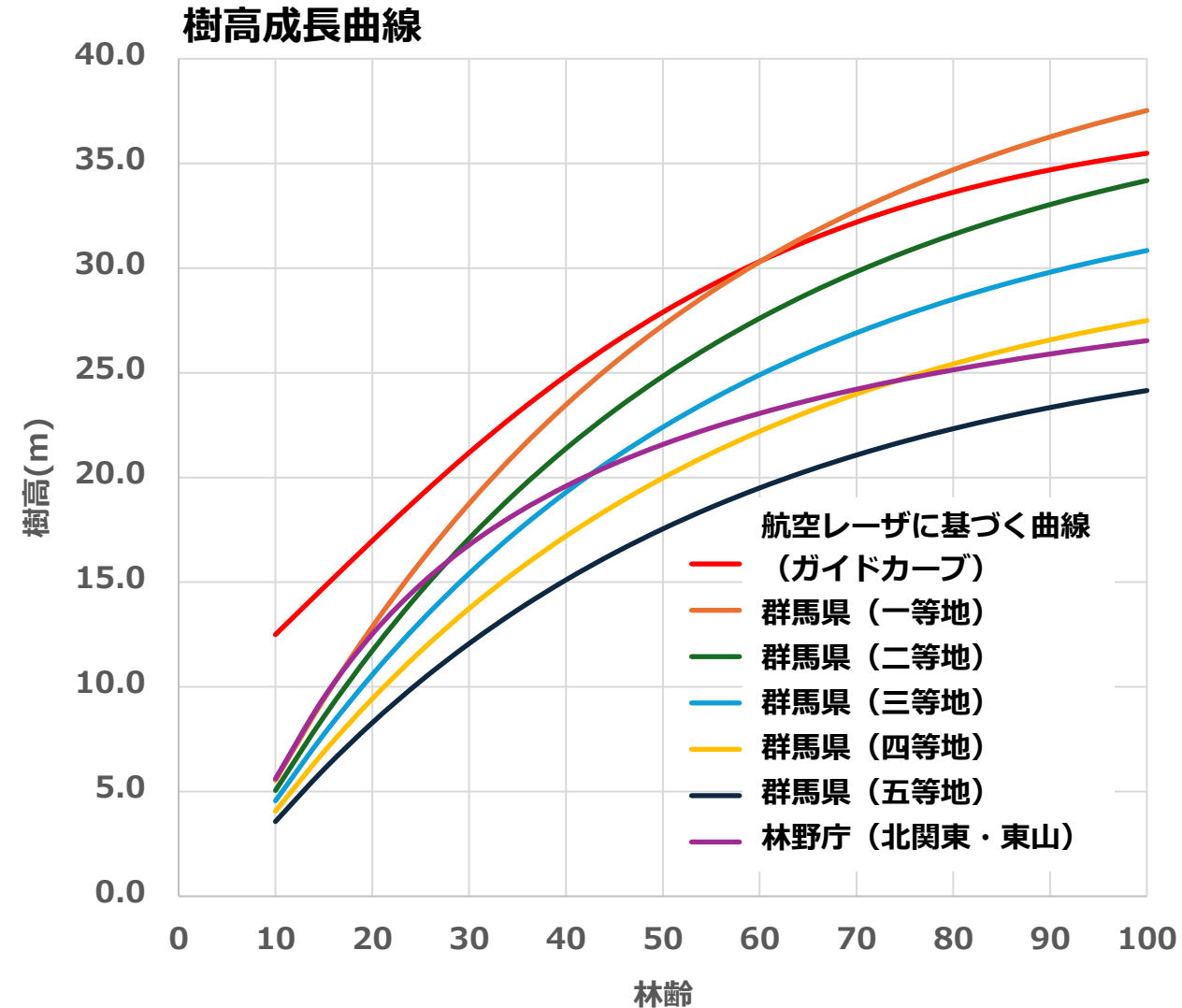
航空レーザに基づく曲線より初期成長が大きく、林野庁の曲線より成長が継続する傾向を示す。また、高齢林においても成長が持続している。

