

高解像度衛星データを用いた森林 資源解析とモニタリング

トウ ソウキュウ・加藤 正人・竹中 悠輝

信州大学

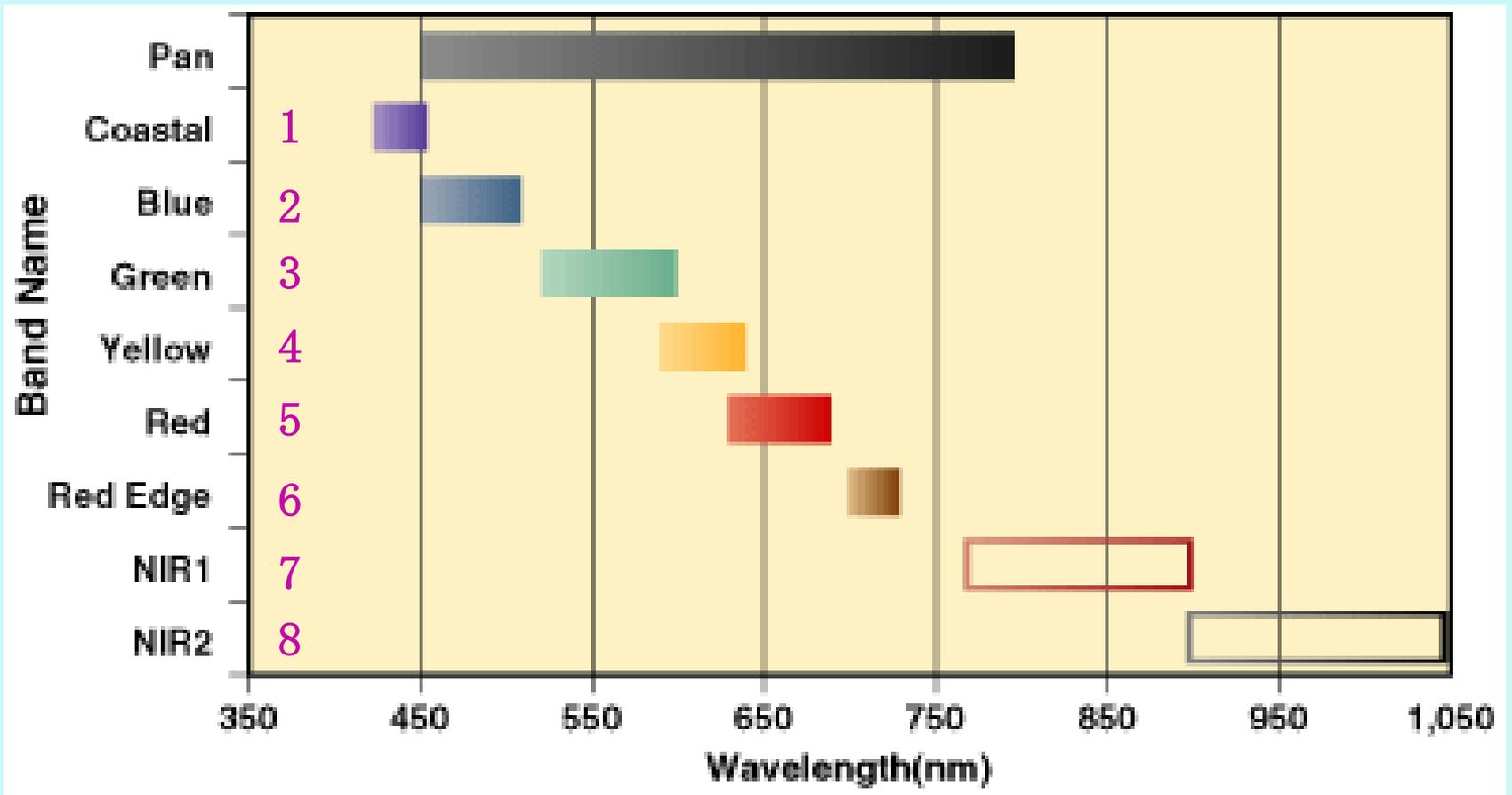
2016年7月28日 東京

紹介内容

- (1) WorldView-2データを用いた単木レベルでの樹種別森林資源の解析
- (2) WorldView-2画像とPALSAR/ALOSデータの組み合わせで森林バイオマスの推定
- (3) SkySat-2衛星と航空レーザデータを用いた松くい虫被害木の把握

(1) 単木の抽出

- 研究地：中国南京市にある紫金山(しきんさん)
- 使用したデータ：WorldView-2衛星画像
- 解析方法：Valley-following法による樹冠と樹頂点抽出
教師付きオブジェクト・ベース樹冠分類
- 検証用現地調査データ：2011年9月に調査した90個プロット



WorldView-2衛星の特徴

- ・ 1 panchromatic band: 分解能0.5m
- ・ 8 multispectral bands: 分解能2m

研究地の概要

The area is about 30 km²;

The elevation at mountaintop is 449 m;

Annual average sunshine hours: 2213 h;

Annual average precipitation: 1050 mm;

Annual mean temperature: 15.4°C.

Japanese name: 紫金山

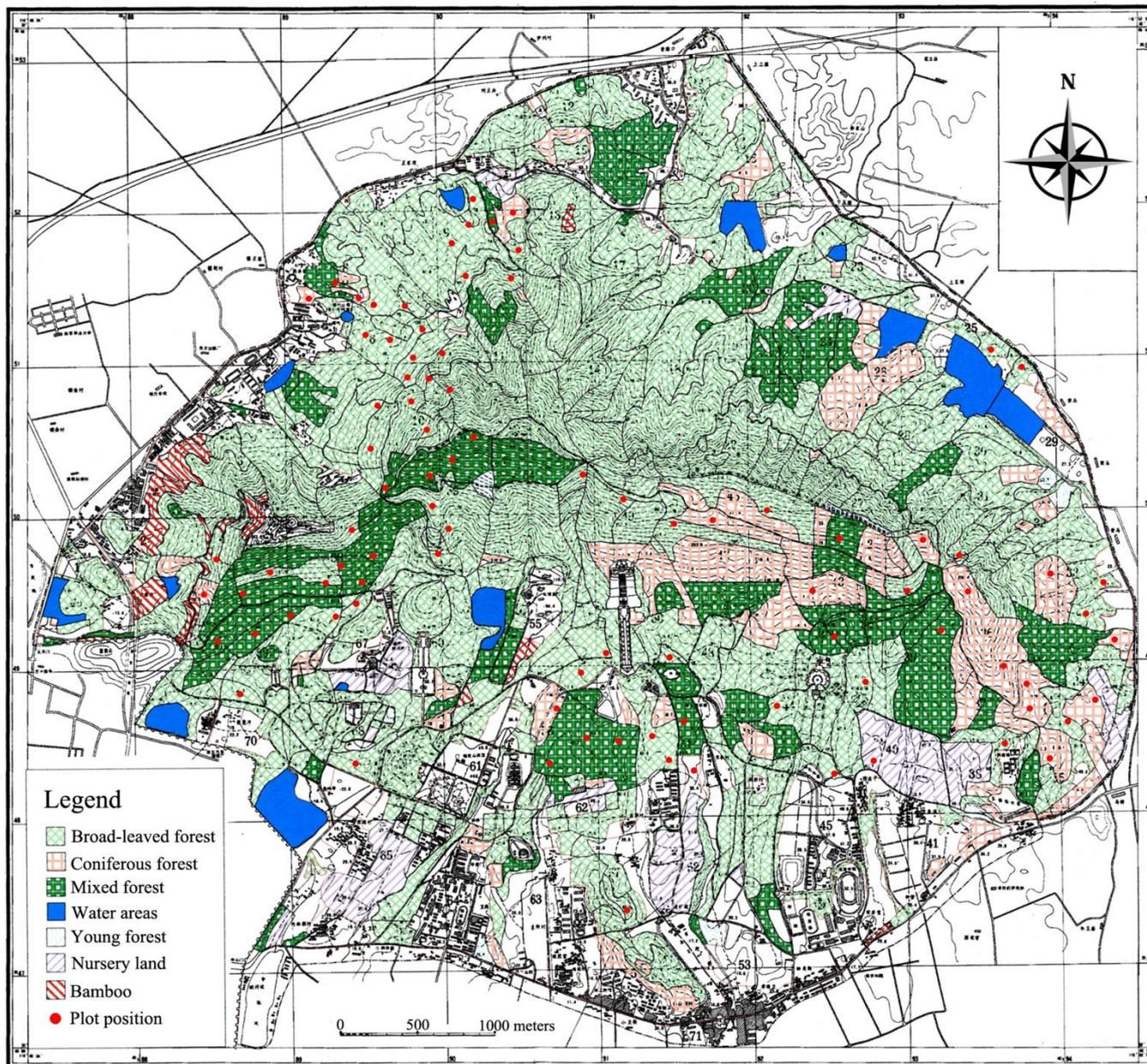




孫文の陵墓の入り口



2011年9月に調査するときの様子



2011年9月に調査した90個プロットの位置

調査した90個プロットの結果

NO.	Density (Stem/ha)	Avg. DBH(cm)	Avg. height(m)	Forest type	NO.	Density (Stem/ha)	Avg. DBH(cm)	Avg. height(m)	Forest type
1	311	36.2	12.0	Broad-leaved	16	1644	11.9	8.6	Mixed
2	1956	10.1	8.6	Broad-leaved	17	1650	13.6	10.4	Broad-leaved
3	1467	13.0	10.0	Mixed	18	650	15.7	11.1	Mixed
4	1289	12.4	9.5	Coniferous	19	1333	13.0	9.2	Mixed
5	1378	16.2	10.8	Coniferous	20	1125	13.4	9.3	Broad-leaved
6	844	16.6	11.2	Broad-leaved	21	1400	10.2	7.9	Broad-leaved
7	1644	12.2	9.4	Mixed	22	1325	15.4	10.3	Broad-leaved
8	1956	12.7	9.5	Mixed	23	1156	13.5	9.6	Broad-leaved
9	1100	17.2	11.4	Mixed	24	978	19.4	12.4	Broad-leaved
10	1156	16.5	11.1	Mixed	25	1289	12.2	9.2	Broad-leaved
11	1375	14.0	10.0	Mixed	26	800	16.1	10.3	Mixed
12	1244	13.2	9.4	Coniferous	27	1689	10.8	8.7	Broad-leaved
13	2075	10.7	8.4	Coniferous	28	1689	10.3	8.9	Mixed
14	1822	11.6	8.9	Mixed	29	1378	11.9	9.3	Broad-leaved
15	844	17.8	11.3	Broad-leaved	30	1467	12.2	9.2	Broad-leaved

