

### 3-3-4 胸高直径の推定

---

トドマツ、エゾマツ、カラマツは、樹種ごとに胸高直径推定式を作成した。胸高直径推定式の作成方法は大きく下記の2通りに分けられる。

#### 【方法A：プロット単位】

平均樹高（判定値）や平均樹冠投影面積などで平均胸高直径（地上計測）の推定式を作成する。立木の平均的な形状に基づいて推定する。回帰式のみかけの当てはまりが良くなるが、多様な木々の形状の違いには対応できない。単木ポイントデータよりも林相ポリゴンを使用して森林を管理する場合に有効。

#### 【方法B：単木単位】

毎木の樹高（判定値）や樹冠投影面積などで胸高直径の推定式を作成する。多様な樹形のサンプル木を利用して推定する。回帰式の当てはまりは悪くなるが、多様な木々の形状の違いに対応している。単木ポイントデータを使用して森林を管理する場合に有効。

次に、推定式の形は、主に下記の一次式と二次式があげられる。

$$\text{一次式： } DBH = a \times H + b$$

H：樹高

$$\text{二次式： } DBH = a \times CA^b \times H^c$$

H：樹高 CA：樹冠投影面積

また、DBH推定の際に使用するサンプルは、過学習を防ぐため、交差検証法を採用した。交差検証法には以下の3種類があるが、本業務ではk-分割交差検証法を採用し、データを3分割したうえで、2グループを教師データ、1グループを検証用データとして使用した。

#### 【ホールドアウト検証】

トレーニングデータを教師データと検証データに分けて、教師データで作成したモデルを検証データで評価する方法。従来のリモートセンシングデータの分類結果の精度検証に相当する。データを交差させることがないため、交差検証に含めないことも多い。

#### 【k-分割交差検証】

トレーニングデータをk個のグループに分割し、そのうちの1個グループを検証データとして残りを教師データとしてモデルを作成して検証する。k回実施して精度の平均値をモデルの精度とする。

【leave-one-out 交差検証】

n 画素のトレーニングデータを用い、n-1 画素でモデルを作成して残りの 1 画素で精度を評価し、全ての画素を検証データとして n 回実施して平均値をモデルの精度とする。

よって本業務では樹種毎に 12 式、計 36 式の推定精度を求めた。

表 3-2 1 作成した DBH 推定式

方法	推定式	グループ
プロット単位	一次式	①
		②
		③
	二次式	①
		②
		③
単木単位	一次式	①
		②
		③
	二次式	①
		②
		③

最後に、精度の検証方法を下記に示す。

- 誤差率(%)

森林資源解析結果と現地調査結果の差に対する現地調査結果の比率である。数値が大きいほど、誤差が大きいことを示す。また、本数誤差は同じでもプロット内の全体本数が少ないほど誤差率が大きくなる傾向がある。

$$\text{誤差率} = \left| \frac{\hat{y} - y}{y} \right|$$

レーザ計測による解析結果： $\hat{y}$     現地調査結果： $y$

- RMSE

二乗平均平方根誤差 (Root Mean Squared Error) である。森林資源解析結果が現地調査結果からどの程度乖離しているかを表し、0 に近い値であるほど誤差が小さいことを示す。平均誤差率が相対的な誤差の比率であるのに対し、RMSE は誤差の絶対値である。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\hat{y}_k - y_k)^2}$$

レーザ計測による解析結果： $\hat{y}$  現地調査結果： $y$  サンプル数： $N$

- 赤池情報基準（以下、AIC）

AIC はモデルのあてはまり度を表す統計量である。値が小さいほどあてはまりが良いとされるが、絶対的な評価として用いられるため、精度の基準はない。なお、以下の式で定義されるため、サンプルサイズや説明変数の数が少ないほど、AIC は低くなる。

$$\text{AIC} = n \left( \log \left( 2\pi \frac{S_e}{n} \right) + 1 \right) + 2(p + 2)$$

$n$  : サンプルサイズ  $p$  : 説明変数の数  $S_e$  : 残差平方和

発注者との協議の結果、今後の森林管理方法が主に小班および林相ポリゴン単位になることから、本業務では方法Aのうち最も精度の良い式を採用した。採用した DBH 推定式は以下のとおりである。なお、カラマツについては、誤差率および RMSE でみると表 3-2 2 の非線形回帰式①の DBH 推定式が最も良い結果であったが、表 3-1 6 に示したようなカラマツ林分で林冠投影面積の推定精度が落ちるため、単回帰式①を採用することとした。また、その他針葉樹については、ある程度まとまりを持って分布している樹種の多くがストローブマツであったため、本業務ではカラマツの式を採用し DBH を推定した。

【エゾマツ】

$$y = 1.4x + 0.78$$

【トドマツ】

$$y = 1.37x + 4.25$$

【カラマツ】

$$y = 1.25x + 3.04$$

【その他針葉樹】

$$y = 1.25x + 3.04$$

$y$ : DBH (cm)  $x$ : H(m)

表 3-2 2 DBH 推定式 (プロット単位)