#### <林野庁の樹高成長曲線（北関東・東山）>

30年生頃までは富山県の一等地および二等地の推定樹高と概ね同程度である。しかし、40年生以降は徐々に成長が緩やかになる。

#### <航空レーザに基づく樹高成長曲線（ゴンペルツ式）>

50年生頃までは群馬県の一等地の曲線よりも推定樹高が大きいですが、その後は成長速度が徐々に低下していく。



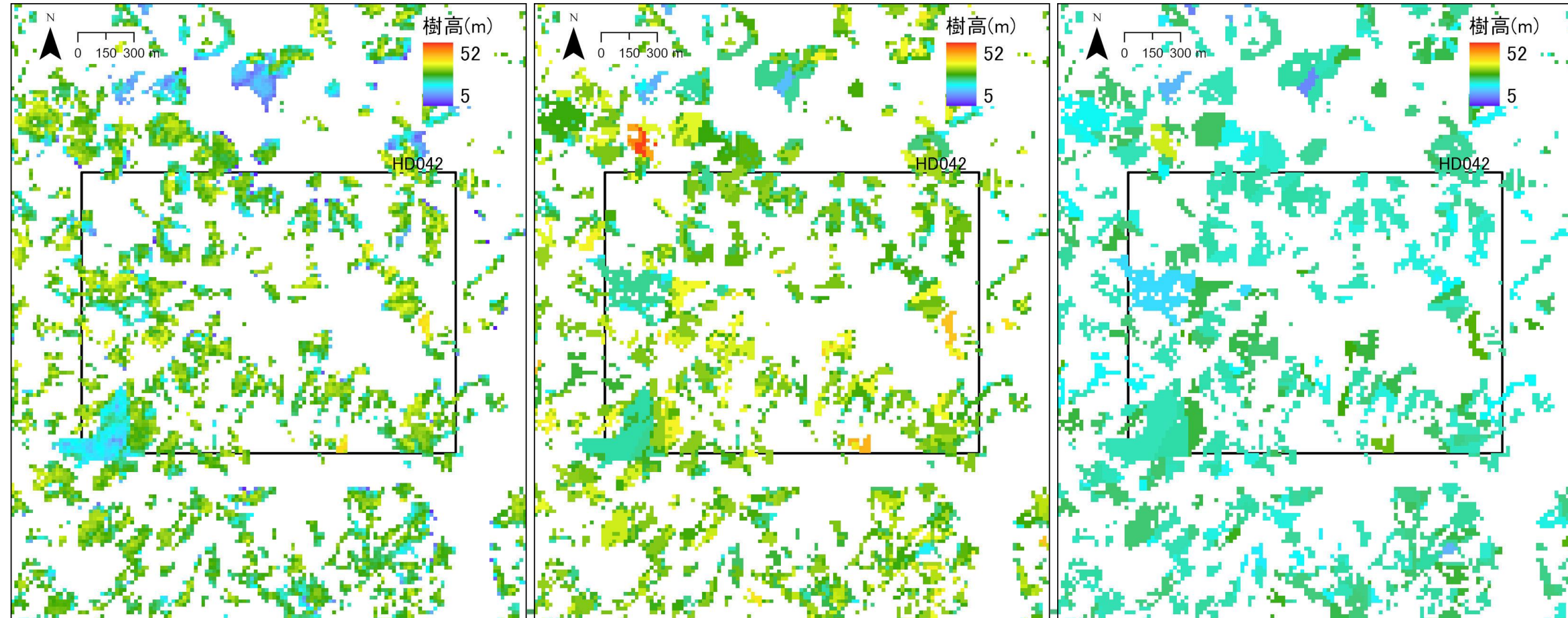
## (4) 各種収穫予想表に基づく樹高推定 H30樹高比較

H30の航空レーザ樹高、富山県の推定樹高、林野庁の推定樹高の分布図を以下に示す。比較の結果、富山県の推定樹高がより航空レーザ樹高と近いことが確認された。

航空レーザ樹高

富山県の樹高成長曲線の推定樹高

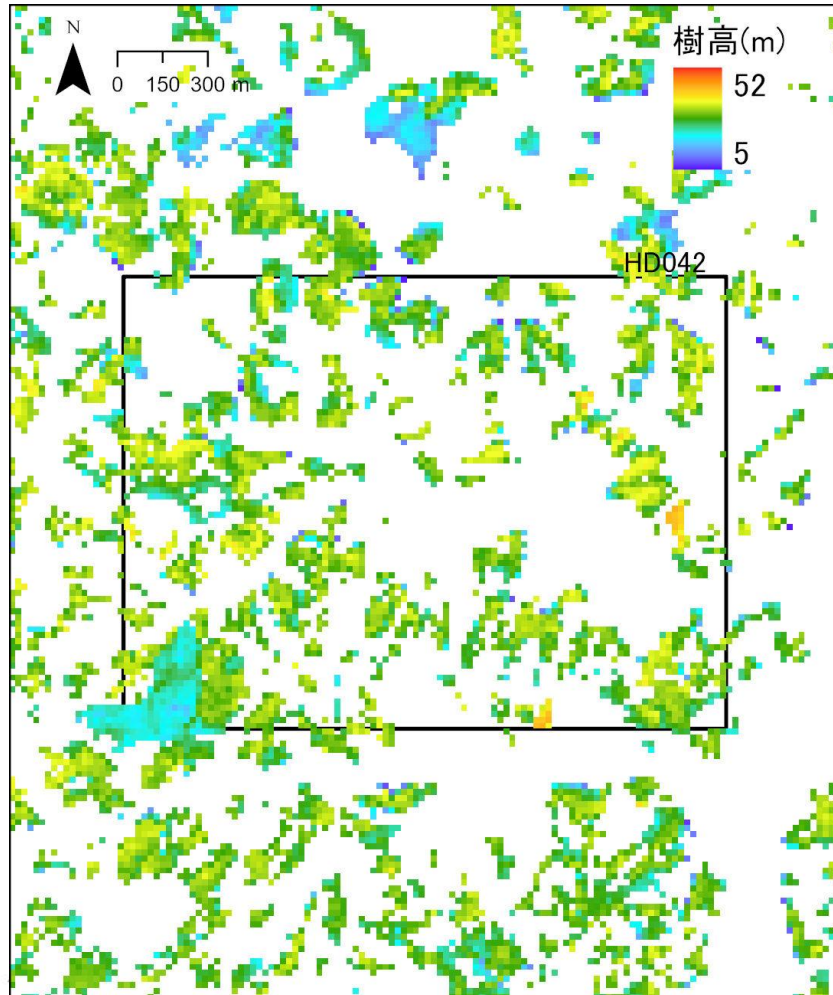
林野庁の樹高成長曲線の推定樹高



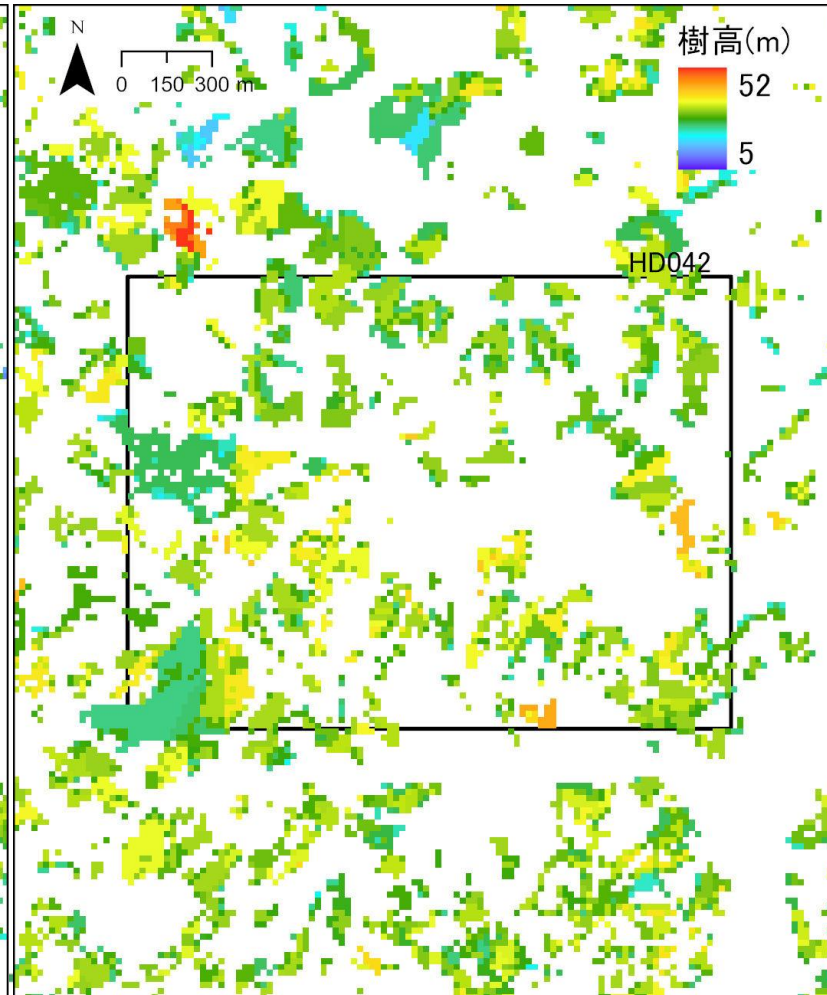