- プロット1 から30

NO.	Density (Stem/ha)	Avg. DBH(cm)	Avg. height(m)	Forest type	NO.	Density (Stem/ha)	Avg. DBH(cm)	Avg. height(m)	Forest type
31	1422	15.5	10.8	Mixed	46	2000	11.9	8.8	Mixed
32	1467	15.9	10.8	Mixed	47	1422	12.9	9.6	Mixed
33	550	27.9	14.4	Mixed	48	711	18.0	11.0	Broad-leaved
34	1067	16.6	10.0	Broad-leaved	49	1022	12.5	9.4	Mixed
35	889	20.4	11.6	Broad-leaved	50	2178	11.2	8.8	Mixed
36	1200	13.4	9.6	Broad-leaved	51	2178	10.1	8.4	Mixed
37	1333	11.1	9.4	Broad-leaved	52	1378	12.6	9.4	Mixed
38	1911	8.4	7.9	Broad-leaved	53	1422	15.4	10.4	Mixed
39	1800	11.4	9.2	Mixed	54	1778	12.1	9.2	Mixed
40	800	17.2	11.2	Mixed	55	1067	13.6	10.1	Mixed
41	933	14.9	10.7	Broad-leaved	56	1111	15.3	11.0	Coniferous
42	2533	9.5	8.0	Mixed	57	1200	11.0	8.9	Broad-leaved
43	2711	9.3	7.9	Mixed	58	1156	14.8	10.3	Broad-leaved
44	1556	12.6	9.5	Mixed	59	1689	11.9	9.7	Broad-leaved
45	1600	12.5	9.4	Mixed	60	1911	10.8	8.6	Mixed

• プロット31 から60

NO.	Density (Stem/ha)	Avg. DBH(cm)	Avg. height(m)	Forest type	NO.	Density (Stem/ha)	Avg. DBH(cm)	Avg. height(m)	Forest type
61	1067	10.0	8.0	Mixed	76	1911	10.6	8.7	Broad-leaved
62	1467	10.6	8.7	Broad-leaved	77	1289	13.8	10.4	Broad-leaved
63	1111	14.6	10.4	Broad-leaved	78	1467	13.5	10.1	Broad-leaved
64	1644	13.5	9.8	Coniferous	79	2000	11.6	9.4	Coniferous
65	1175	11.5	8.6	Broad-leaved	80	978	8.6	7.7	Broad-leaved
66	1250	13.2	9.5	Broad-leaved	81	1556	14.1	10.5	Coniferous
67	533	11.3	9.0	Broad-leaved	82	978	20.6	12.7	Broad-leaved
68	533	17.5	11.1	Broad-leaved	83	1289	14.9	10.6	Broad-leaved
69	889	9.9	8.4	Broad-leaved	84	1022	21.0	12.4	Broad-leaved
70	1556	10.0	8.2	Mixed	85	800	16.1	11.3	Broad-leaved
71	1111	11.4	8.6	Broad-leaved	86	933	15.8	10.7	Broad-leaved
72	1778	10.2	8.3	Broad-leaved	87	400	10.1	8.5	Broad-leaved
73	1378	15.2	9.9	Broad-leaved	88	356	15.4	11.1	Broad-leaved
74	933	17.7	10.9	Broad-leaved	89	1156	18.0	11.7	Broad-leaved
75	1956	10.1	8.4	Broad-leaved	90	1200	17.8	11.3	Broad-leaved

• プロット61 から90



広葉樹林



針葉樹林



混交林

2011年に撮影したWorldView-2衛星画像

パンクロマティック
バンド

2011年に調査した
90個プロット

マルチスペクトル
バンド

ITC method

精度検証

Object-based
classification

樹頂点の抽出

Overlay

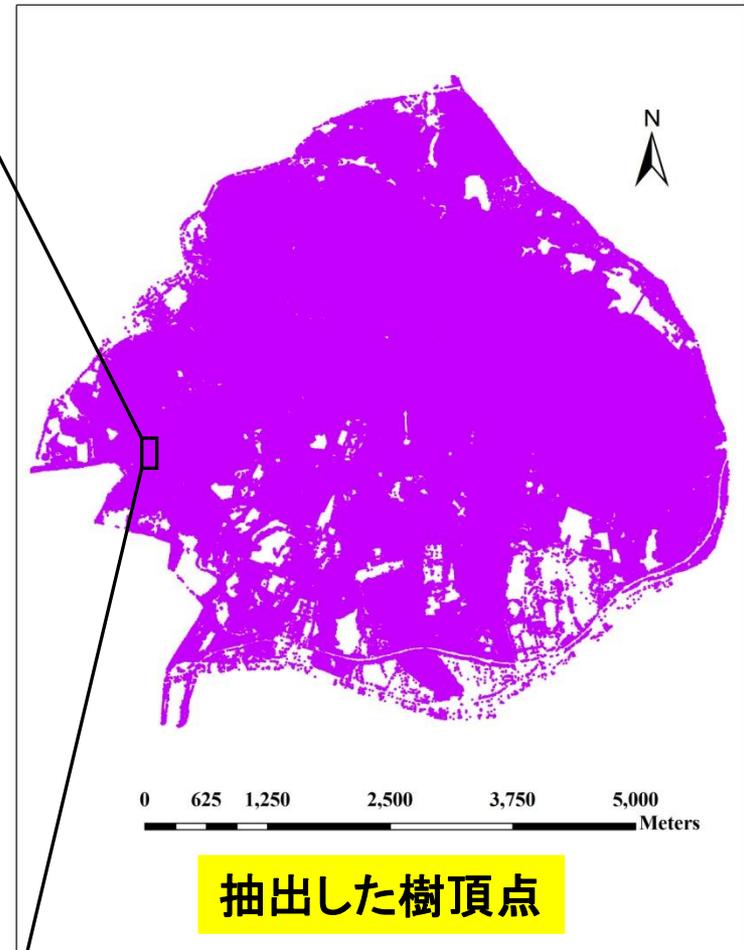
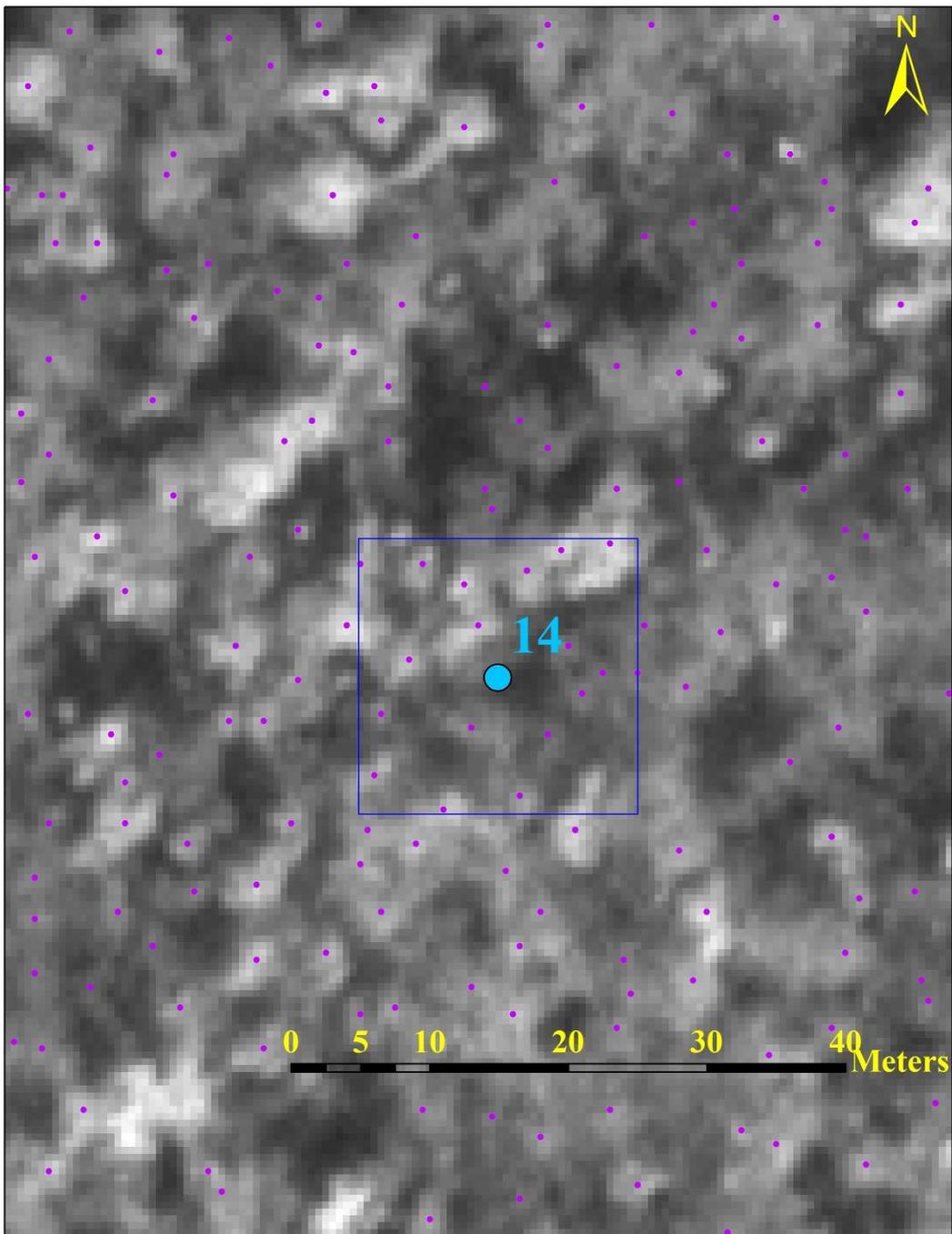
樹種分類図