単回帰 Y=aX+b Y:DBH X:樹高												検証結果				
樹種	Training Data数	検証データ数	Training Group	検証Group	Group	a	b	R2	誤差率	誤差率平均	RMSE	RMSE平均	AIC	AIC平均		
エゾマツ	12	6	1	2	3 ①	1.58	-2.1	0.97	12.1%	6.8%	3.67	2.62	32.6	29.96		
エゾマツ	12	6	1	3	2 ②	1.4	0.78	0.91	2.4%		1.31		22.1			
エゾマツ	11	7	2	3	1 ③	1.21	4.37	0.83	5.8%		2.88		35.18			
エゾマツ	21	11	1	2	3 ①	1.48	1.88	0.85	7.3%	7.9%	3.01	3.08	52.59	57.84		
トドマツ	21	11	1	3	2 ②	1.37	4.25	0.84	7.0%		2.51		60.64			
トドマツ	21	11	2	3	1 ③	1.41	3.3	0.91	9.4%		3.72		60.28			
カラマツ	11	6	1	2	3 ①	1.25	3.04	0.53	9.5%	10.5%	4.81	5.04	33.6	35.57		
カラマツ	11	6	1	3	2 ②	1.11	3.04	0.54	10.6%		4.69		37.4			
カラマツ	11	6	2	3	1 ③	1.27	1.21	0.62	11.6%		5.61		35.72			

非線形回帰 Y=a*CA^b*h^c Y:DBH CA:樹冠投影面積 h:樹高												検証結果				
樹種	Training Data数	検証データ数	Training Group	検証Group	Group	a	b	c	R2	誤差率	誤差率平均	RMSE	RMSE平均	AIC	AIC平均	
エゾマツ	12	6	1	2	3 ①	1.5425	0.1608	0.8256	0.99	9.3%	6.1%	2.41	1.71	35.18	28.26	
エゾマツ	12	6	1	3	2 ②	2.0319	0.2382	0.6611	0.96	3.9%		1.1		30.93		
エゾマツ	11	7	2	3	1 ③	2.1607	0.2065	0.6642	0.91	5.0%		1.62		18.67		
トドマツ	21	11	1	2	3 ①	1.9396	0.1552	0.7775	0.88	8.0%	9.6%	2.61	3.21	53.25	58.50	
トドマツ	21	11	1	3	2 ②	2.1173	0.2981	0.6164	0.91	12.1%		3.81		62.61		
トドマツ	21	11	2	3	1 ③	2.4384	0.1048	0.7556	0.92	8.7%		3.22		59.65		
カラマツ	11	6	1	2	3 ①	0.9074	0.1669	0.9576	0.71	9.1%	12.9%	4.28	6.14	35.98	38.08	
カラマツ	11	6	1	3	2 ②	0.9249	0.2457	0.887	0.78	12.5%		4.67		35.4		
カラマツ	11	6	2	3	1 ③	3.642	0.553	0.1275	0.85	17.0%		9.46		42.85		

表 3-2 3 DBH 推定式 (単木単位)

単回帰 Y=aX+b Y:DBH X:樹高												検証結果				
樹種	Training Data数	検証データ数	Training Group	検証Group	Group	a	b	R2	誤差率	誤差率平均	RMSE	RMSE平均	AIC	AIC平均		
エゾマツ	66	32	1	2	3 ①	1.6	-0.65	0.63	9%	10%	3.98	4.83	190.99	173.69		
エゾマツ	66	32	1	3	2 ②	1.7	-3.25	0.78	12%		4.23		170.92			
エゾマツ	66	32	2	3	1 ③	1.66	-1.86	0.64	10%		6.28		159.15			
トドマツ	66	32	1	2	3 ①	1.37	6.76	0.68	12%	10%	5.43	5.36	182.1	189.01		
トドマツ	66	32	1	3	2 ②	1.34	7.12	0.68	9%		5.29		192.39			
トドマツ	66	32	2	3	1 ③	1.42	5.4	0.75	10%		5.36		192.53			
カラマツ	56	28	1	2	3 ①	1.18	6.03	0.36	13%	15%	4.77	4.92	171.1	167.82		
カラマツ	56	28	1	3	2 ②	1.33	6.08	0.47	22%		5.32		171.33			
カラマツ	54	29	2	3	1 ③	1.13	3.61	0.35	10%		4.66		161.03			

非線形回帰 Y=a*CA^b*h^c Y:DBH CA:樹冠投影面積 h:樹高												検証結果				
樹種	Training Data数	検証データ数	Training Group	検証Group	Group	a	b	c	R2	誤差率	誤差率平均	RMSE	RMSE平均	AIC	AIC平均	
エゾマツ	66	32	1	2	3 ①	1.6441	0.0434	0.9405	0.64	8%	10%	2.29	5.69	159.15	175.46	
エゾマツ	66	32	1	3	2 ②	1.0729	0.0278	1.0916	0.79	12%		5.71		191.88		
エゾマツ	66	32	2	3	1 ③	1.48533	0.07928	0.93931	0.67	10%		9.07		175.34		
トドマツ	66	32	1	2	3 ①	4.01334	0.02422	0.69359	0.7	12%	10%	5.44	7.82	192.53	190.27	
トドマツ	66	32	1	3	2 ②	4.1019	0.01244	0.69585	0.69	9%		8.54		183.27		
トドマツ	66	32	2	3	1 ③	3.34019	0.03729	0.73947	0.76	10%		9.48		195.02		
カラマツ	56	28	1	2	3 ①	2.3765	0.01872	0.80164	0.37	10%	11%	0.96	4.67	161.03	169.35	
カラマツ	56	28	1	3	2 ②	2.35155	0.06362	0.75835	0.51	12%		6.52		174.77		
カラマツ	54	29	2	3	1 ③	2.74841	0.03021	0.74697	0.37	11%		6.52		172.26		