# (4) 各種収穫予想表に基づく樹高推定 R6年の樹高比較

R6の航空レーザ樹高、富山県の推定樹高、林野庁の推定樹高の分布図を以下に示す。比較の結果、富山県の推定結果がより航空レーザ樹高と近いことが確認された。

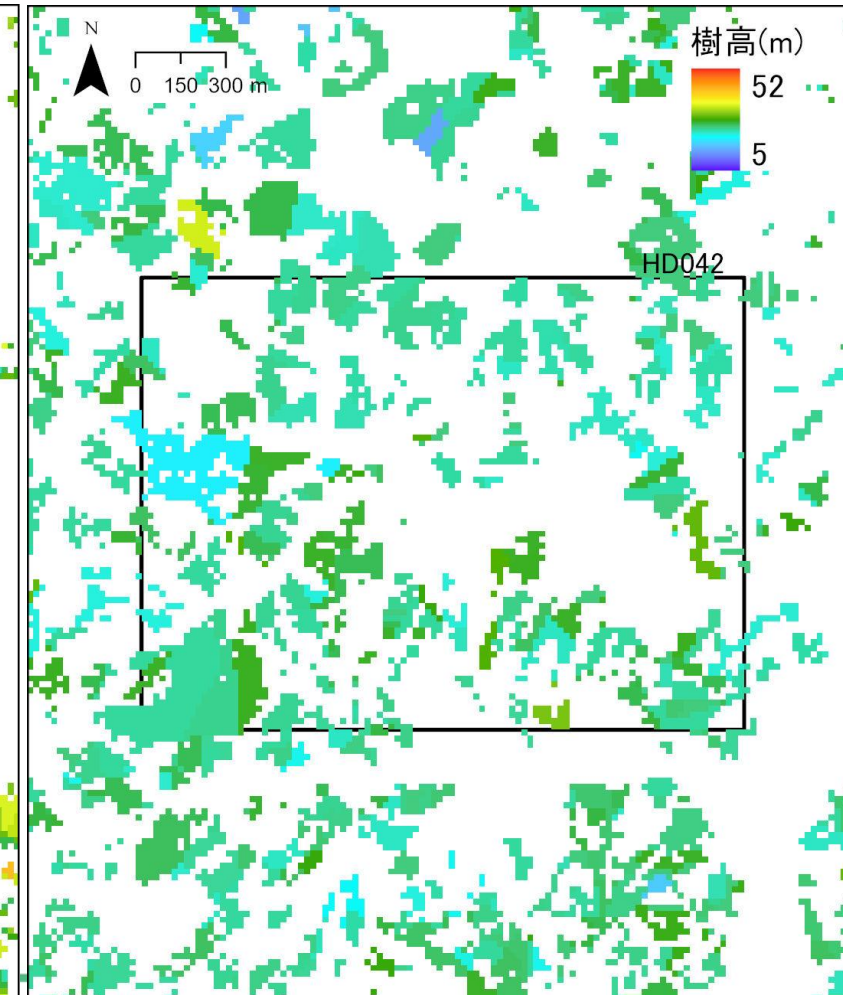
航空レーザ樹高



富山県の樹高成長曲線の推定樹高



林野庁の樹高成長曲線の推定樹高



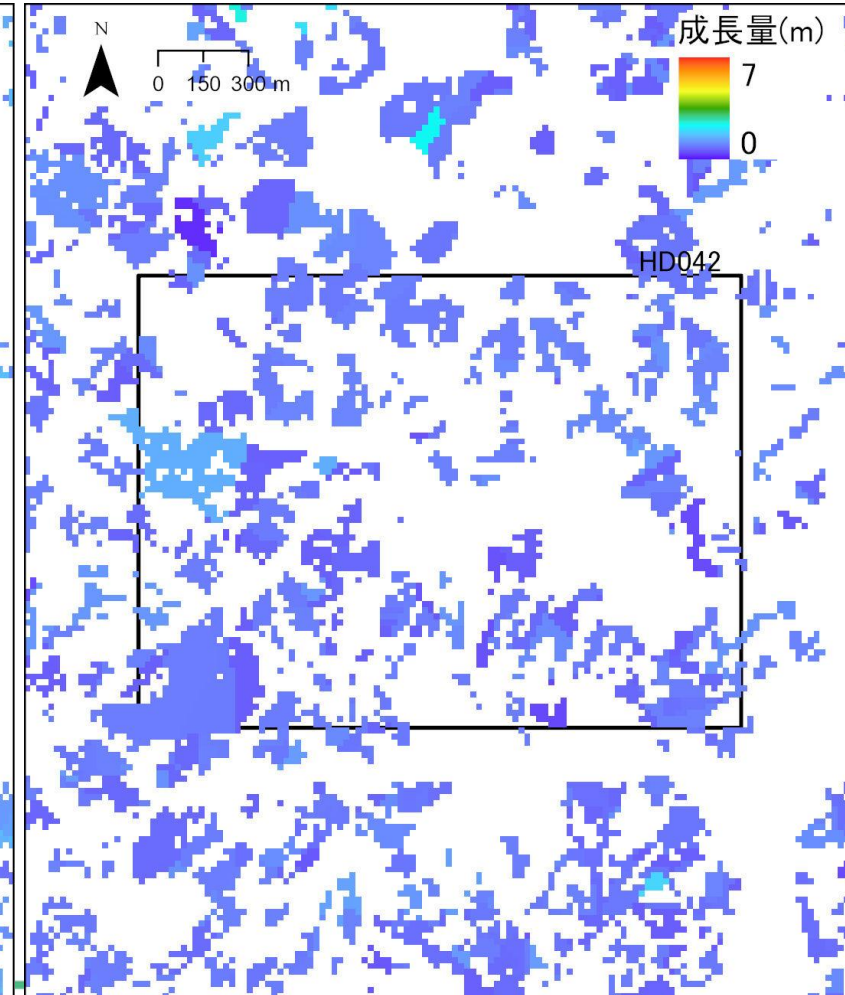
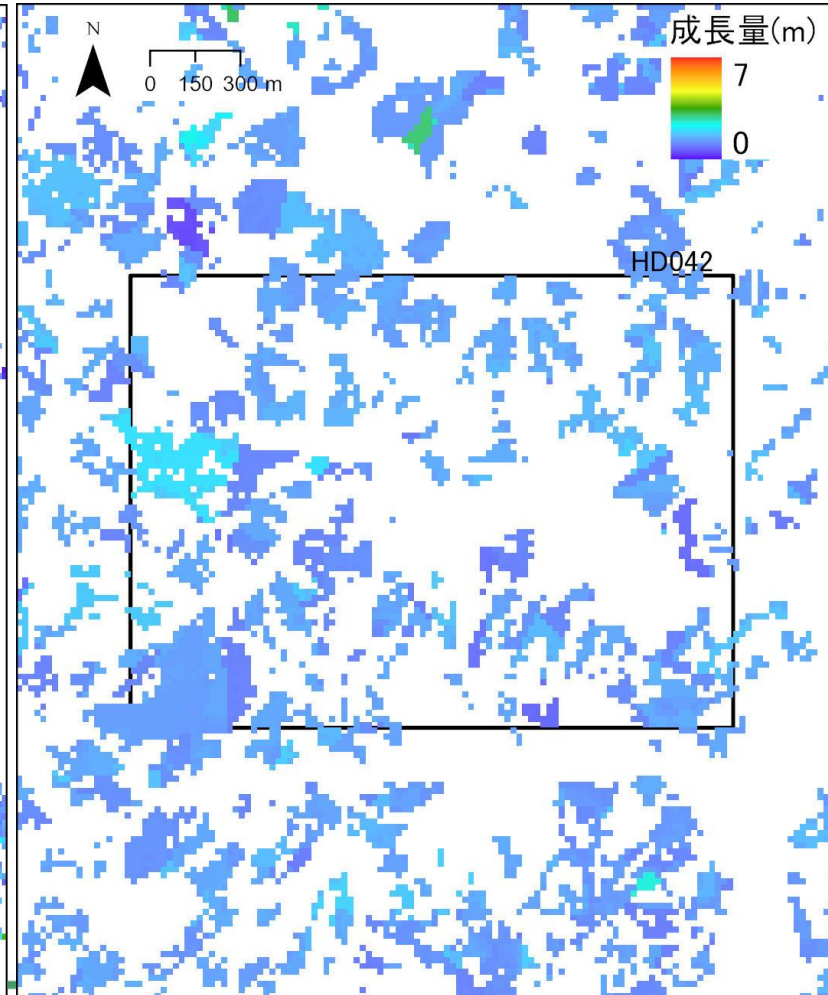
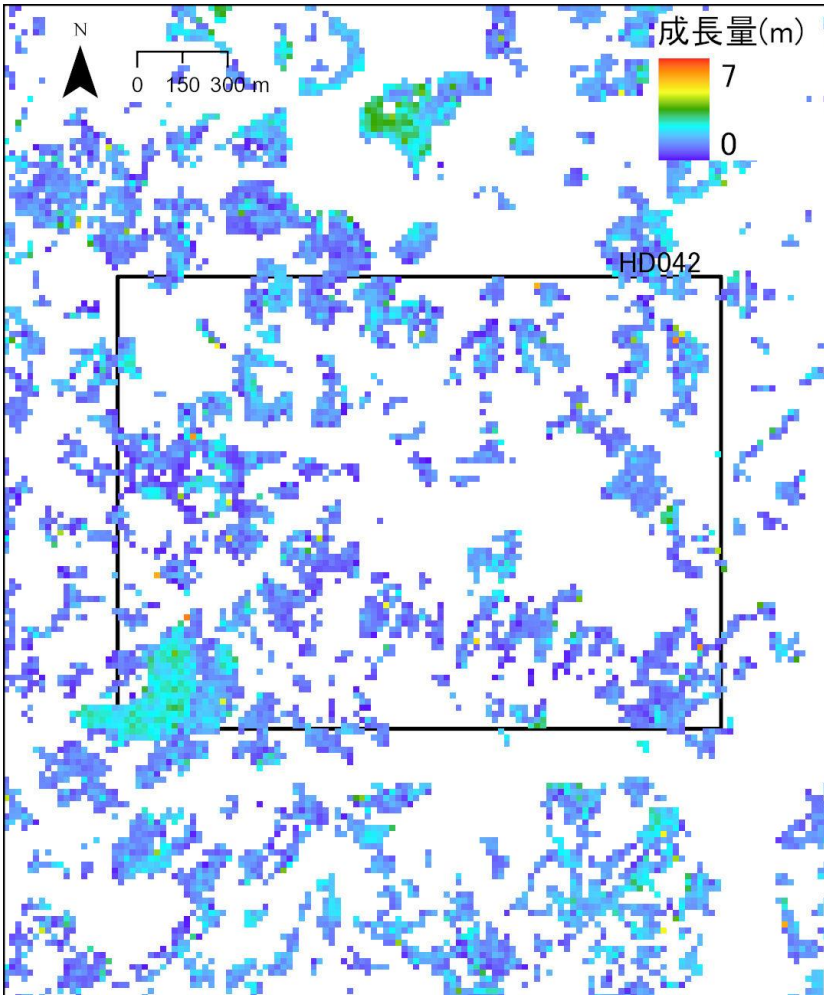
## (4) 各種収穫予想表に基づく樹高推定 2 時期の成長量比較

H30航空レーザとR6航空レーザの成長量、富山県の推定成長量、林野庁の推定成長量の分布図を以下に示す。比較の結果、富山県の推定成長量がより航空レーザ成長量と近いことが確認された。