Extraction

Summarize

ArcGIS
software

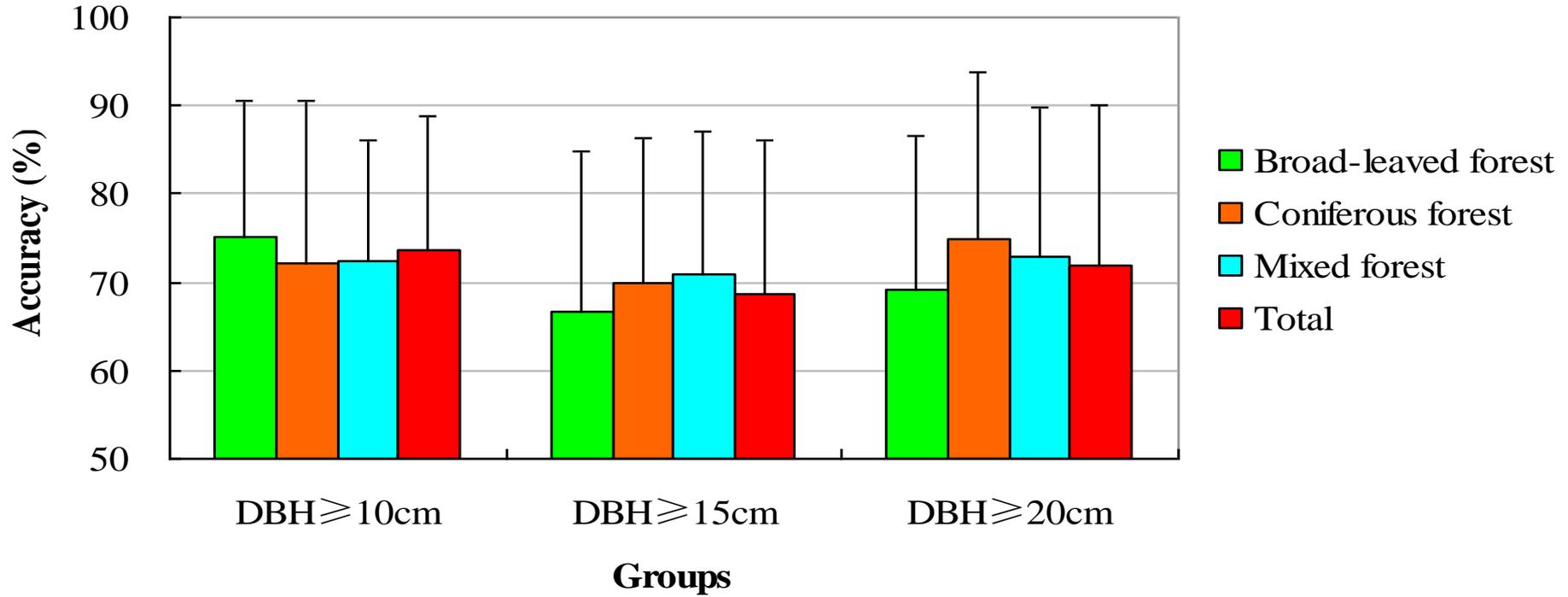
樹種別単木本数の統計



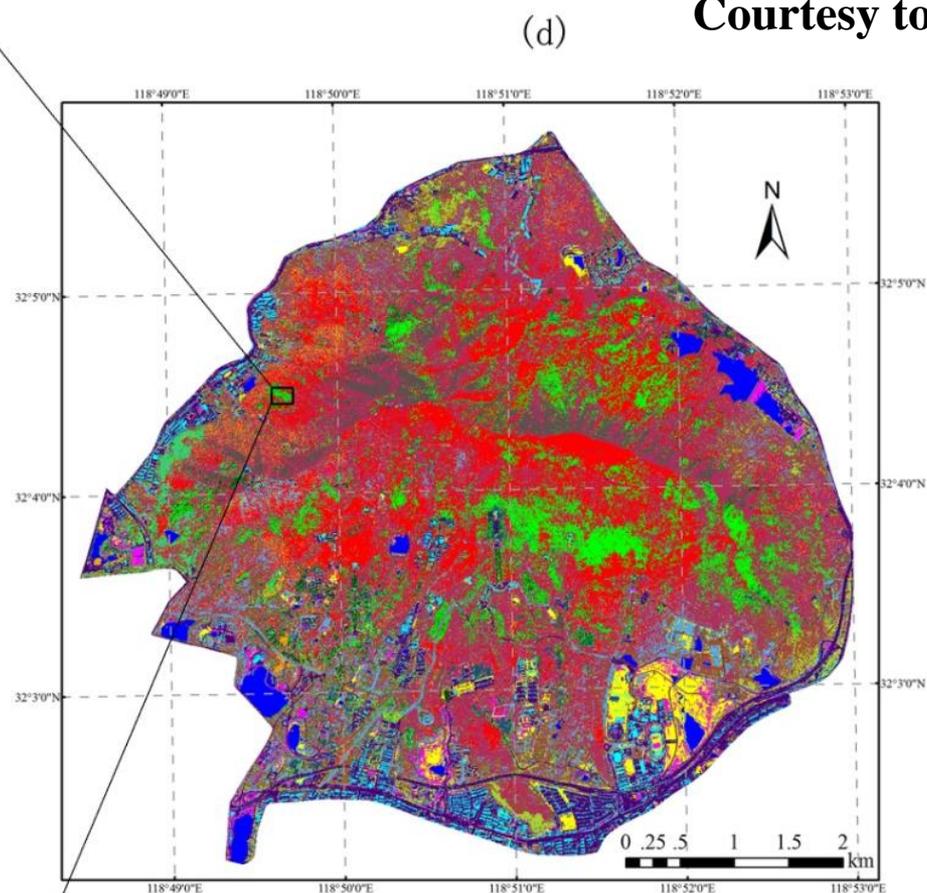
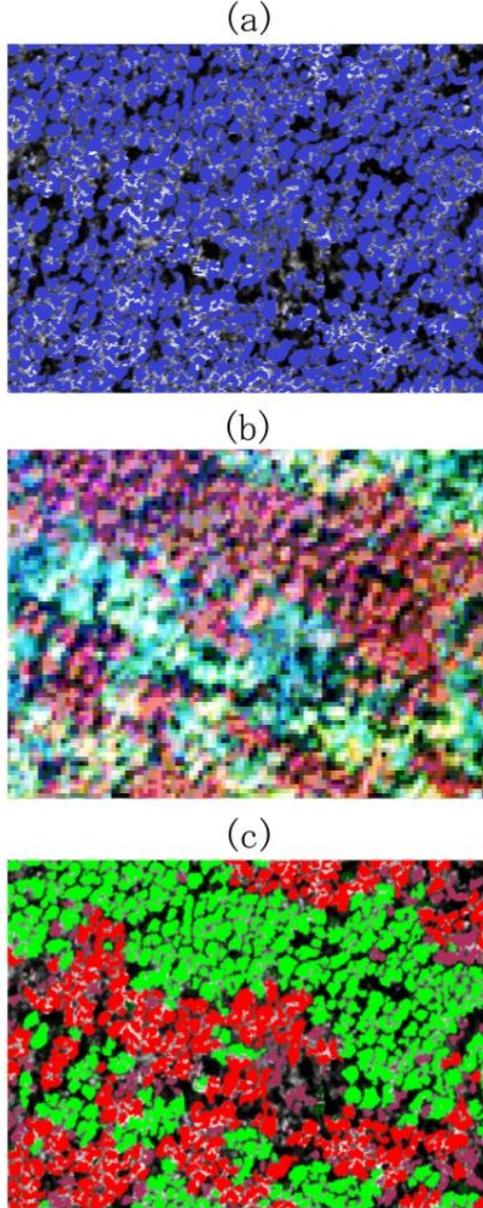
- Tree tops extracted by a filter of 5×5 pixels for trees ≥ 15 cm

A magnified area around plot 14

- D_S : 311 stems/ha
- D_I : 320 stems/ha
- Accuracy: 98.31%



林分タイプに分けて解析した本数の精度



Legend

Building	Water	Soil	Road	Grass	
Of	Cd	Mg	Pco	Pm	Pe
Pno	Ba	Lf	Qa	Sh	

- ・ マルチスペクトルバンドを用いてオブジェクト・ベースで分類した樹冠分布図。
- ・ (a) 拡大したエリアの抽出した樹冠(青い部分); (b) R: G: B = 7(NIR1): 5(Red): 2(Blue)で拡大したエリアを示した様子; (c) 8バンドによるオブジェクト・ベースで分類した樹冠。

- Error matrix for the 10 tree species classified by the ITC-based classification approach. (樹冠分類精度検証)

Class Name *	Of	Cd	Mg	Pco	Pm	Pe	Pno	Ba	Lf	Qa	Number Samples	Producer's Accuracy (%)
Of	30	0	1	0	0	0	1	0	1	0	33	90.9
Cd	0	27	1	2	2	2	1	2	0	0	37	73.0
Mg	1	0	34	0	0	0	5	0	5	0	45	75.6
Pco	0	5	0	19	1	4	0	1	0	0	30	63.3
Pm	0	1	0	2	57	2	0	2	0	1	65	87.7
Pe	0	1	1	3	3	33	0	1	0	0	42	78.6
Pno	2	2	4	0	0	0	34	0	8	0	50	68.0
Ba	0	2	0	1	2	2	1	22	0	1	31	71.0
Lf	1	1	4	3	1	0	4	0	71	2	87	81.6
Qa	0	0	0	1	0	0	0	0	1	78	80	97.5
Total	34	39	45	31	66	43	46	28	86	82	500	
User's Accuracy (%)	88.2	69.2	75.6	61.3	86.4	76.7	73.9	78.6	82.6	95.1		

Notes: Overall classification accuracy (405/500) = 81.0%; Kappa Statistic (X100) = 76.3%; Kappa Variance = 0.000001.

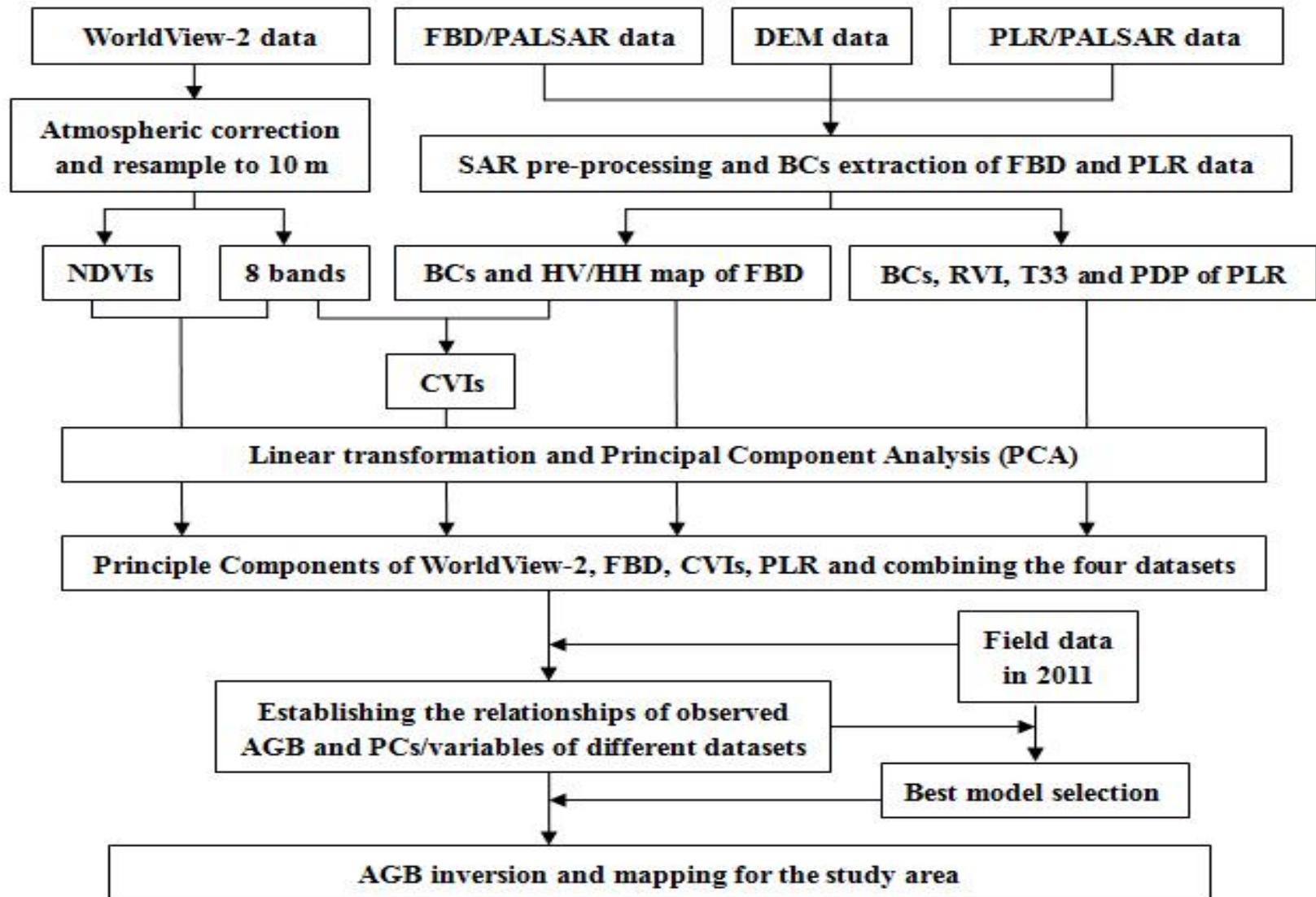
* Of: open forest; Cd: *Cedrus deodara*; Mg: *Metasequoia glyptostroboides*; Pco: *Platycladus orientalis*; Pm: *Pinus massoniana*;

Pe: *Pinus elliottii*; Pno: *Platanus orientalis*; Ba: bamboo; Lf: *Liquidambar formosana*; Qa: *Quercus acutissima*.