### 3-3-5 針葉樹の蓄積の推定

単木ポイントの幹材積は、単木毎に胸高直径を推定し、上記材積式から幹材積を推定した。通常、林相ポリゴン単位での蓄積はこの単木毎の幹材積を林相ポリゴン単位で集計したものを使用する。しかし、本業務で採用した DBH 推定式はプロット平均値を使用して作成した式（3-3-4）であるため、この推定式を単木のデータに適用してしまうと、表 3-24 に示したとおり単木単位での DBH の推定精度が落ちるため幹材積の推定精度も落ちてしまう。

そこで、本業務ではプロット単位での推定精度を高めるため、以下の手順で針葉樹の蓄積を推定した。なお、林相ポリゴン単位で平均樹高を算出したうえで、DBH を推定する方法もあるが、プロット式の推定精度を落とさないためには、現地調査を実施したプロット面積（0.04 ha）単位で推定することが望ましいため、以下の手順をとった。

表 3-24 DBH 推定精度の比較

樹種	プロット単位での精度		単木単位での精度	
	誤差率	RMSE	誤差率	RMSE
エゾマツ	2%	1	10%	4
トドマツ	7%	3	12%	5
カラマツ	9%	5	11%	5

#### 【手順1】 林相ポリゴンのメッシュ化および平均樹高

2 m×2 m のメッシュを設定し、林相ポリゴンをメッシュ化した。この際メッシュ内の最大面積の林相を採用することとした。次に、中心のメッシュから半径 11.3 m（約 400 m<sup>2</sup>）の領域内に含まれる単木データの平均樹高および平均立木密度を算出した（図 3-40）。

#### 【手順2】

次に、メッシュ毎の平均樹高に、3-3-4 で算出した DBH 推定式を樹種ごとに適用し、平均 DBH を算出した。

#### 【手順3】

平均樹高メッシュ、平均 DBH メッシュ、平均立木密度メッシュを掛け合わせ、平均蓄積量を算出した。なお、蓄積量の算出は、林野庁計画課監修「立木幹材積表（東日本編）（1970 年）」に収録されている材積表に対応した材積式を使用している。