航空レーザ成長量

富山県の樹高成長曲線の推定成長量

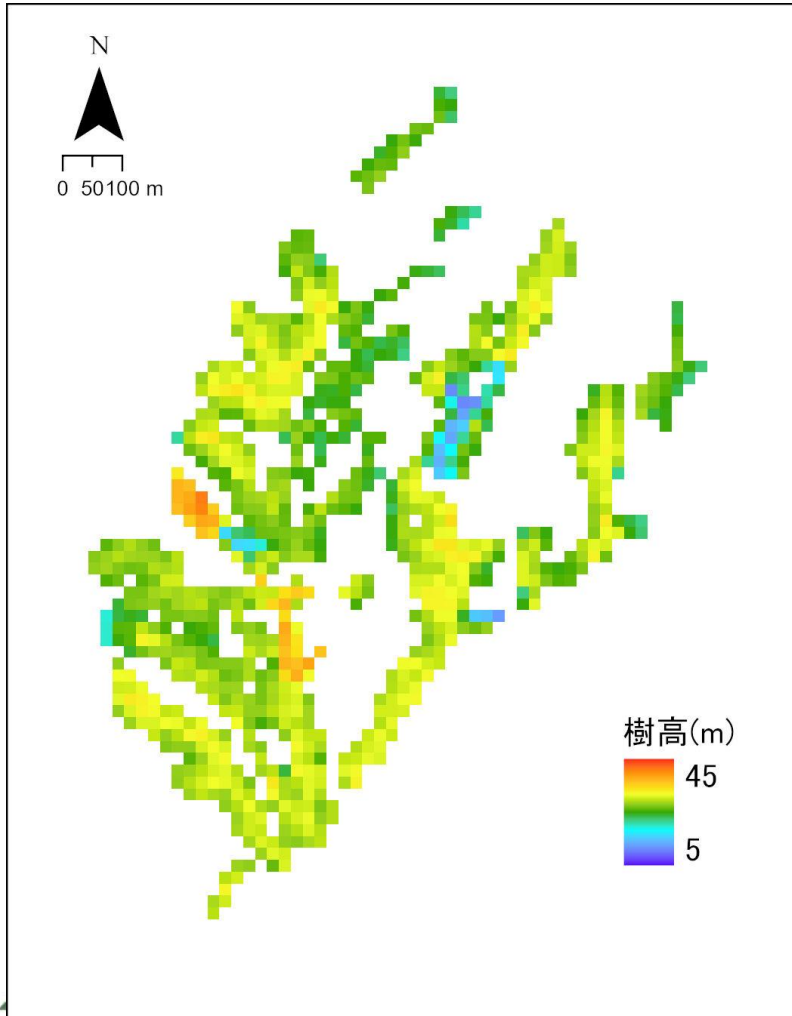
林野庁の樹高成長曲線の推定成長量



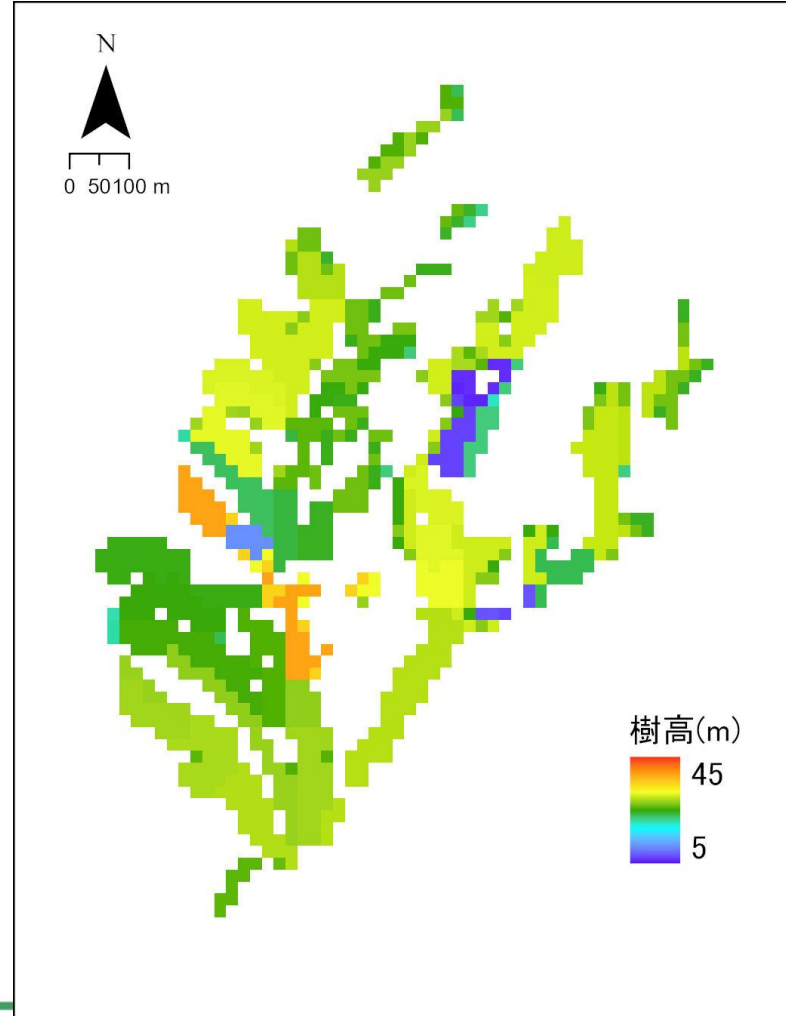
# (4) 各種収穫予想表に基づく樹高推定 H30年の樹高比較

みどり市も同様に確認した。H30樹高は、群馬県の推定樹高がより航空レーザ樹高と近いことが確認された。

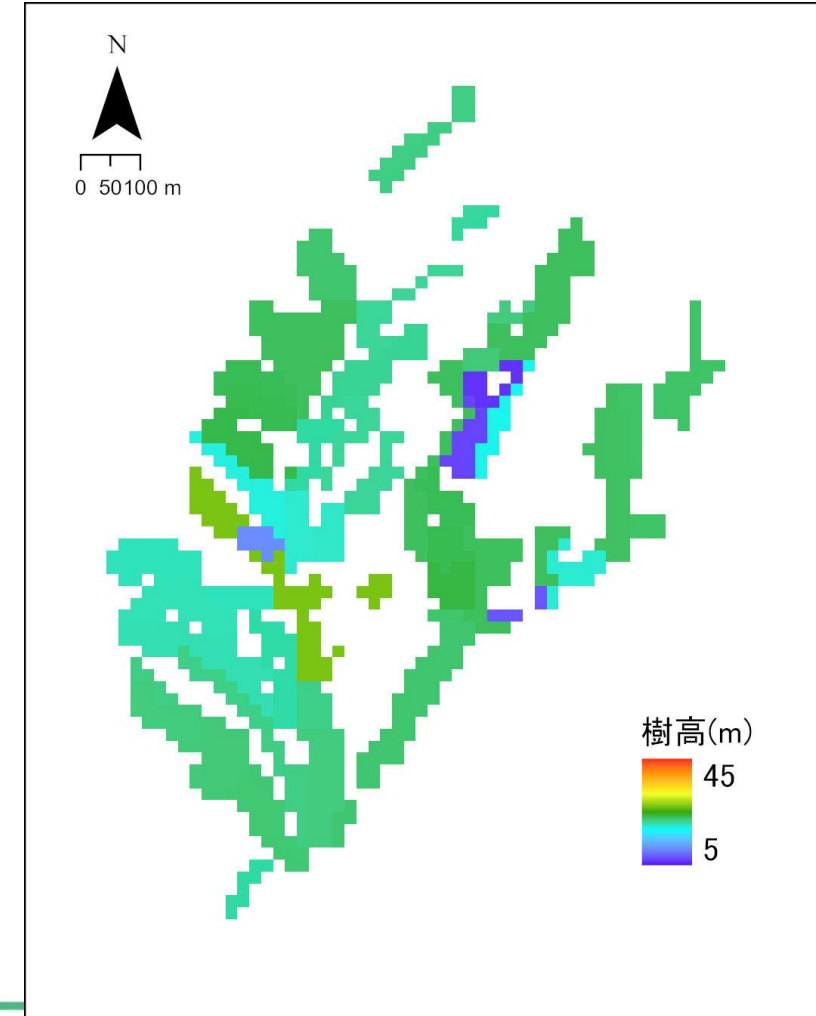
航空レーザ成長量



群馬県の樹高成長曲線の推定樹高



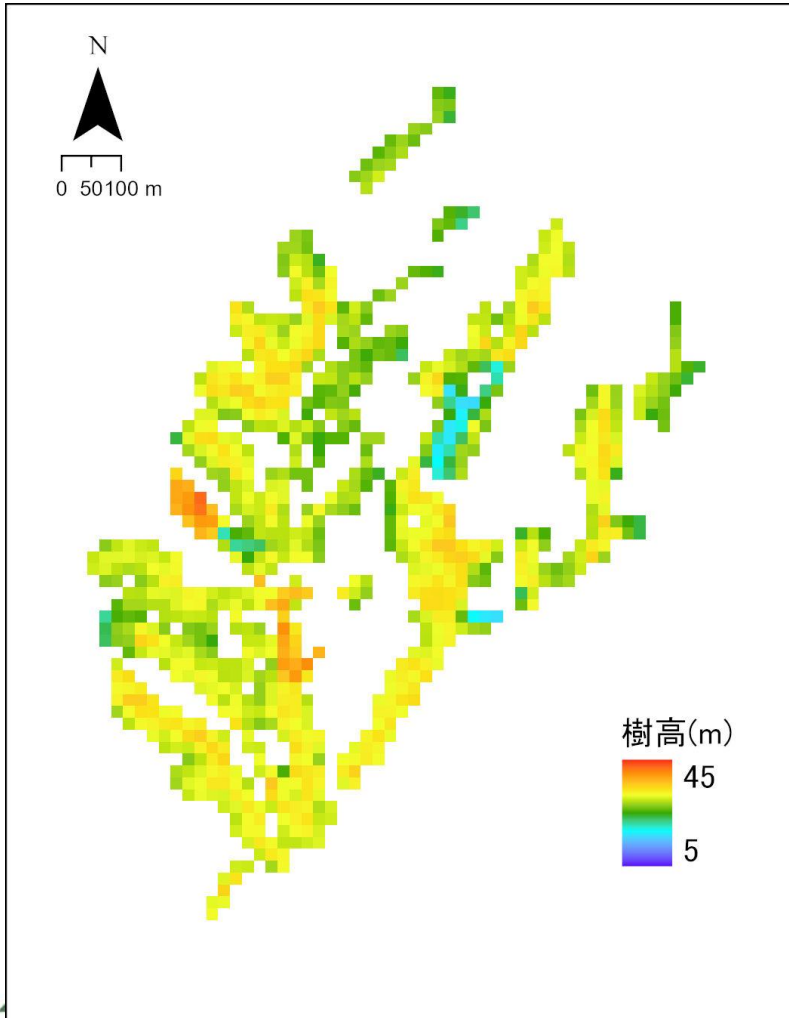
林野庁の樹高成長曲線の推定樹高



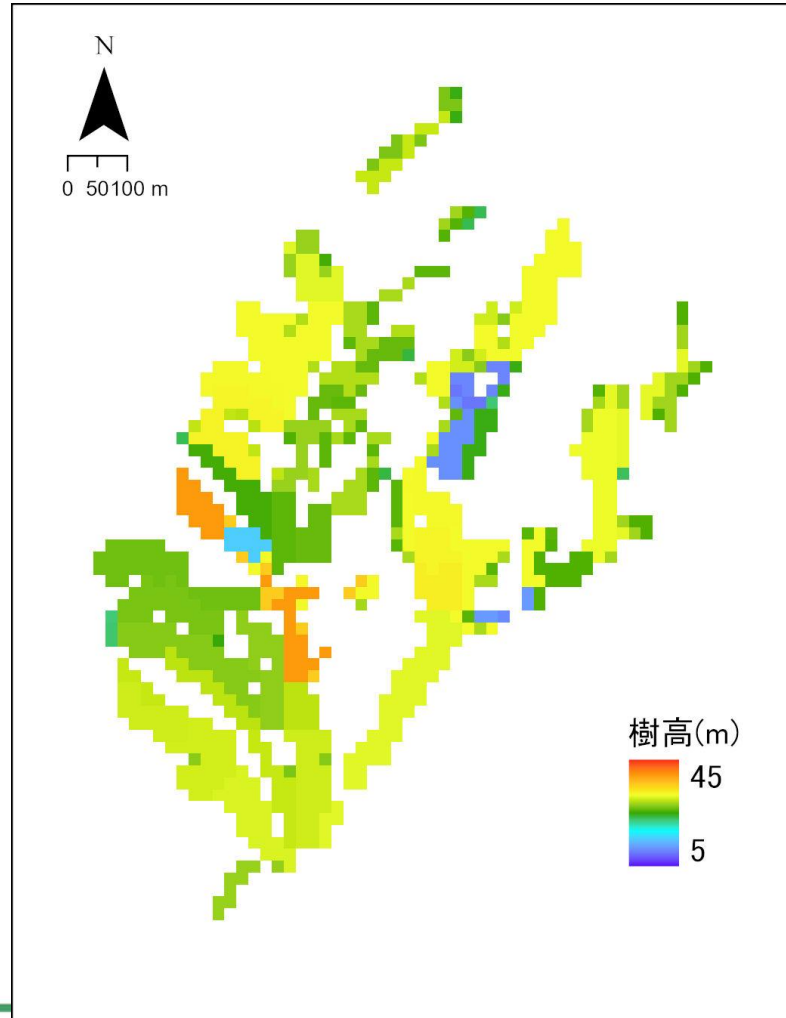
# (4) 各種収穫予想表に基づく樹高推定 R6年の樹高比較

R6樹高は、群馬県の推定樹高がより航空レーザ樹高と近いことが確認された。