(2) バイオマスの推定

- 研究地: 中国南京市にある紫金山(しきんさん)
- 使用したデータ:
 - ① WorldView-2衛星画像
 - ② FBD/PALSAR/ALOS (HH and HV polarizations)
 - ③ PLR/PALSAR/ALOS (HH, HV, VH, and VV)
- 解析方法: 主成分分析、線形回帰
- 検証用現地調査データ: 2011年9月に調査した90個プロット

研究の流れ



BC: Backscattering Coefficient; NDVI: Normalized Difference Vegetation Index; RVI: Radar Vegetation Index; PDP: Polarimetric Decomposition Parameters; CVI: Combined Volume Index.

研究方法

PALSARとWorldView-2データによる抽出した変数

- **FBD:** 後方散乱係数 (HHとHV) 、 HV/HH
- **PLR:** 後方散乱係数 (HH, HV, VH, VV) 、 Entropy (H)、 Alpha angle、 Anisotropy (A)、 H(1-A)、 RVI、 T33
- **WorldView-2:** バンド1~8, NDVI₇₋₅, NDVI₈₋₅, NDVI₇₋₆, NDVI₈₋₆
- **FBDとWorldView-2の組み合わせ:** CVIs (Combined Volume Index)

$$CVI_i = (\gamma_{HV}^0 - R_i) / (\gamma_{HV}^0 + R_i)$$

γ_{HV}^0 : HV/FBDの後方散乱係数

R_i : WorldView-2画像のマルチスペクトルバンド(1-8)の反射強度

RS sources	Parameter	Best equation	b_0	b_1	$R^2(\text{sig.})$	Linear transform
FBD/ALOS (dataset A)	F-HH	Growth	6.095	0.127	0.43*	Exp(b_1x)
	F-HV	Growth	6.333	0.104	0.51**	Exp(b_1x)
	F-HV/HH	Logarithmic	110.087	82.843	0.24*	ln(x)
PLR/ALOS (dataset B)	P-HH	Inverse	127.077	-78.192	0.41*	b_1/x
	P-HV	Compound	162.352	1.018	0.36*	b_1^x
	P-VH	Linear	174.712	2.447	0.22 ^{ns}	x
	P-VV	Linear	156.054	1.902	0.19 ^{ns}	x
	Entropy (H)	Growth	3.674	1.343	0.33*	Exp(b_1x)
	Alpha (α)	Compound	63.892	1.016	0.35*	b_1^x
	Anisotropy (A)	Compound	155.239	0.377	0.23 ^{ns}	b_1^x
	H(1-A)	Growth	4.144	1.003	0.37*	Exp(b_1x)
	RVI	Compound	74.608	2.152	0.45*	b_1^x
	T33	S	5.043	-0.025	0.40*	Exp(b_1/x)
WorldView-2 (dataset C)	Band 1 (Coastal Blue)	Compound	199.643	0.986	0.35*	b_1^x
	Band 2 (Blue)	Compound	226.947	0.980	0.41*	b_1^x
	Band 3 (Green)	Compound	211.070	0.985	0.39*	b_1^x
	Band 4 (Yellow)	Compound	192.902	0.988	0.32*	b_1^x
	Band 5 (Red)	Compound	179.355	0.990	0.36*	b_1^x
	Band 6 (Red-Edge)	Compound	167.905	0.996	0.23 ^{ns}	b_1^x
	Band 7 (NIR1)	-	-	-	<0.1	-
	Band 8 (NIR2)	-	-	-	<0.1	-
	NDVI ₇₋₅	Growth	4.517	0.002	0.33*	Exp(b_1x)
	NDVI ₈₋₅	Growth	4.545	0.002	0.37*	Exp(b_1x)
	NDVI ₇₋₆	Compound	7.233	1.020	0.42*	b_1^x
	NDVI ₈₋₆	Compound	5.256	1.021	0.44*	b_1^x
	FBD/ALOS & WorldView-2 (dataset D)	CVI ₁	Linear	-132.333	62.275	0.52**
CVI ₂		Linear	-114.558	54.896	0.62**	x
CVI ₃		Linear	-107.183	46.293	0.60**	x
CVI ₄		Linear	-95.233	41.881	0.49*	x
CVI ₅		Linear	-65.017	32.089	0.56**	x
CVI ₆		Linear	-36.260	26.556	0.41*	x
CVI ₇		Linear	-67.279	19.682	0.20 ^{ns}	x
CVI ₈		Linear	-110.518	24.296	0.24 ^{ns}	x

Dataset E

-
- **調査した90個プロット:**
 - **学習データセット: 63個 (70%);**
 - **検証データセット: 27個 (30%)。**

学習データを用いて作成した線形回帰モデル(MLR) :

- **Dataset A: (MLR1)**

$$B = 137.978 + 18.523 \times P_1 + 6.289 \times P_2$$

- **Dataset B: (MLR2)**

$$B = 140.134 + 12.417 \times P_1 + 7.099 \times P_2 + 7.970 \times P_3 + 14.295 \times P_4$$

- **Dataset C: (MLR3)**

$$B = 154.335 + 7.770 \times P_1 - 5.177 \times P_3 - 4.260 \times P_4$$

- **Dataset D: (MLR4)**

$$B = 148.651 + 16.586 \times P_1 - 9.822 \times P_2$$

- **Dataset E: (MLR5)**

$$B = 141.418 + 13.887 \times P_1 + 13.084 \times P_2 + 8.274 \times P_3 + 10.270 \times P_4 + 13.093 \times P_6$$

- **where B is the estimated biomass, $P_1, P_2, P_3, P_4,$ and P_6 are the principal components of the corresponding datasets.**

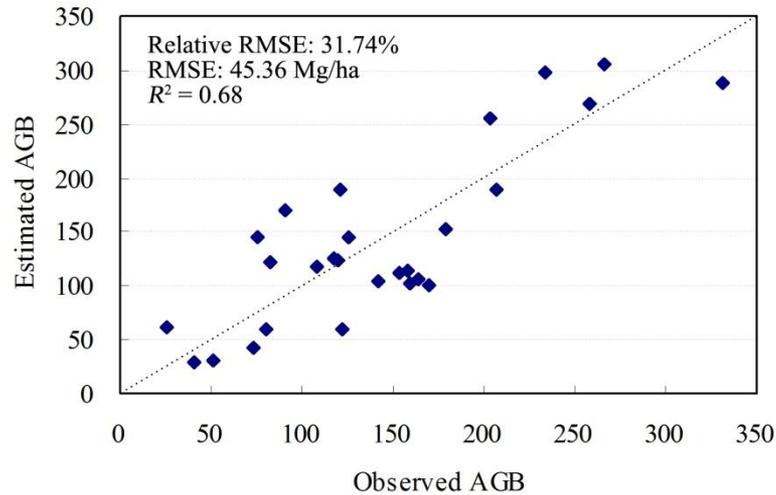
五つのモデルを用いて推定したバイオマスの精度

Dataset	Calibration (n = 63)			Independent validation (n = 27)		
	R^2 actual vs. predicted	RMSE/ Mgha ⁻¹	Relative RMSE/%	R^2 actual vs. predicted	RMSE/ Mgha ⁻¹	Relative RMSE/%
A (FBD)	0.70**	43.09	30.61	0.68**	45.36	31.74
B (PLR)	0.75***	38.55	27.38	0.71***	42.82	29.97
C (WorldView-2)	0.70**	42.87	30.45	0.65**	49.40	34.57
D (CVIs)	0.83***	30.75	21.84	0.79***	35.13	24.58
E (All parameters)	0.91***	22.39	15.90	0.89***	24.41	17.08

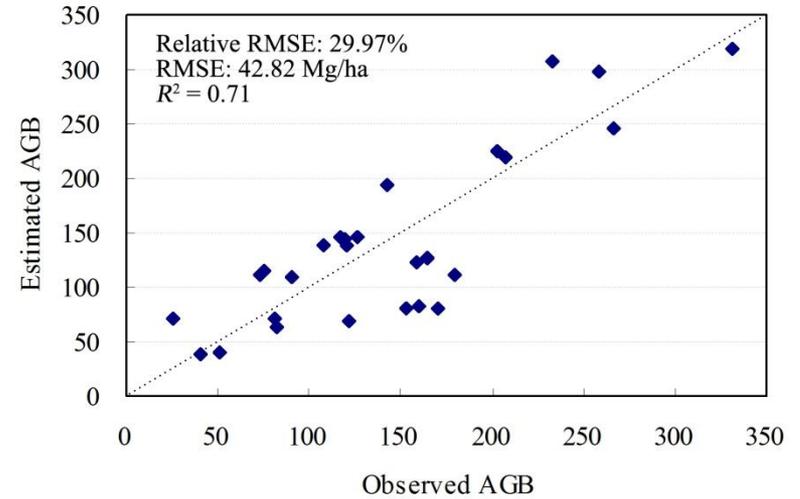
* Significant at the 0.05 level; ** Significant at the 0.01 level; *** Significant at the 0.001 level.

- The FBD and PLR-derived models explained about 70% of the variance in the validation plots.
- The WorldView-2 model can only explain about 65% of the variance.
- The CVI model explained additional 11% and 14% of the variability compared with the FBD and WorldView-2 models.
- The MLR model using dataset E can explain about 89% of the variance and gives the lowest RMSEs in the five datasets.