#### 【手順4】

手順3で推定したメッシュ毎の平均蓄積量を林相ポリゴン単位、小班単位で集計した。

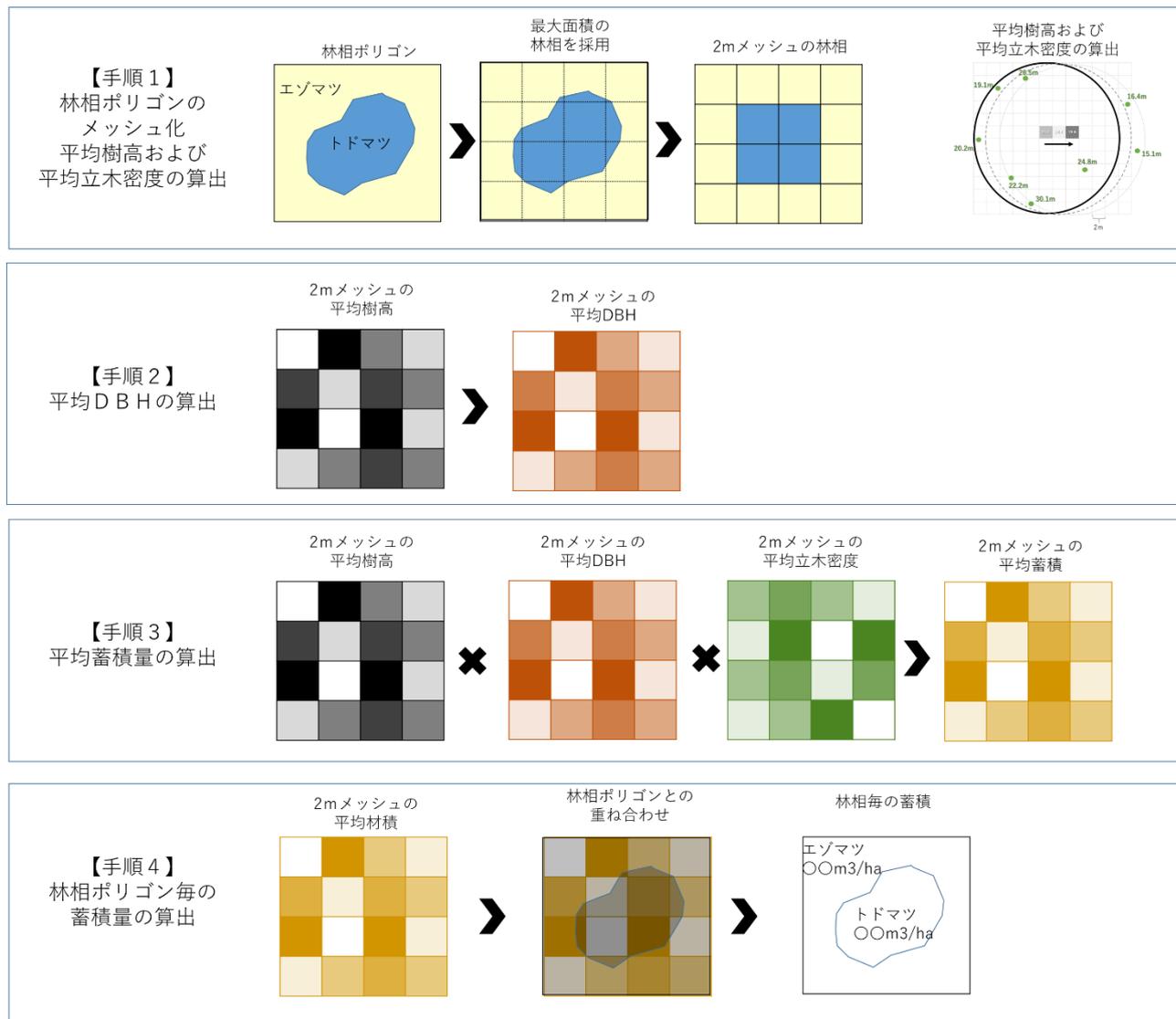


図 3-39 林相ポリゴン毎の蓄積量の推定手順

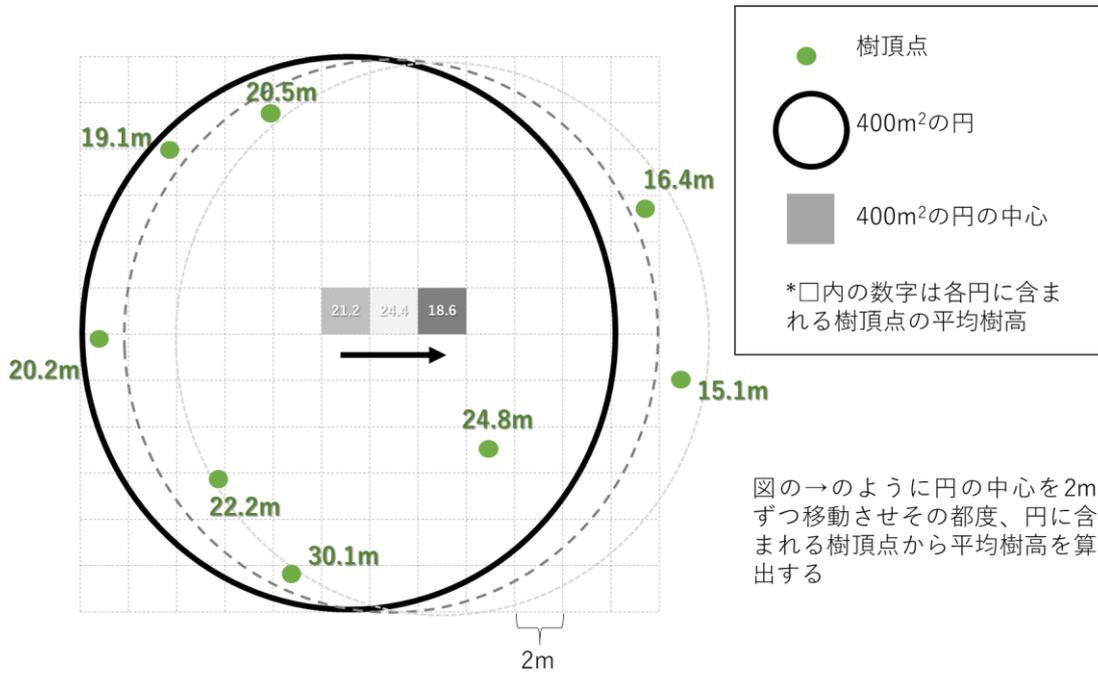


図 3-40 平均樹高・平均立木密度の算出方法

樹種毎の推定精度を表 3-25 に示す。

表 3-25 蓄積量の推定精度

樹種	誤差率	AIC	RMSE
エゾマツ	21%	197	102
トドマツ	21%	346	97
カラマツ	15%	163	104

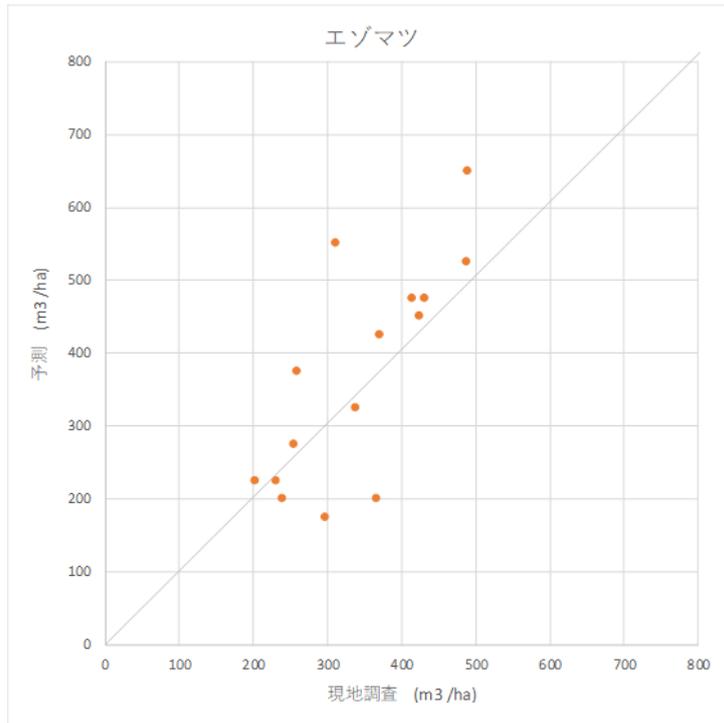


図 3-41 エゾマツの蓄積推定と現地蓄積との比較

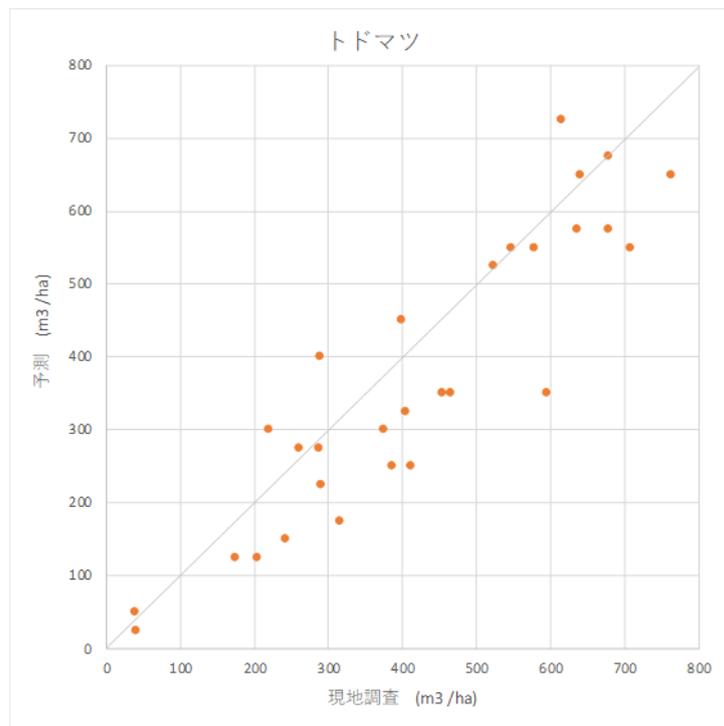


図 3-42 トドマツの蓄積推定と現地蓄積との比較

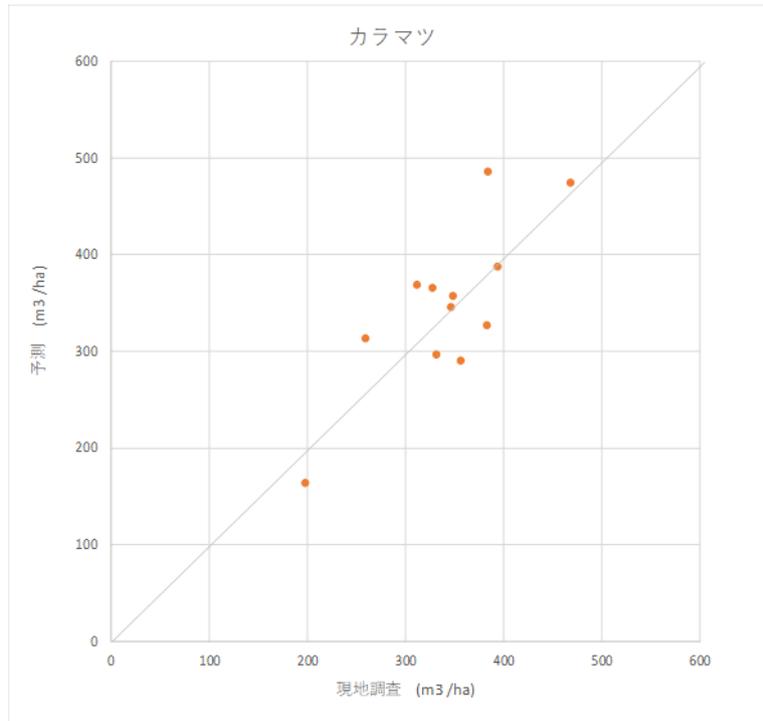


図 3-43 カラマツの蓄積推定と現地蓄積との比較

### 3-3-6 収量比数の推定

森林資源解析結果から収量比数を推定した。収量比数とは、同じ等平均樹高線上にある ha 当たり最多林分材積に対する ha 当たり林分材積の比である。つまり、ある樹高の上限本数密度を 1 とした場合の、相対的な森林の込み具合を表した指標である。数値が高いほど、林分密度が高くなり、林分の収量比数の値が 0.8 以上であると過密、0.7~0.8 は中庸、0.7 以下は疎な林分となる。

本業務では、地域・樹種ごとに調整された林分密度管理図をもとに作成された、森林総合研究所が公開している「収量比数 Ry 計算プログラム (2012)」を利用し、これに立木本数密度、平均樹高を引数として使用し、収量比数を算出した。

網走中部と網走南部ともに、トドマツやカラマツと比べてエゾマツ林分の収量比数の値が 0.5 以下の面積割合が高かった。これは、表 3-26 に示されるよう、エゾマツは他の樹種と比べて林齢の低い林分の割合が高いためと考えられる。結果を図 3-44、図 3-46 に、集計結果を表 3-27、表 3-28、図 3-45、図 3-47 に示す。

表 3-26 樹種別齢級別面積および小班数一覧表