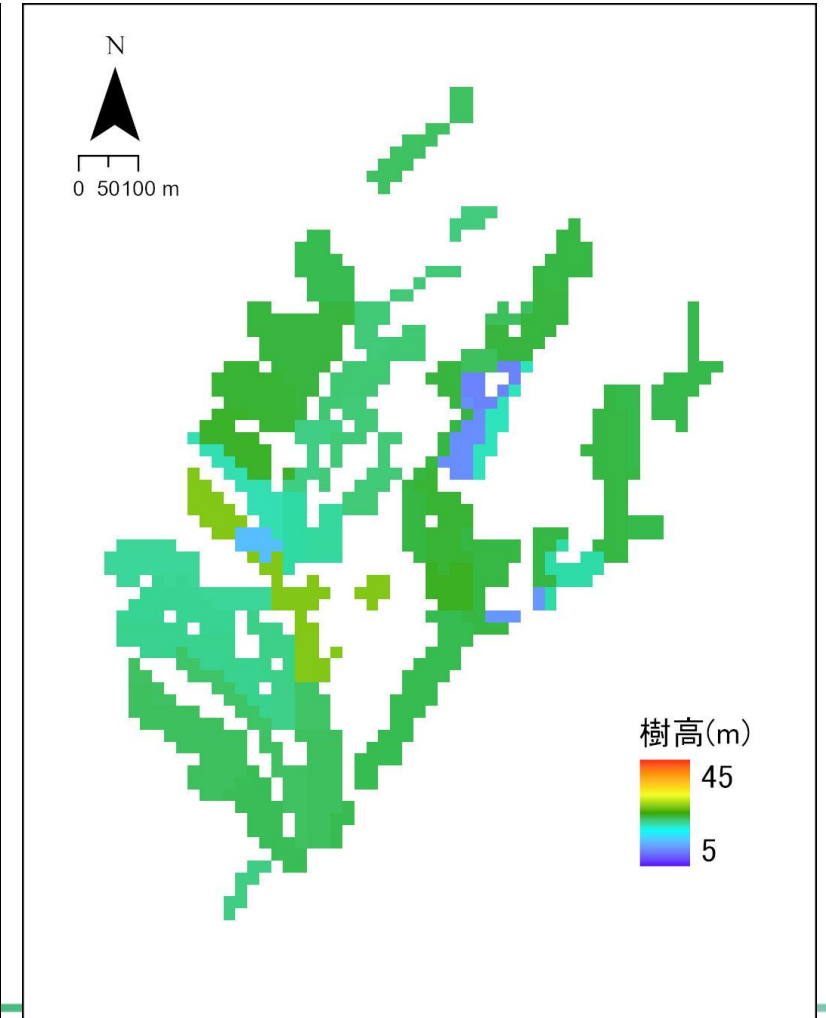
航空レーザ成長量



群馬県の樹高成長曲線の推定樹高



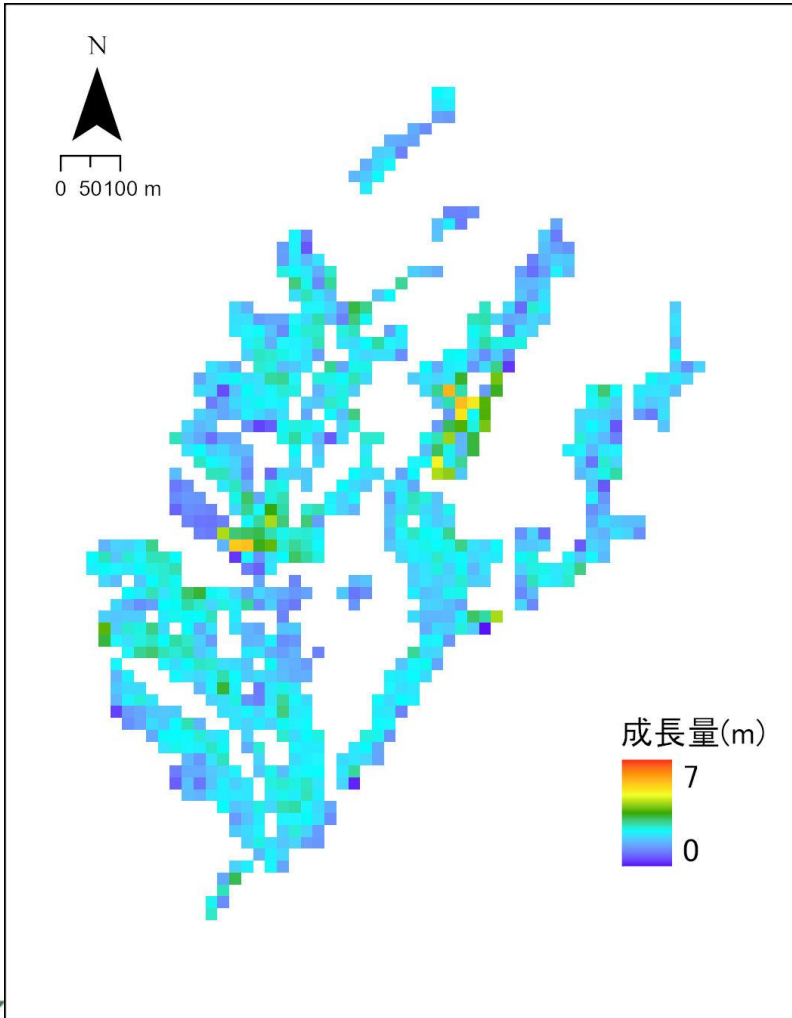
林野庁の樹高成長曲線の推定樹高



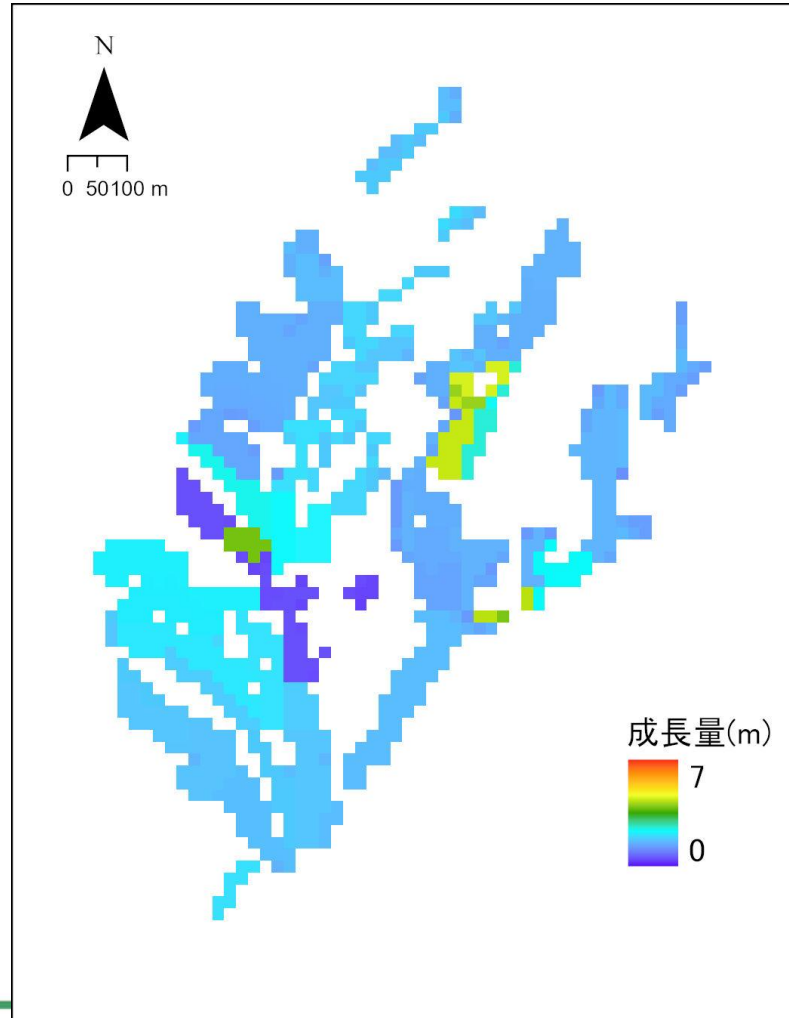
# (4) 各種収穫予想表に基づく樹高推定 2 時期の成長量比較

成長量は、群馬県の推定成長量がより航空レーザ成長量と近いことが確認された。

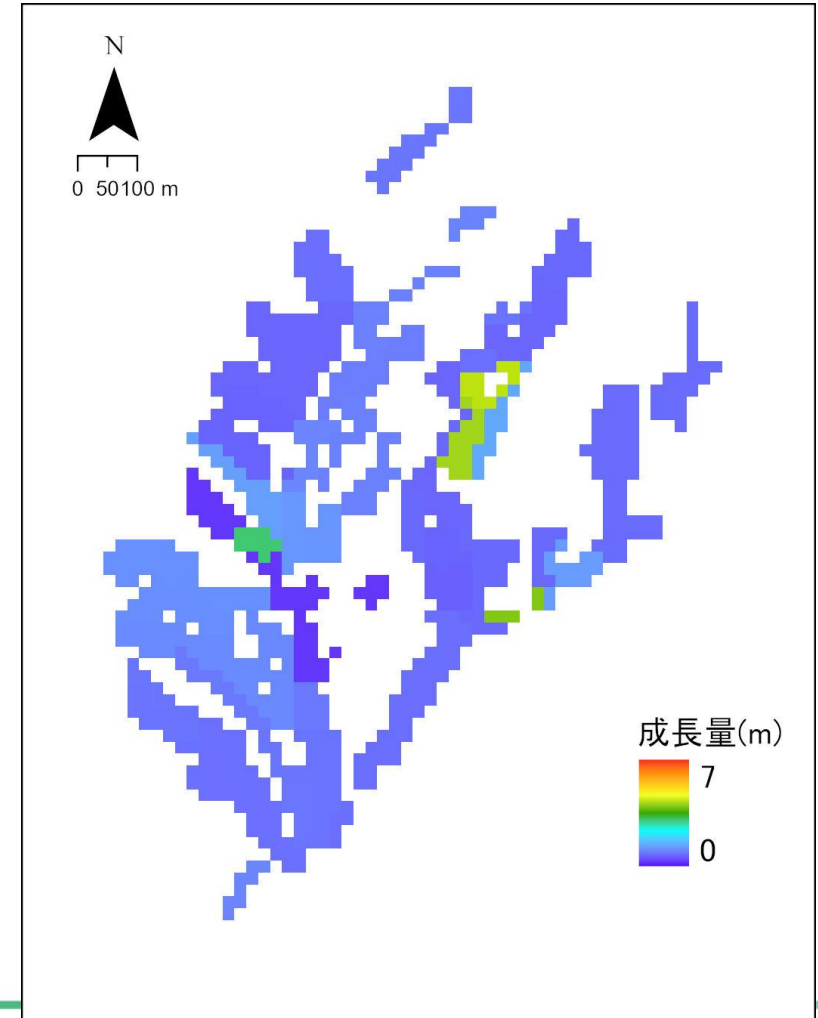
航空レーザ成長量



群馬県の樹高成長曲線の推定成長量



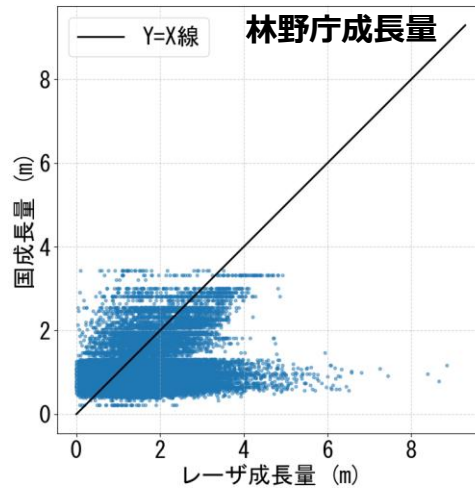
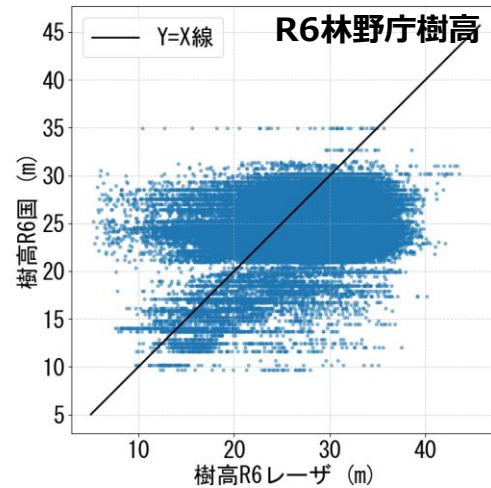
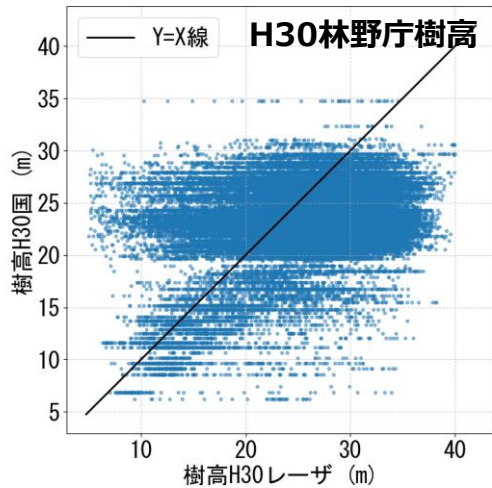
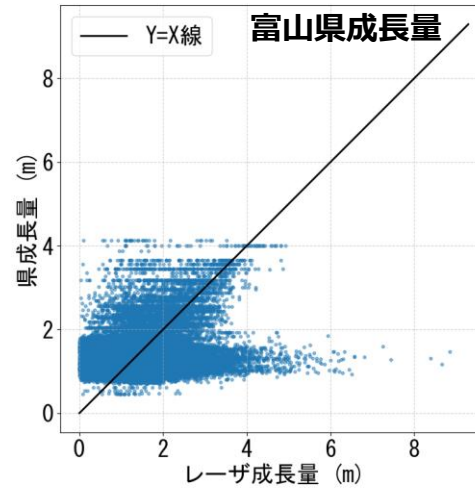