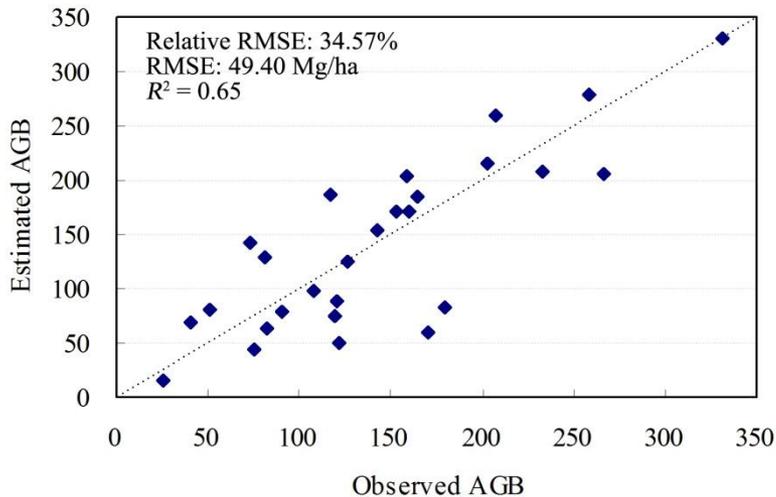
モデルによる推定したバイオマスと現地調査データとの比較:



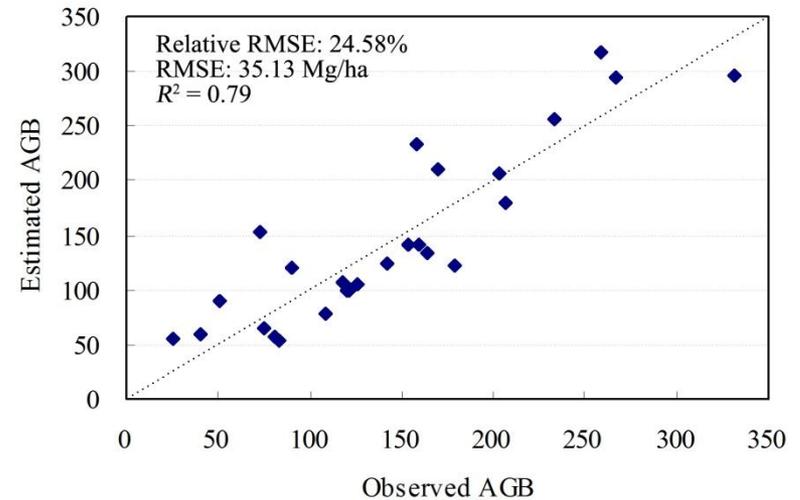
Dataset A (MLR1)



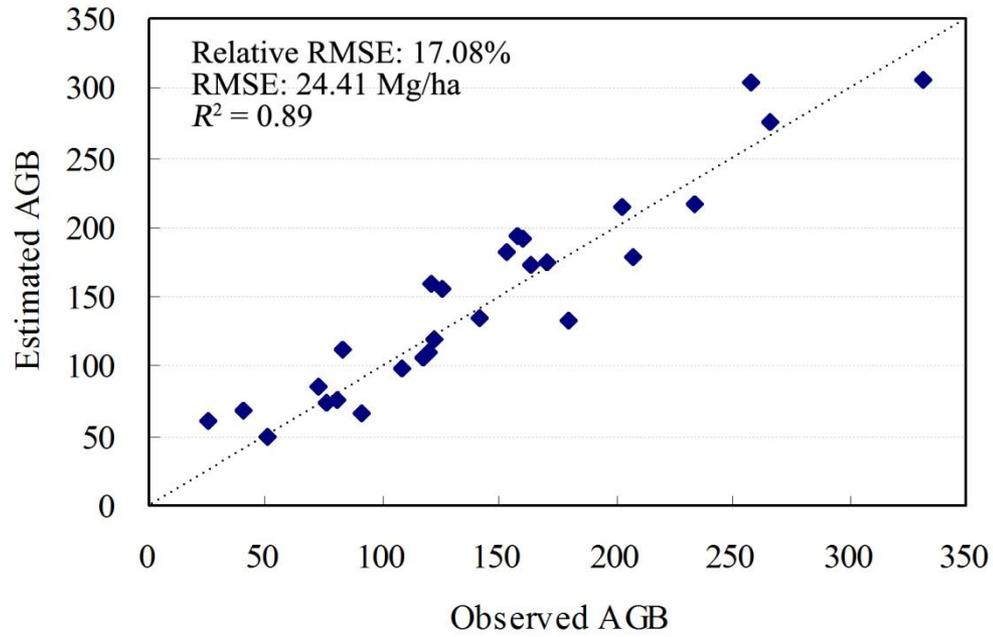
Dataset B (MLR2)



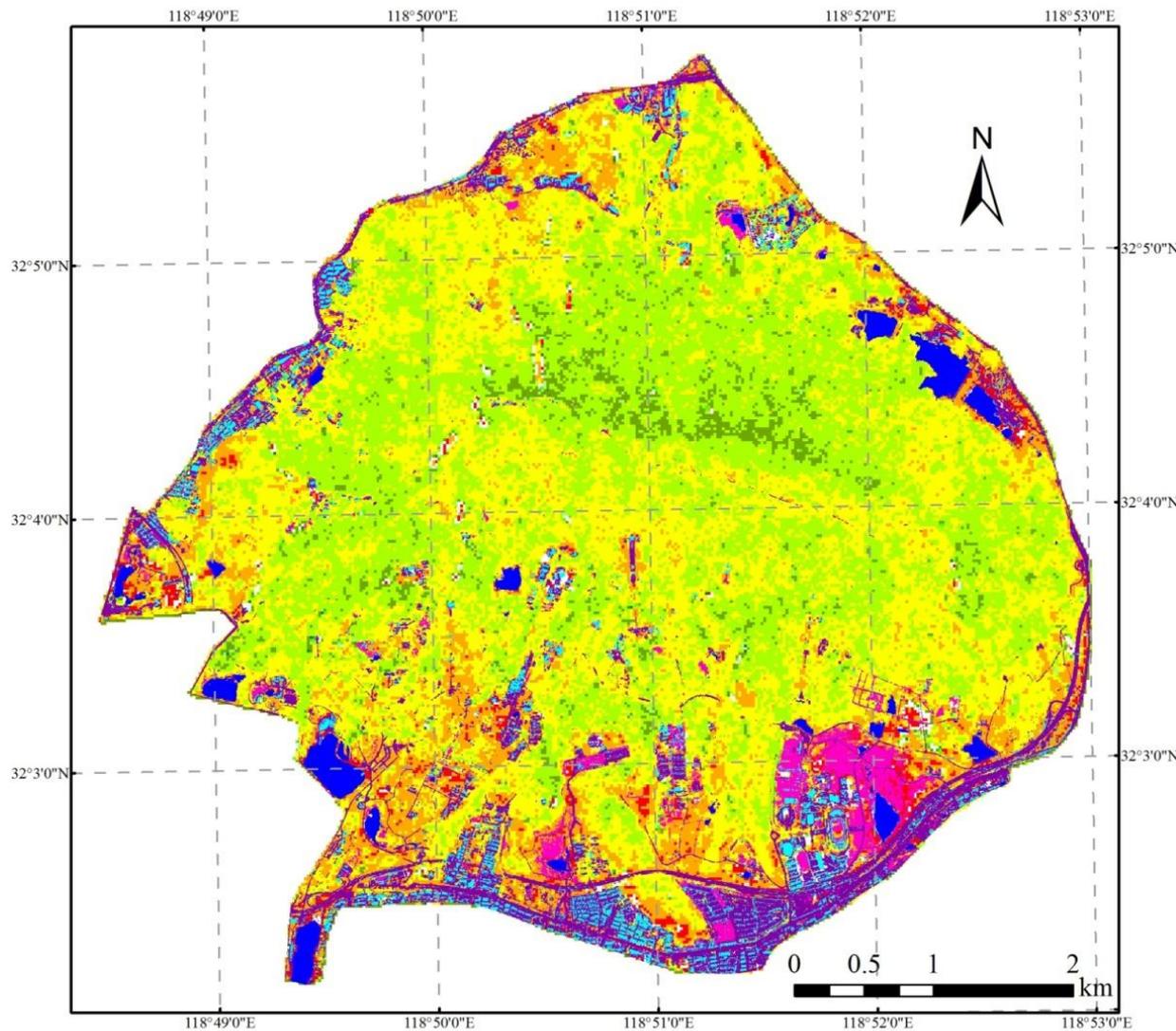
Dataset C (MLR3)



Dataset D (MLR4)



Dataset E (MLR5)



MLR5で推定した バイオマス分布図

Legend

Non-forest area

Building

Water

Soil

Road

Biomass (Mg/ha)

<10

10 - 50

50 - 100

100 - 150

150 - 200

200 - 250

250 - 300

300 - 350

350 - 400

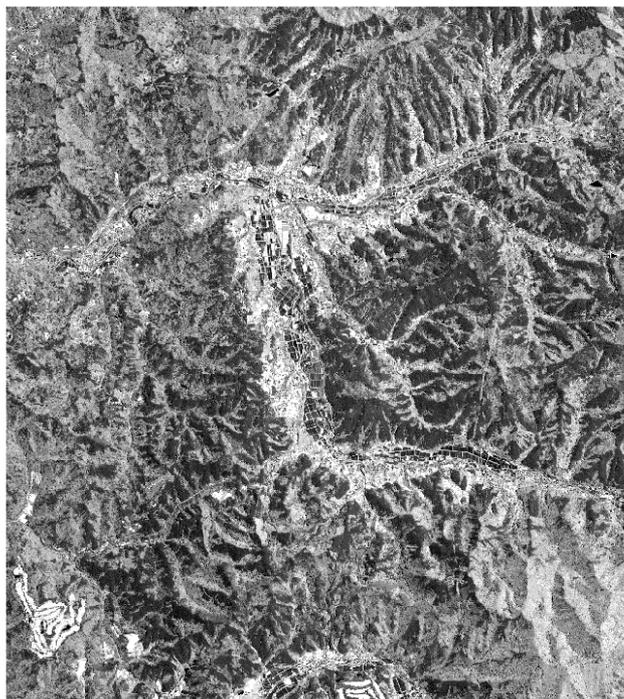
400 - 450

(3) 松くい虫被害木の把握

- 研究地：長野県松本市四賀地区
- 使用したデータ：
 - ① SkySat-2衛星画像
 - ② 航空機LiDARデータ
- 解析方法：Valley-following法による樹冠と樹頂点抽出
教師付きピクセルベース樹冠分類

使用データ

- SkySat-2衛星データ(2015年5月30日撮影)



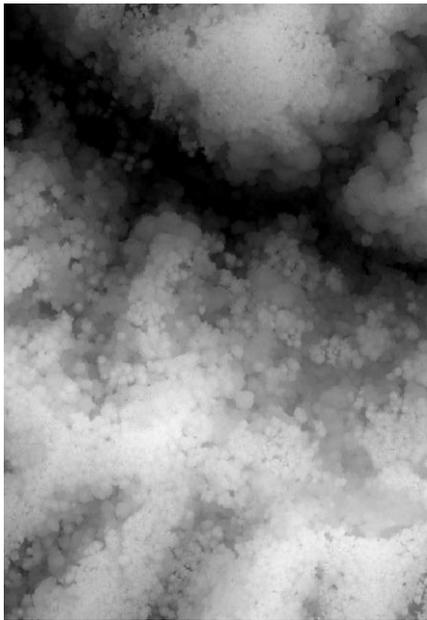
白黒画像
(1バンド分解能0.8m)