齢級	網走中部						網走南部					
	トドマツ		エゾマツ		カラマツ		トドマツ		エゾマツ		カラマツ	
	小班数	面積(ha)	小班数	面積(ha)	小班数	面積(ha)	小班数	面積(ha)	小班数	面積(ha)	小班数	面積(ha)
1	4	12.08										
2	4	17.94										
3	11	20.07			1	0.55	1	2.14				
4	20	94.51	1	3.20			2	5.64	6	7.36		
5	3	11.52	9	20.21					2	1.83		
6	5	20.27	8	22.46			4	4.36	21	39.82	1	1.86
7	118	399.86	25	71.41	4	19.33	75	276.76	37	102.61	13	52.20
8	210	871.58	28	98.40	29	161.13	54	254.60	4	8.44	13	88.59
9	253	1,183.52	22	90.60	11	48.34	56	314.22	25	135.50	26	184.29
10	223	1,268.11	29	93.79	14	109.74	60	524.61	33	158.28	15	147.46
11	184	1,664.78	7	43.10	27	274.08	50	441.56	3	28.79	43	487.10
12	152	1,412.18			58	512.89	40	412.73	10	79.46	35	380.24
13	165	1,178.14	1	0.10	55	406.52	54	457.11	10	41.53	24	231.61
14	120	1,028.58	3	35.63	17	100.05	29	243.87			2	15.72
15	33	370.78	3	10.10	1	5.35	11	111.26				
16	3	13.21	2	45.55								
17	5	26.70	1	6.29								
18					1	0.32						
19	15	30.91	9	20.47	3	1.60						
総計	1528	9,624.74	148	561.31	221	1,639.90	436	3,048.86	151	603.62	172	1,589.07