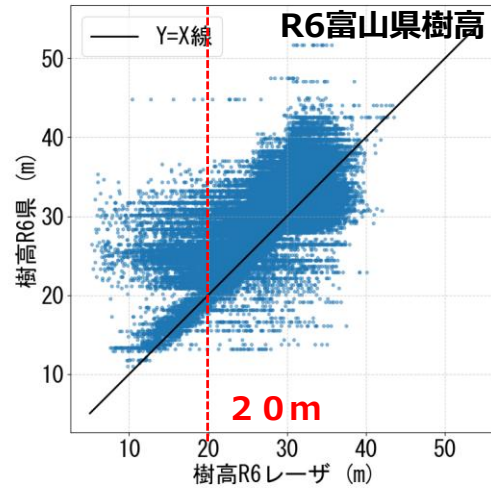
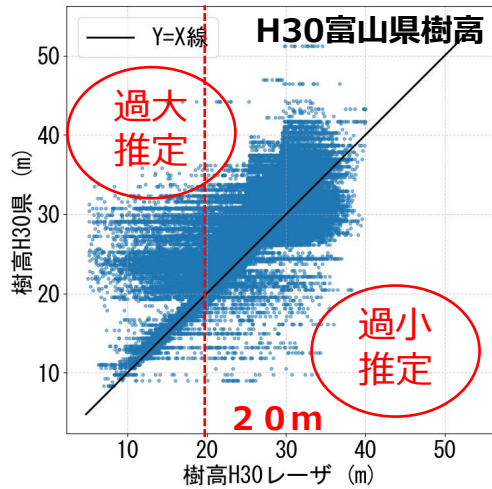
林野庁の樹高成長曲線の推定成長量



## (4) 各種収穫予想表に基づく樹高推定

H30樹高、R6樹高、成長量について、航空レーザと推定結果の散布図（上段：富山県、下段：林野庁）とRMSEを示す。

収穫予想表の推定樹高 (m)



航空レーザ樹高 (m)

サンプル数：75,225  
実測値と推定値の比較 RMSE (m)

	富山県	林野庁
H30樹高	5.10	6.29
R6樹高	4.85	6.26
成長量	0.73	0.82

富山県の樹高成長曲線は林野庁の曲線と比較して、高い推定精度を示した。

### 樹高成長曲線の推定傾向

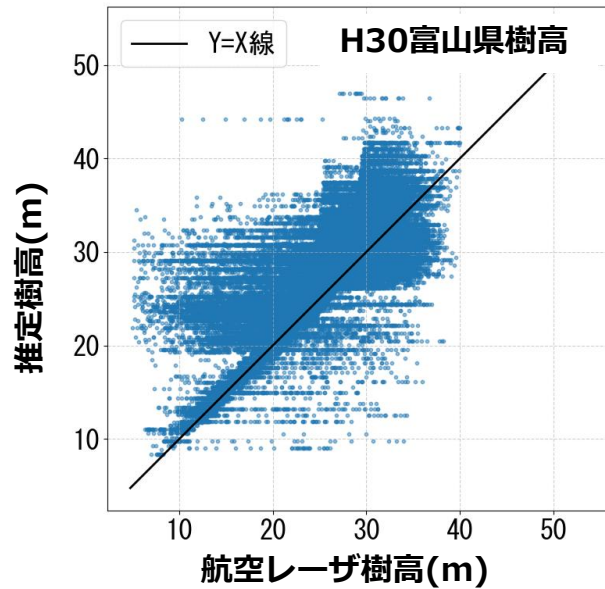
富山県の曲線は、全体的にばらつきが大きく、特に20m以上の樹高で過大推定となる傾向があった。林野庁の曲線もばらつきが大きく、比較的、過小推定されるデータが多かった。