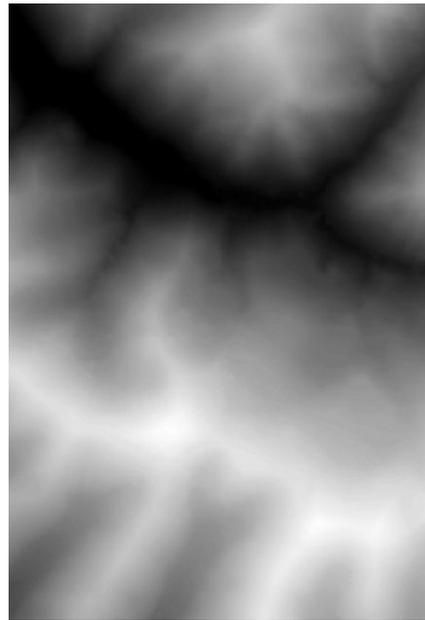
マルチスペクトル画像
(4バンド分解能2.0m)

使用データ

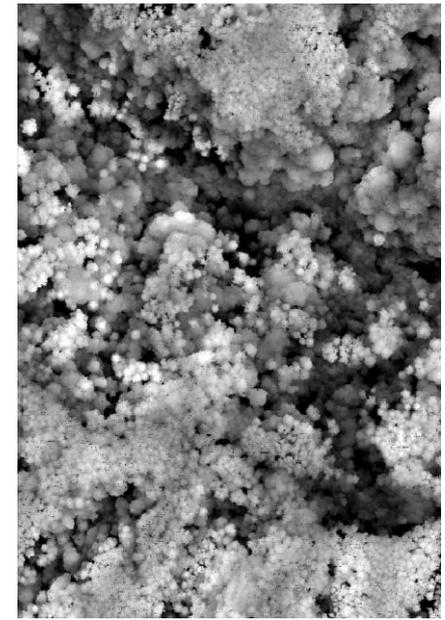
- 航空レーザデータ(2013年撮影(最低4点/m²))



DSM(分解能0.5m)



DEM(分解能0.5m)

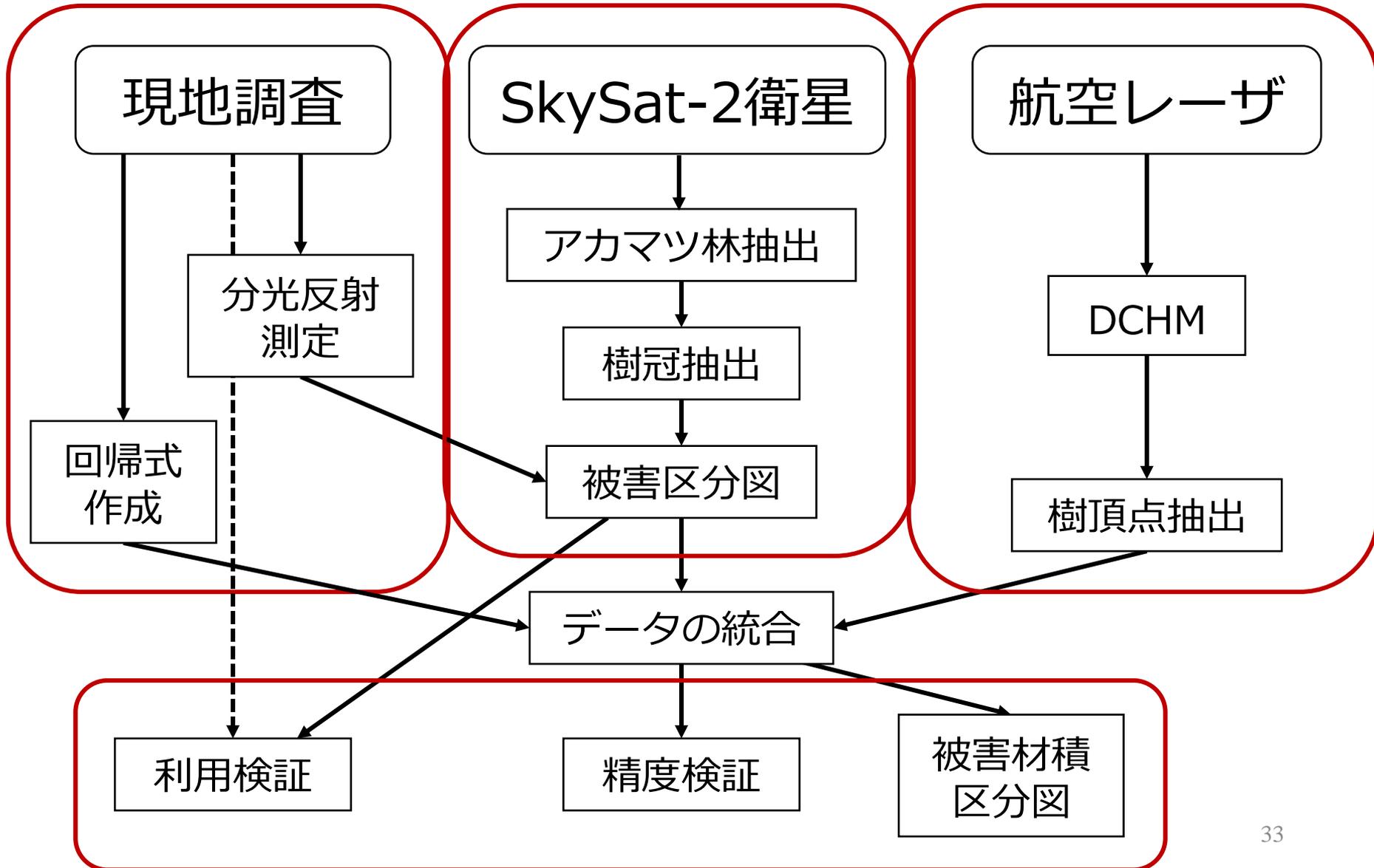


DCHM(分解能0.5m)

使用ソフト・使用機器

- ArcGIS 10.0 (ESRI, USA)
- IMAGINE 8.6 (ERDAS, USA)
- Geomatica 9.1.8 (PCI, Canada)
- ENVI LiDAR 5.3 (Exelis, USA)
- 携行分光放射計 MS-720 (英弘精機, 日本)

研究の流れ



調査地概要



長野県全体

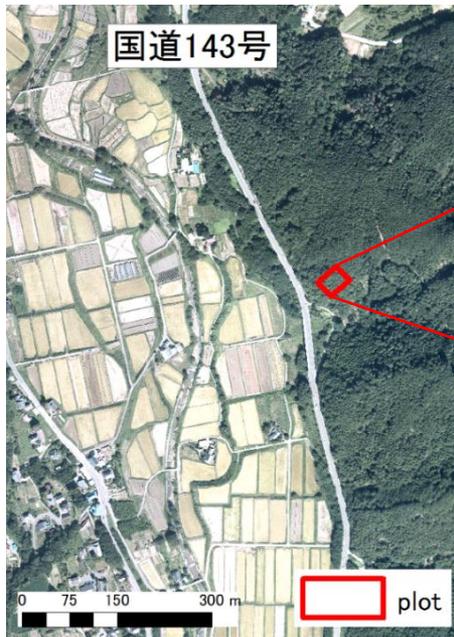


調査地全体

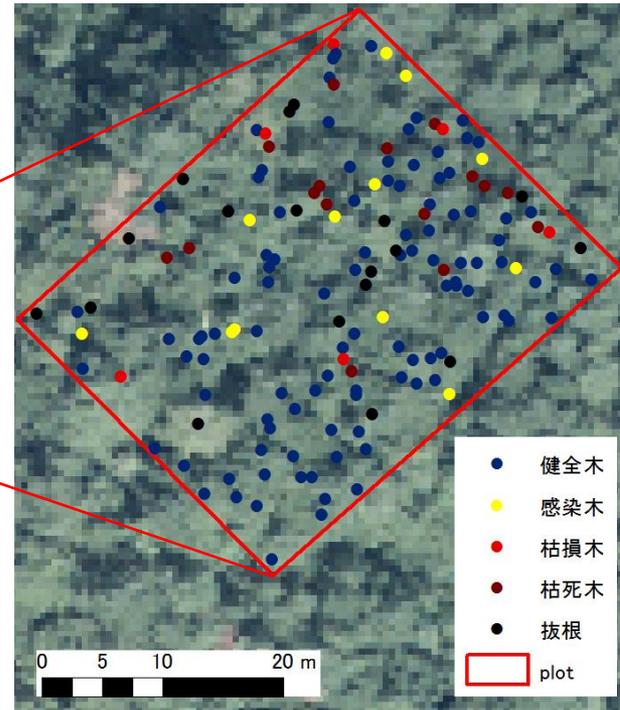
現地調査

- プロット作成(2015年8月)
- 分光反射測定(2015年8月)
- 利用検証(2015年12月)

現地調査プロット作成



プロット周辺拡大図



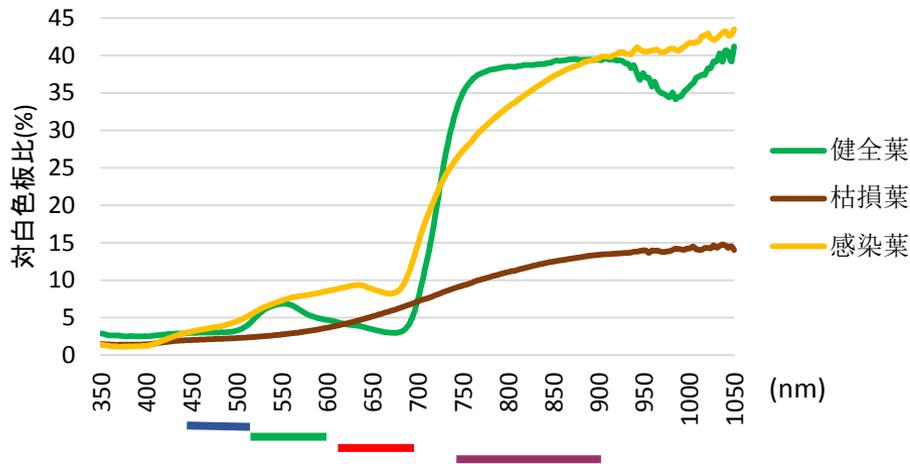
立木位置図

調査地東側道路沿いに30m x 38mのプロットを8月末に1つ設置

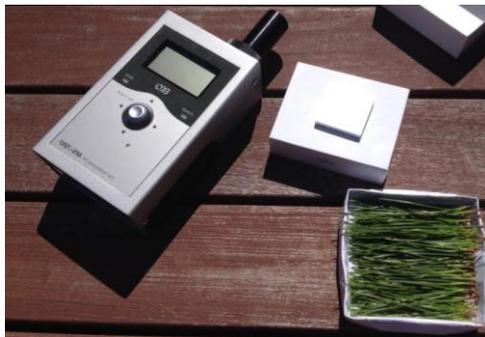
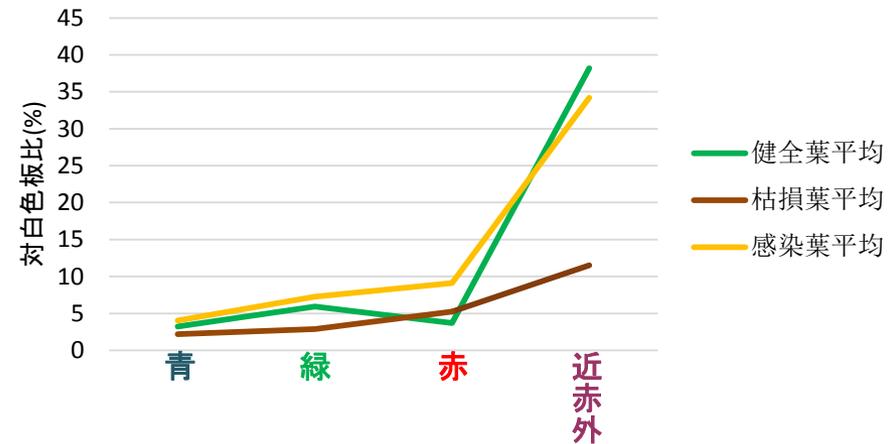
立木位置・胸高直径・被害の進行度・伐根の位置を測定