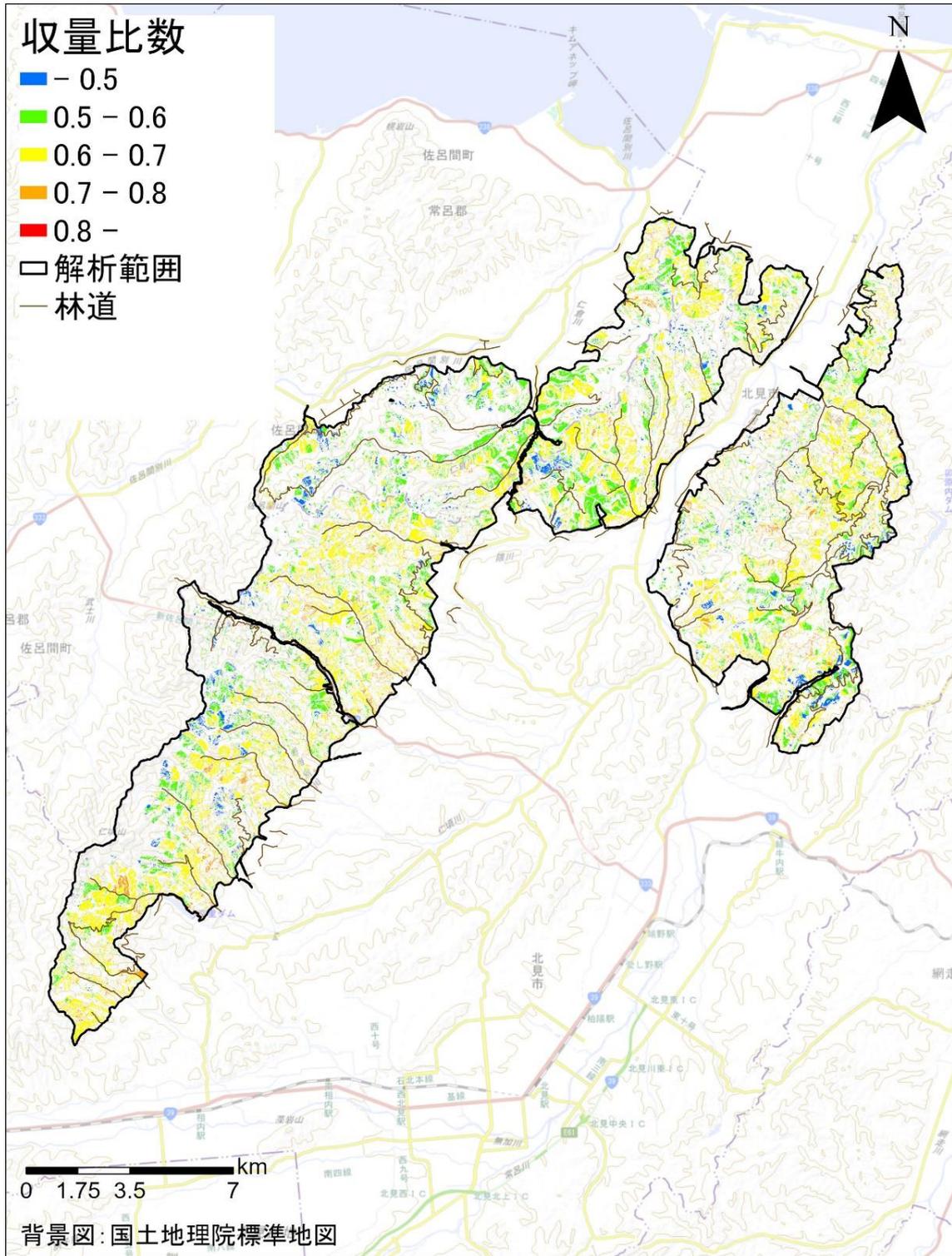
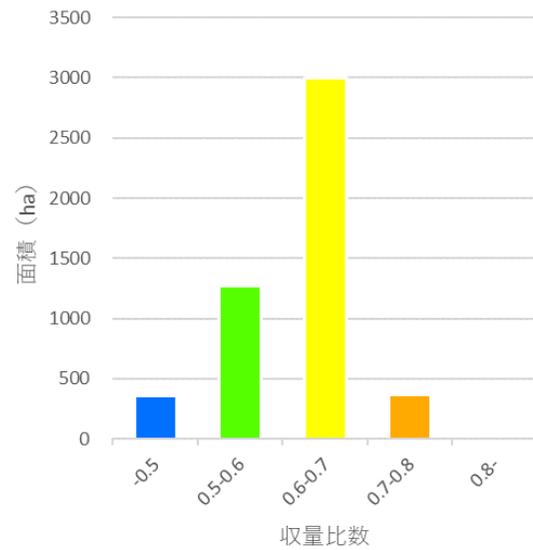