### 誤差の経年変化

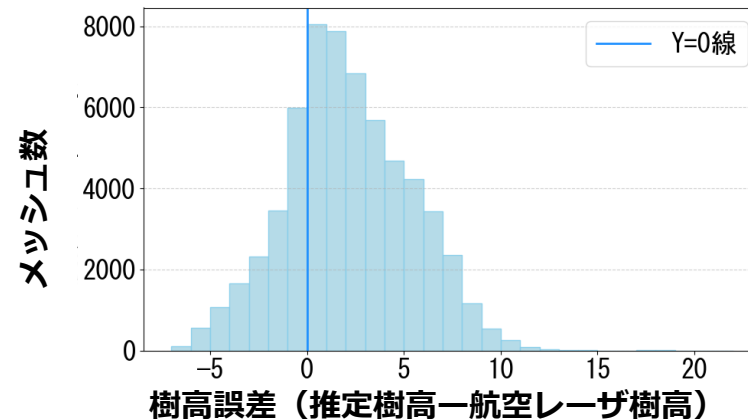
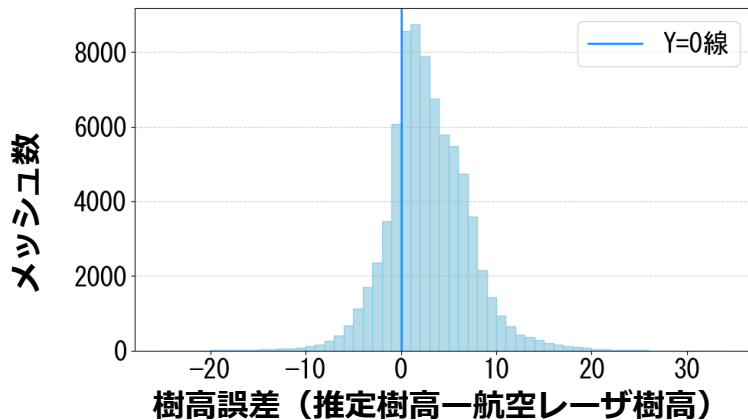
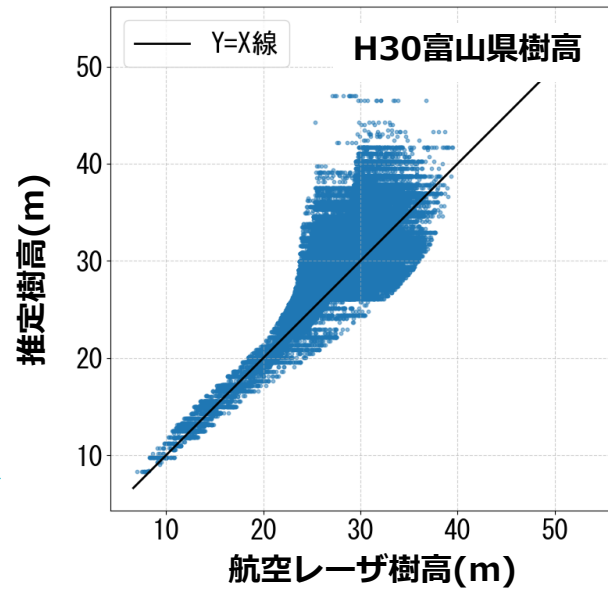
H30樹高とR6樹高のRMSEの比較では、富山県と林野庁いずれも、R6樹高のRMSEの方が小さかった。この結果から、6年間で累積される誤差は比較的小さいと考えられる。

## (4) 各種収穫予想表に基づく樹高推定 誤差の分析

誤差の傾向が分かりやすいように、地位指数の妥当性の検証と同様の手法で外れ値を除去した。



外れ値を除外



外れ値除去後 サンプル数：60,501  
実測値と推定値の比較 RMSE (m)

	富山県	林野庁
H30樹高	3.88	5.80
R6樹高	3.80	5.99
成長量	0.60	0.66

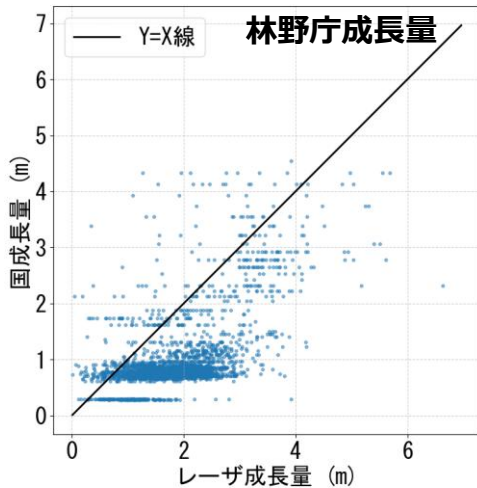
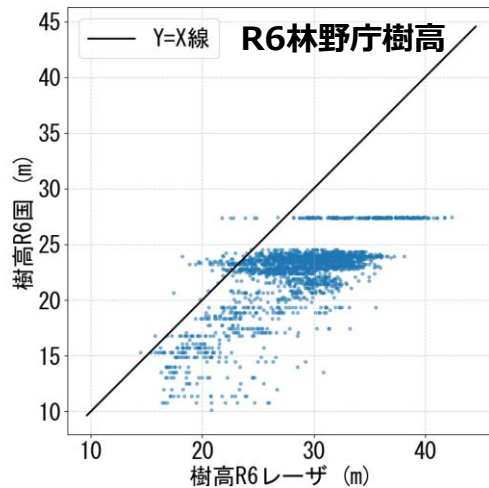
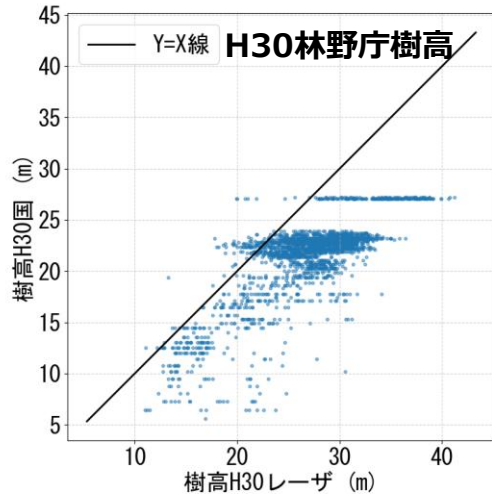
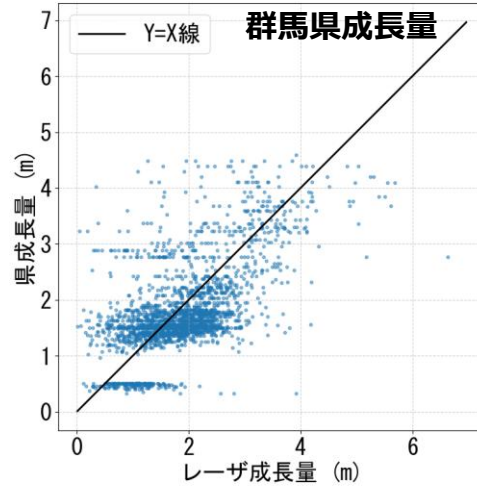
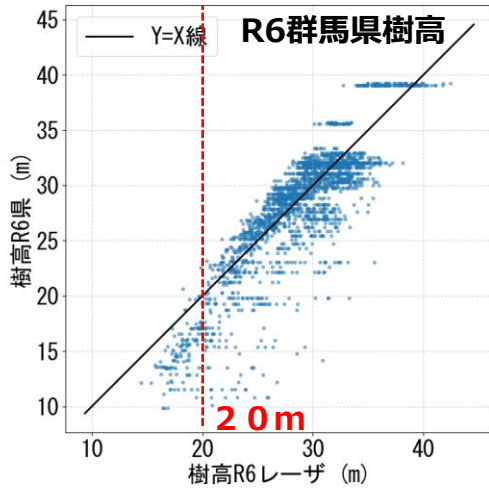
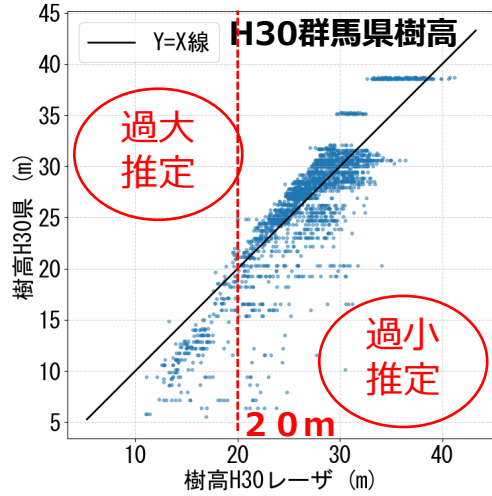
林齢が間違っている可能性のあるデータを除去した結果、R6樹高のRMSEは3.80mとなり、外れ値除去前と比較して1.05mの改善が確認された。

しかしながら、樹高22m以上の林分において、依然として樹高の過大推定が確認された。この過大推定は、林齢情報の誤りに起因するものではなく、収穫予想表の樹高成長曲線のモデルの特性に起因すると考えられる。

# (4) 各種収穫予想表に基づく樹高推定

H30樹高、R6樹高、成長量について、航空レーザと推定結果の散布図（上段：群馬県、下段：林野庁）とRMSEを示す。

収穫予想表の推定樹高(m)



## 実測値と推定値の比較 RMSE (m)

	群馬県	林野庁	サンプル数
H30樹高	3.11	6.29	: 2,310
R6樹高	2.92	7.05	
成長量	0.73	1.10	

群馬県の樹高成長曲線は林野庁の曲線と比較して、高い推定精度を示した。

### 樹高成長曲線の推定傾向

群馬県の曲線は、全体的に過小推定のデータがあり、樹高20m以上で過大推定となる傾向があった。群馬県の曲線のRMSEは氷見市より約2m小さく、より高い推定精度を示した。林野庁の曲線は、全体的に樹高が過小推定となる傾向があり、RMSEは氷見市の結果と概ね同程度であった。