松枯れ被害葉の分光反射特性

スペクトルパターン



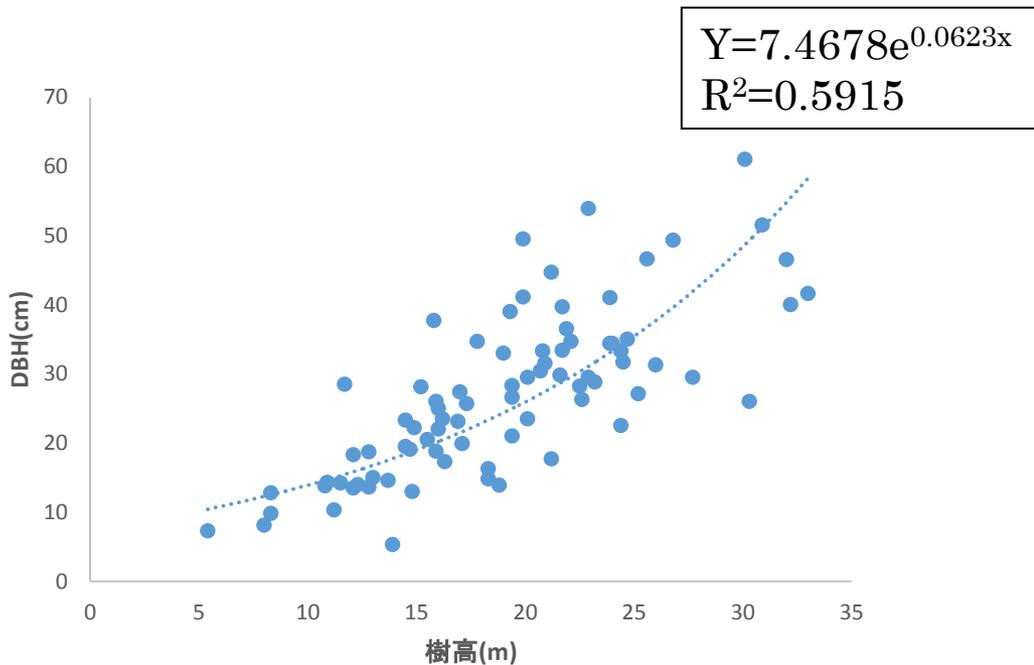
平均波長の分光反射



健全葉・枯損葉(茶)・感染葉(黄)で分光反射特性が異なる

樹高とDBHの回帰式作成

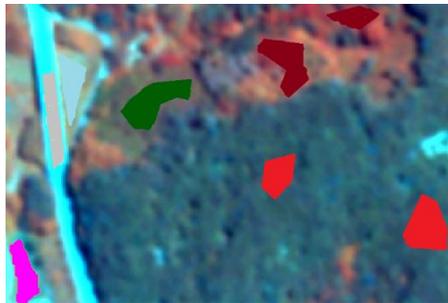
調査地内2ヶ所で測定した81本のアカマツの樹高とDBHから回帰式を作成



画像解析

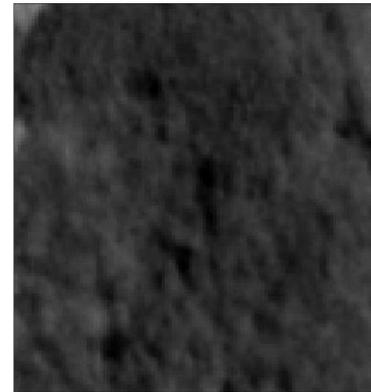
被害区分図作成

教師付きピクセルベース分類で健全木と被害木に分類

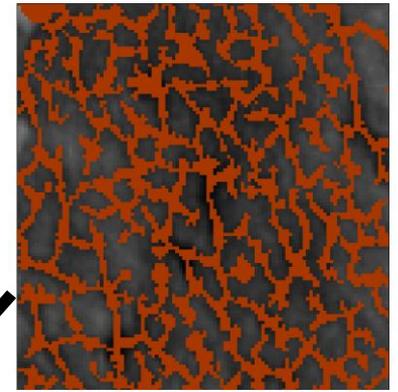


	アカマツ
	他の針葉樹
	広葉樹
	空き地
	水田
	道路

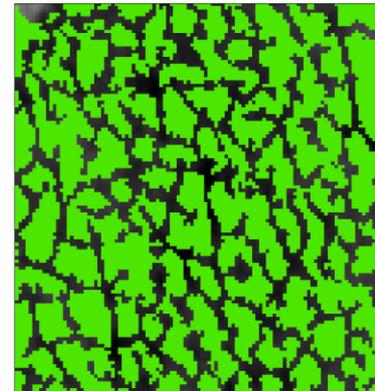
教師付きピクセルベース分類イメージ図



白黒画像



低い輝度値を結ぶ

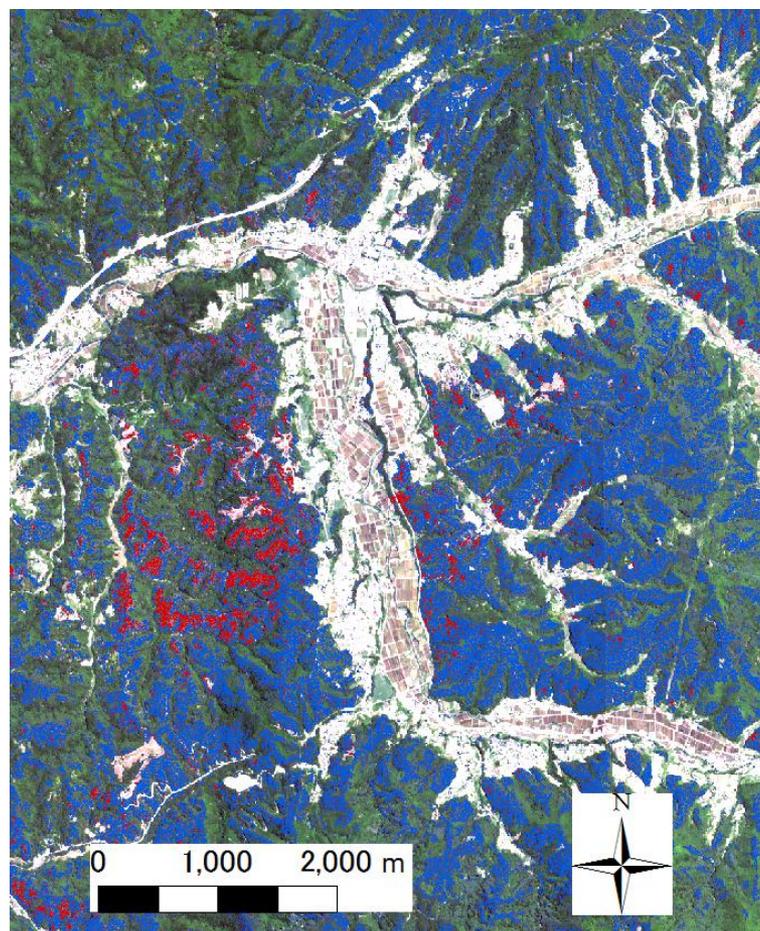


樹冠

	低い輝度値
	樹冠

Valley Following法イメージ図

被害区分図作成

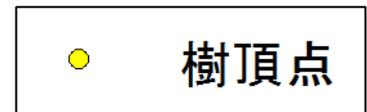
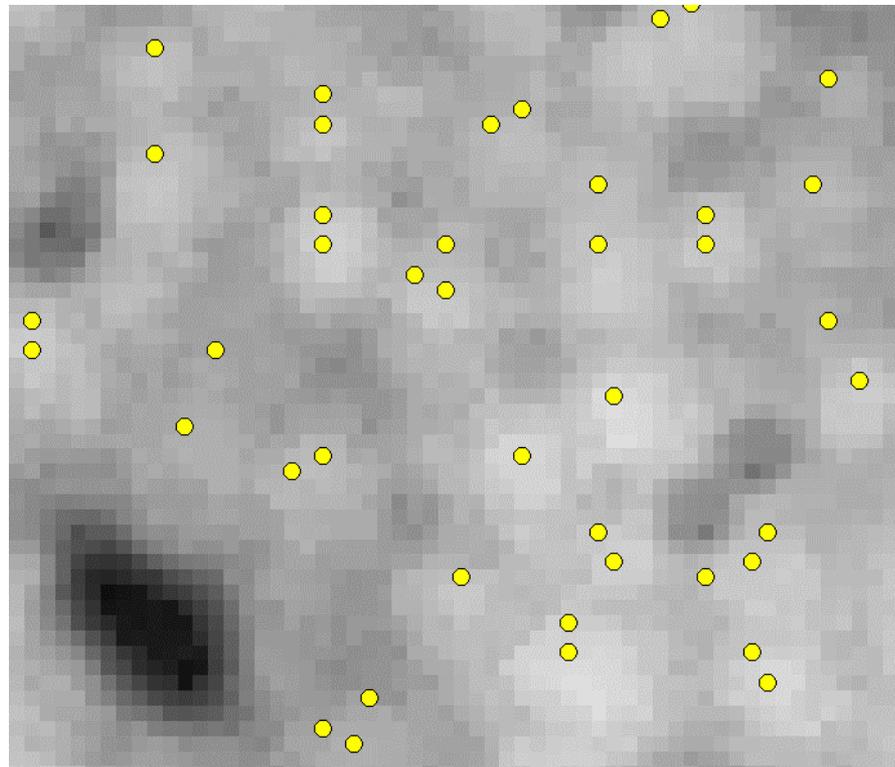