図 3-44 収量比数分布図（網走中部）

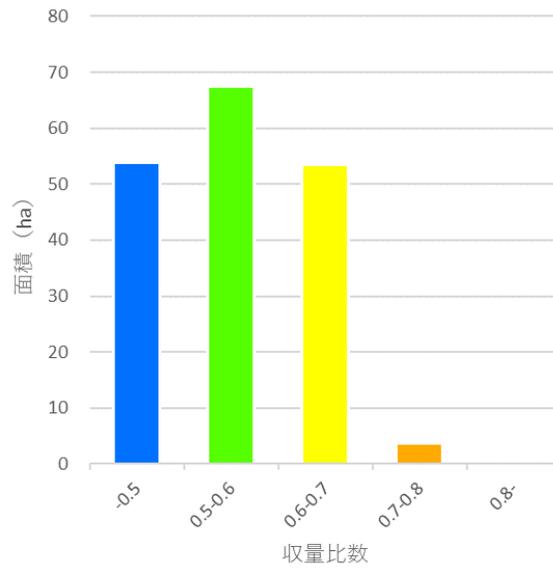
表 3-27 網走中部の収量比数ごとの面積

樹種	-0.5		0.5-0.6		0.6-0.7		0.7-0.8		0.8-		総計
	面積 (ha)	割合	面積 (ha)	割合	面積 (ha)	割合	面積 (ha)	割合	面積 (ha)	割合	面積 (ha)
トドマツ	361.64	7.2%	1271.17	25.4%	3004.03	60.0%	365.13	7.3%	2.96	0.1%	5004.92
エゾマツ	53.86	30.2%	67.46	37.8%	53.45	29.9%	3.78	2.1%	0.00	0.0%	178.55
カラマツ	48.42	5.6%	490.35	57.1%	303.78	35.4%	15.20	1.8%	0.98	0.1%	858.73
合計	463.92	7.7%	1828.98	30.3%	3361.26	55.6%	384.11	6.4%	3.93	0.1%	6042.20