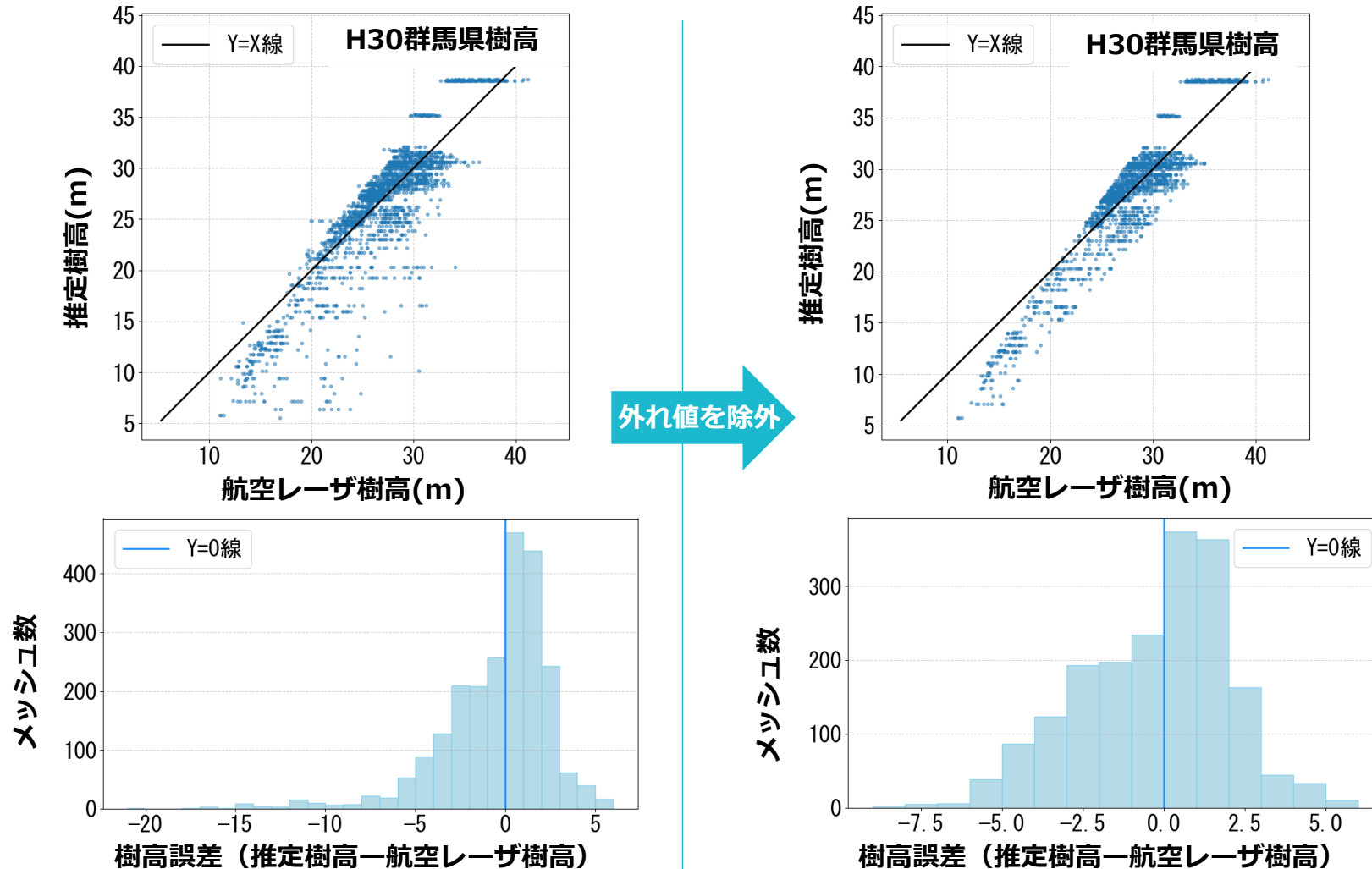
### 誤差の経年変化

H30樹高とR6樹高のRMSEの比較では、群馬県はR6樹高のRMSEが小さかった。一方、林野庁はR6樹高でRMSEが約0.7m大きくなっていった。

航空レーザ樹高[m]

## (4) 各種収穫予想表に基づく樹高推定 誤差の分析

誤差の傾向が分かりやすいように、地位指数の妥当性の検証と同様の手法で外れ値を除去した。



外れ値除去後 サンプル数：1,874  
実測値と推定値の比較 RMSE (m)

	群馬県	林野庁
H30樹高	2.33	6.37
R6樹高	2.33	7.31
成長量	0.65	1.11

林齢が間違っている可能性のあるデータを除去した結果、R6樹高のRMSEは2.33mとなり、外れ値除去前と比較して0.59mの改善が確認された。

しかしながら、過小推定や、樹高22m以上の林分の過大推定は依然として確認された。これらは、隣接する林分の影響による樹高の誤算出などに起因するものではなく、収穫予想表の樹高成長曲線のモデルの特性に起因すると考えられる。

## (4) 各種収穫予想表に基づく樹高推定 検証結果



### 推定樹高と成長量の検証結果まとめ

- 氷見市およびみどり市ともに、林野庁の樹高成長曲線と比較して、富山県および群馬県の樹高成長曲線がより高い推定精度を示した。
- 両エリアの比較では、みどり市が氷見市よりも高い推定精度を示した。みどり市の対象範囲は東京農工大学の演習林として管理されていることから、比較的林齢情報が正しいと想定され、これが差異の要因の一つと考えられる。
- 誤差の要因として、林齢情報の誤りや隣接する林分からの樹高の誤算出が影響していると考えられるが（外れ値を除外することで、R6推定樹高のRMSEが氷見市は1.05m、みどり市は0.59mの改善を示した）、外れ値を除いた場合も依然として誤差が残ったことより、樹高成長曲線のモデルの特性に起因する誤差が含まれていることが推測される。
- 富山県および群馬県の樹高成長曲線の傾向として、樹高の高い林分（特に20m以上）において、航空レーザ樹高より過大推定になる傾向が確認された。この過大推定の要因の1つとして、樹高成長曲線の作成方法が関係していると考えられる。樹高成長曲線は、現地調査で計測された上層木の平均樹高（上層木の定義は、林冠を構成する優性木だが、現地調査により定義は多少異なる）を用いて作成される。樹高が20mに達する林齢（30～40年生と推定）は間伐が行われる可能性が高い時期であり、間伐後に成長の良い上層木のみが計測対象となることで、特に成長の優れた場合の樹高がモデルに反映される。実際の森林には成長具合が様々な立木が混在するため、収穫予想表のモデルと全体の林分との間に乖離が生じる可能性があると考えられる。

評価検証

地位・樹高推定モデルに基づく樹高推定のまとめ



＜解析に関する留意点＞

- 施業の有無に関わらず対象範囲のすべてのスギ人工林（氷見市はボカスギに限定）を解析対象としている。
- 本解析ではH30航空レーザDCHMの10mメッシュ内の最大値を、20mメッシュで平均した値を上層木樹高の正解データとしている。

＜収穫予想表に基づく樹高推定について＞

- 林齢が不確かなデータを除去した場合でも、依然として推定樹高に誤差があったことから、収穫予想表の樹高成長曲線のモデルの特性に起因する誤差が影響していると考えられる。
- 以下のような収穫予想表の制約が複合的に作用していると考えられる。
  - 「収穫予想表は、一般的な施業を受けた森林を想定している」
  - 「上層木樹高は、現地調査ごとの上層木の定義に一致する立木の平均樹高である」
  - 「調査地が間伐後の場合は、より成長の良い上層木の計測データがモデルに反映される」
  - 「モデルの適用の際は、連続値の地位指数を、離散的な地位に変換して使用する必要がある」
  - 「林野庁の収穫予想表のモデルは、場合分けがなく、地域ごとに1パターンの樹高成長曲線を使う」



## (5) 評価検証

# 地位・樹高推定モデルに基づく樹高推定のまとめ：各モデルの樹高の推定精度の比較

### <各モデルの樹高の推定精度の比較>

- 地位指数の推定に使用していないR6樹高の推定精度で各モデルを比較すると、富山県と群馬県の収穫予想表モデルの方が、林野庁の収穫予想表モデルよりも高い推定精度を示した。また、最も推定精度が高かったのは、航空レーザモデルであった。収穫予想表モデルの樹高の推定精度が低いのは、林齢や地位、前項に記載したような収穫予想表の制約が複合的に作用していると考えられる。
- 推定樹高の傾向は、富山県の収穫予想表モデルは樹高が高い林分で過大推定の傾向があり、群馬県の収穫予想表モデルは樹高が低い林分で過小推定、樹高が高い林分で過大推定の傾向があった。林野庁の収穫予想表モデルは全体的に過小推定の傾向があった。航空レーザモデルは全体的に精度が高かったが、過大推定されるデータが少しみられた。
- 一方、H30からR6の6年間の成長量の推定精度は、みどり市の林野庁の収穫予想表モデルの結果以外は、収穫予想表のモデルの方が、航空レーザモデルよりも高い推定精度を示した。理由として、収穫予想表モデルの樹高成長曲線の傾きが、実際の林分の成長曲線の傾きと近かったことが推測される。

### 推定精度まとめ RMSE (m) 表の () 内はサンプル数

氷見市	収穫予想表				航空レーザモデル			
	富山県		林野庁		富山県		林野庁	
	全データ (75,225)	外れ値除外 (60,501)	全データ (75,225)	外れ値除外 (60,501)	全データ (2,310)	外れ値除外 (1,874)	全データ (2,310)	外れ値除外 (1,874)
H30樹高	5.10	6.29	3.88	5.80	※ 1	※ 1	※ 1	※ 1
R6樹高	4.85	6.26	3.80	5.99	1.22	0.95	0.90	0.83
成長量※ 2	0.73	0.82	0.60	0.66	1.22	0.95	0.90	0.83

※ 1 航空レーザに基づく樹高成長曲線は、H30航空レーザ樹高を基準としているため、H30樹高の誤差は発生しない

※ 2 H30からR6の6年間の成長量



森林情報更新手法とその留意事項を以下に記載する。

<航空レーザ成果がない場合>

- 森林簿の地位（または地位指数）と林齢を用いて、各地域の収穫予想表から樹高を推定する。地域の収穫予想表がない場合は、林野庁の収穫予想表を用いる。
- 収穫予想表に基づく樹高推定は、地域によって推定精度にばらつきが生じる可能性がある点に留意する。

<航空レーザ成果がある場合>

- 航空レーザ成果がある場合は、収穫予想表ではなく、航空レーザより作成した樹高成長曲線に基づき樹高を推定する。
- 航空レーザに基づく樹高推定は、航空レーザの樹高を基準とするため、航空レーザ計測時点の樹高には誤差が発生しない。航空レーザ計測の次年度以降の樹高には成長量の誤差が発生するが、本検証結果より、6年間であれば、樹高の誤差は1m前後に抑えられることが分かった。
- 長期的に樹高を更新していく場合は、成長量の誤差がさらに影響してくる可能性がある点に留意する。