トドマツ



エゾマツ



カラマツ

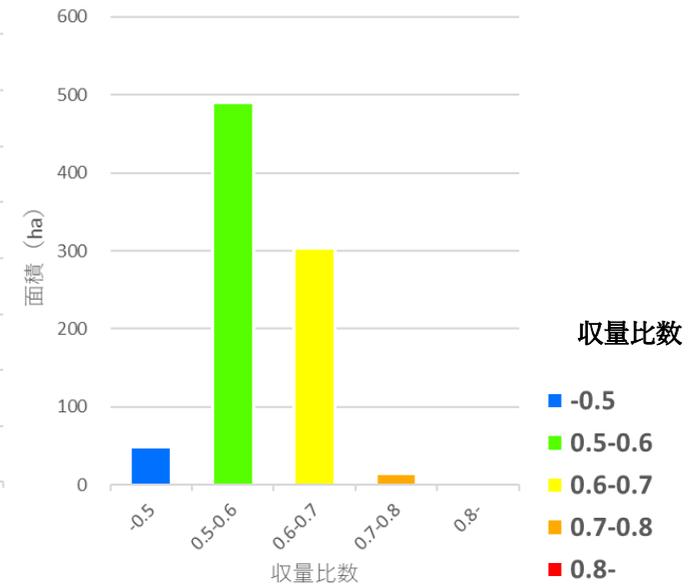


図 3-45 網走中部の収量比数毎の面積割合

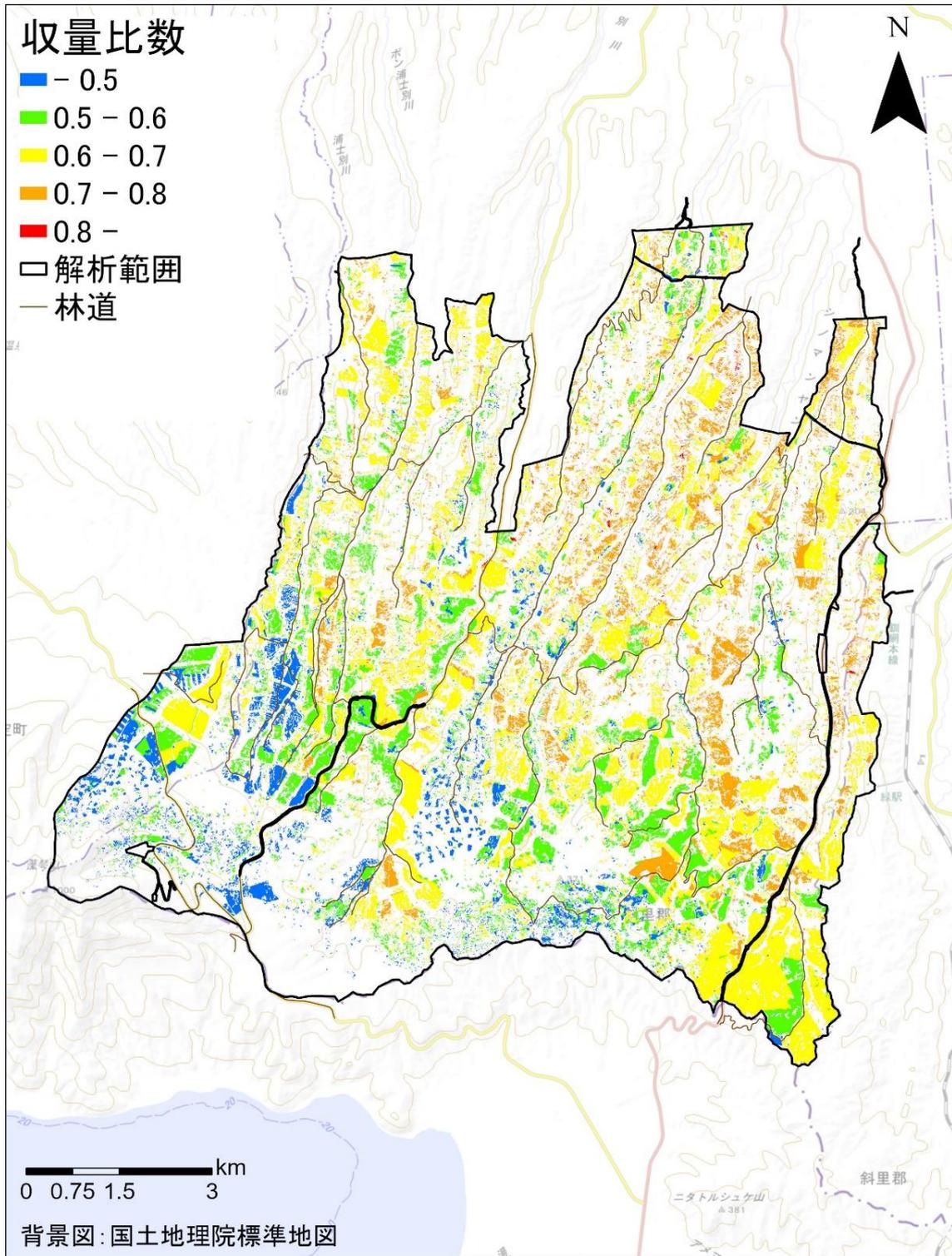


図 3-46 収量比数分布図（網走南部）

表 3-28 網走南部の収量比数ごとの面積

樹種	-0.5		0.5-0.6		0.6-0.7		0.7-0.8		0.8-		総計
	面積 (ha)	割合	面積 (ha)	割合	面積 (ha)	割合	面積 (ha)	割合	面積 (ha)	割合	面積 (ha)
トドマツ	119.88	4.8%	467.74	18.8%	1312.54	52.8%	574.60	23.1%	11.34	0.5%	2486.11
エゾマツ	166.31	31.5%	163.13	30.9%	174.54	33.1%	22.45	4.3%	0.98	0.2%	527.40
カラマツ	93.63	18.4%	262.84	51.8%	133.65	26.3%	16.99	3.3%	0.57	0.1%	507.68
合計	379.81	10.8%	893.71	25.4%	1620.73	46.0%	614.05	17.4%	12.89	0.4%	3521.19

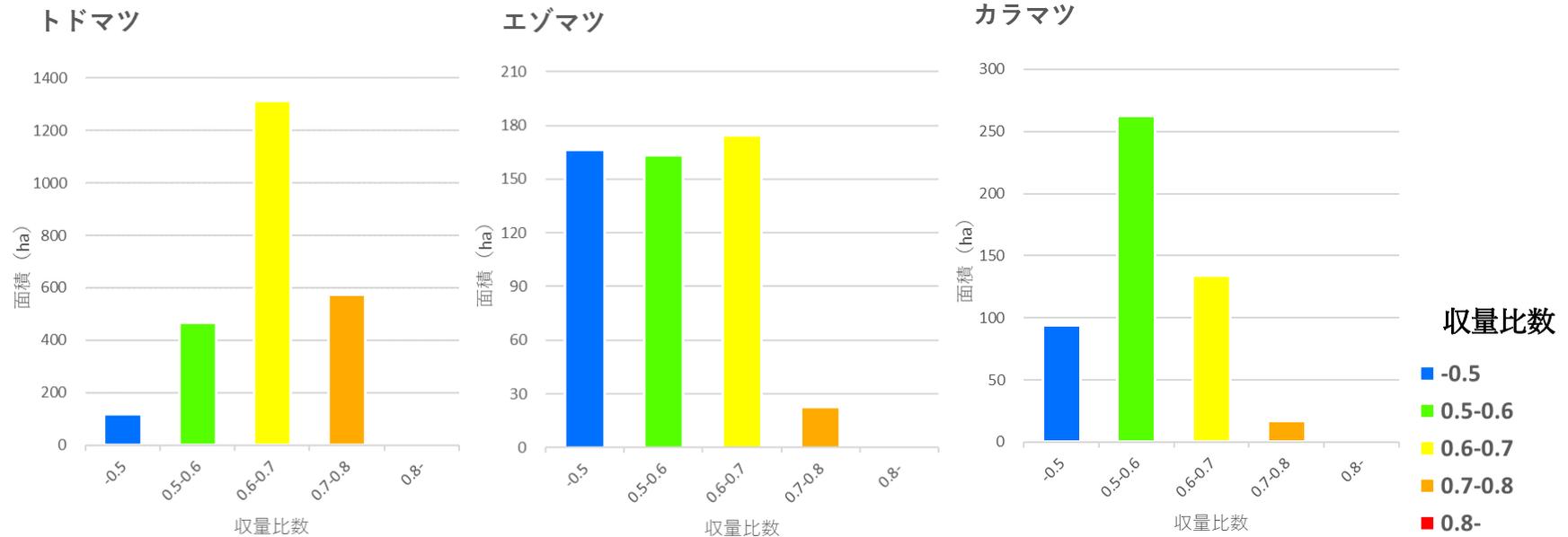


図 3-47 網走南部の収量比数毎の面積割合