健全木
被害木

調査地全体の被害区分図

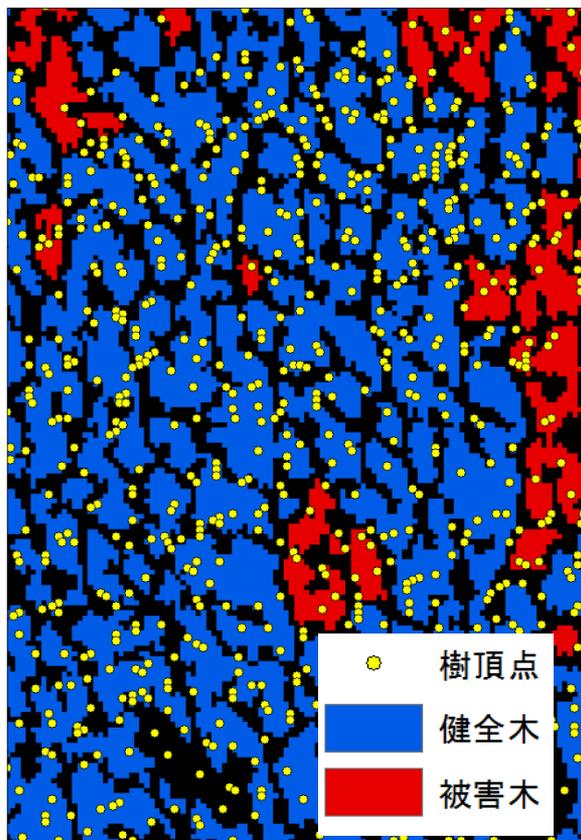
樹頂点抽出

Tree Tops法を用いてDCHMから樹頂点抽出

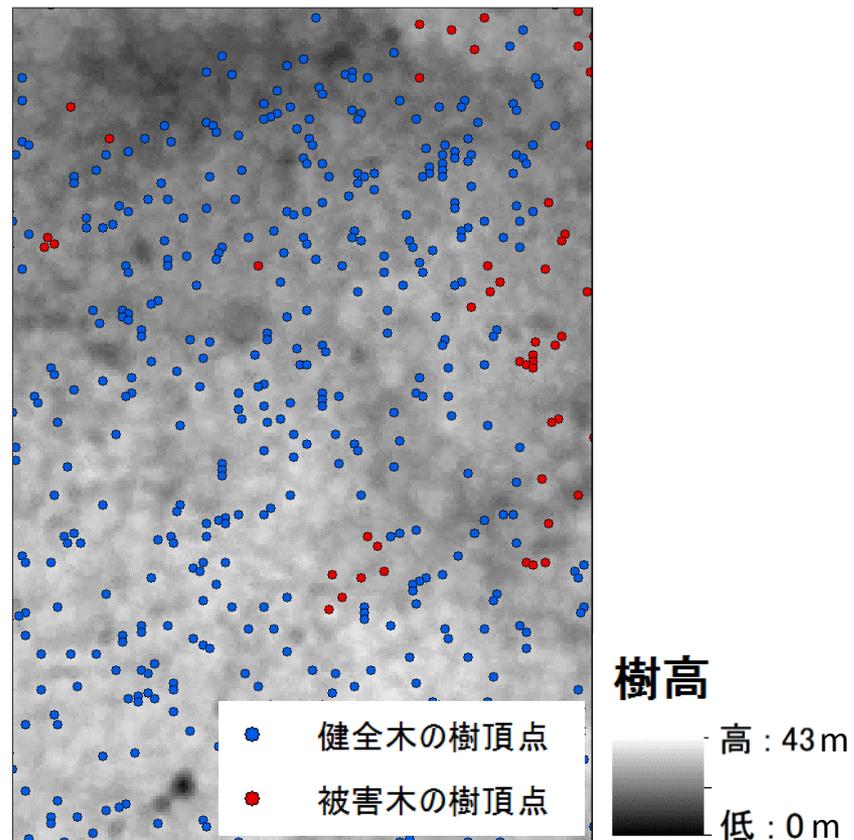


樹頂点画像

データの統合

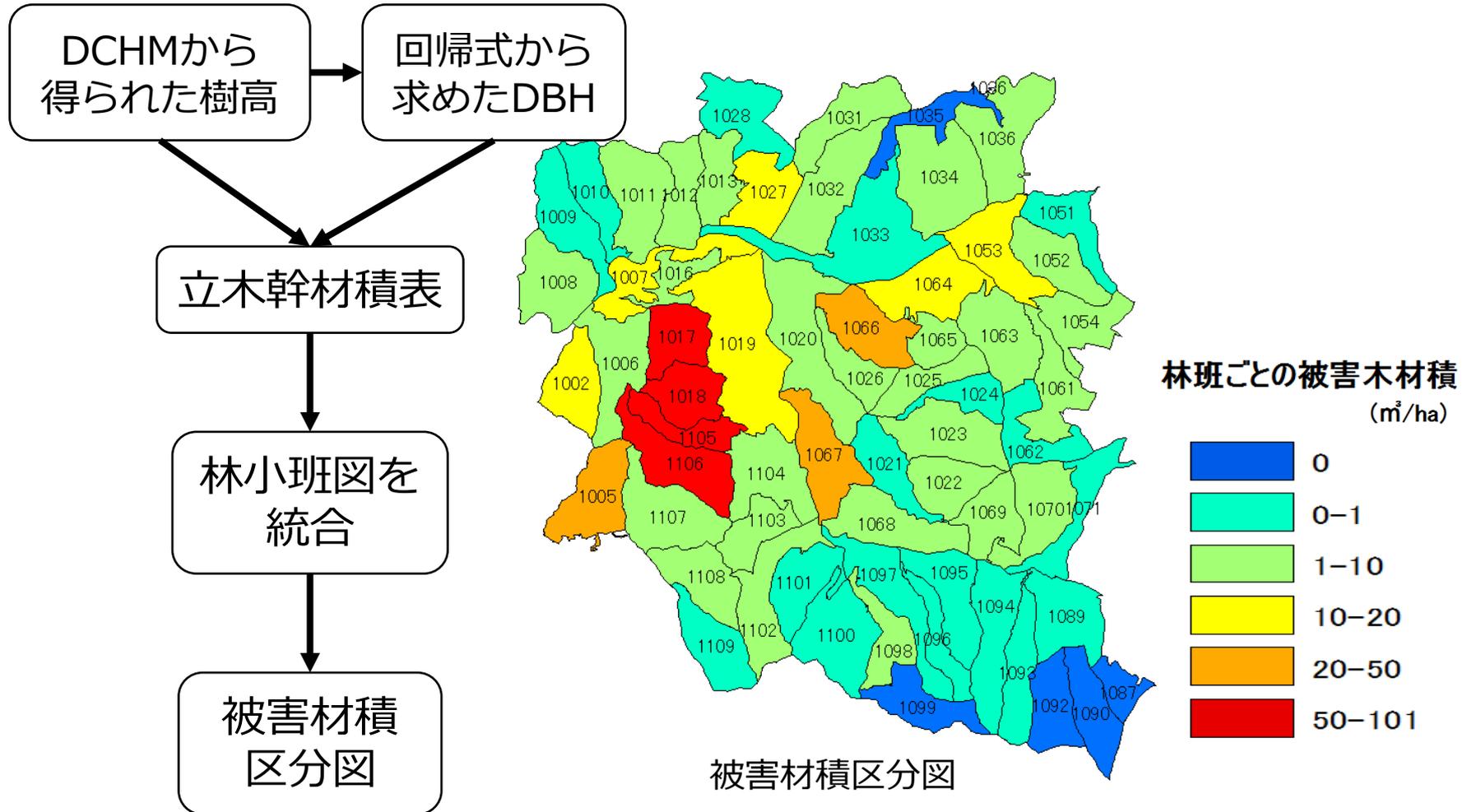


被害区分図と樹頂点画像の統合



各樹頂点とDCHMの統合

被害材積区分図作成



分類精度検証

0.1haプロットを利用した現地調査結果と
リモートセンシング結果の比較

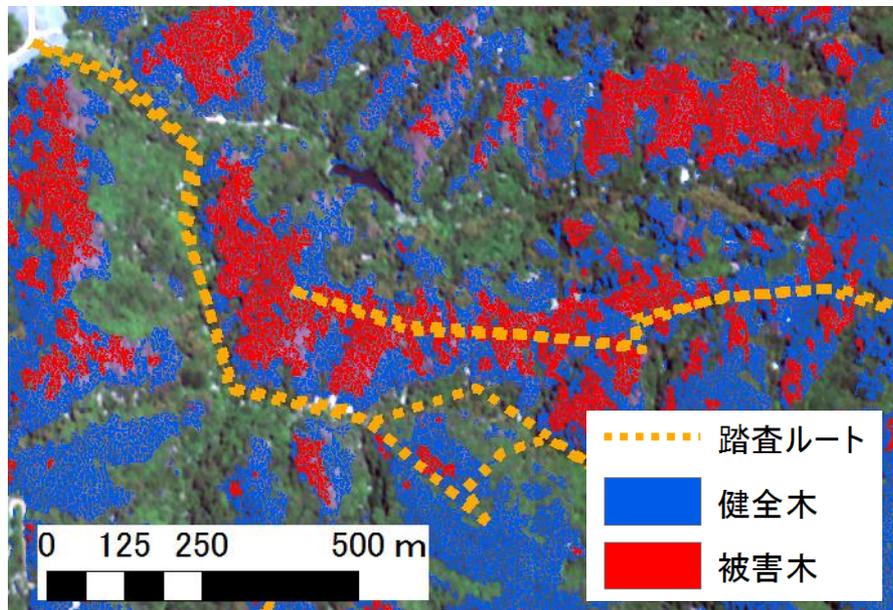
	現地調査上層木結果		RS結果	
	本数	平均樹高	本数 精度	平均樹高 精度
健全木	45	21.6	39	19.8
			87%	92%
被害木	14	22.5	8	19.7
			57%	88%
合計	59	21.8	47	19.8
			80%	91%

※DBH26cm以上を上層木

※現地調査の全立木合計は137本

被害区分図の利用検証

12月14日に谷筋、尾根筋、異なる標高で被害区分図を利用した目視による踏査を実施



利用検証対象地域



まとめ

- 衛星画像による単木の解析は 1 m 以内の分解能が必要
- SkySat-2衛星データを使用して健全木と被害木に分類することは可能
- SkySat-2衛星データを使用して被害木を枯損木と感染木に分類することは困難

- SkySat-2衛星画像の位置精度は低かったので、今年は高精度のWorldView-2画像を使用することになった:



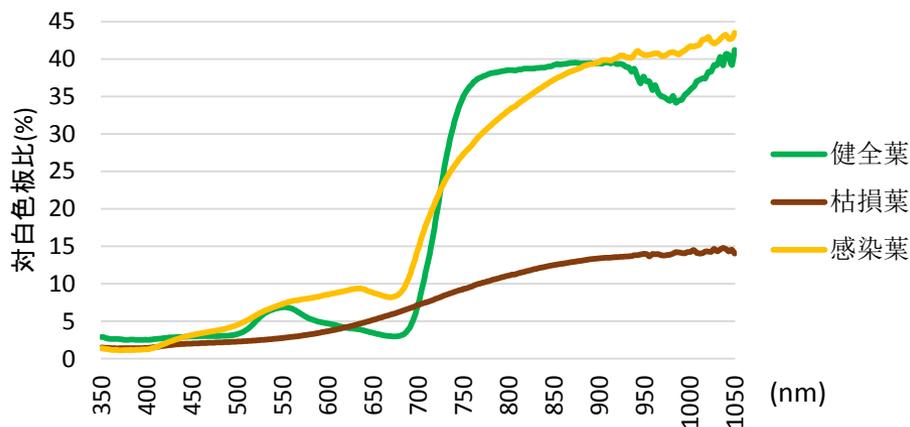
SkySat-2

Airborne orthoimage

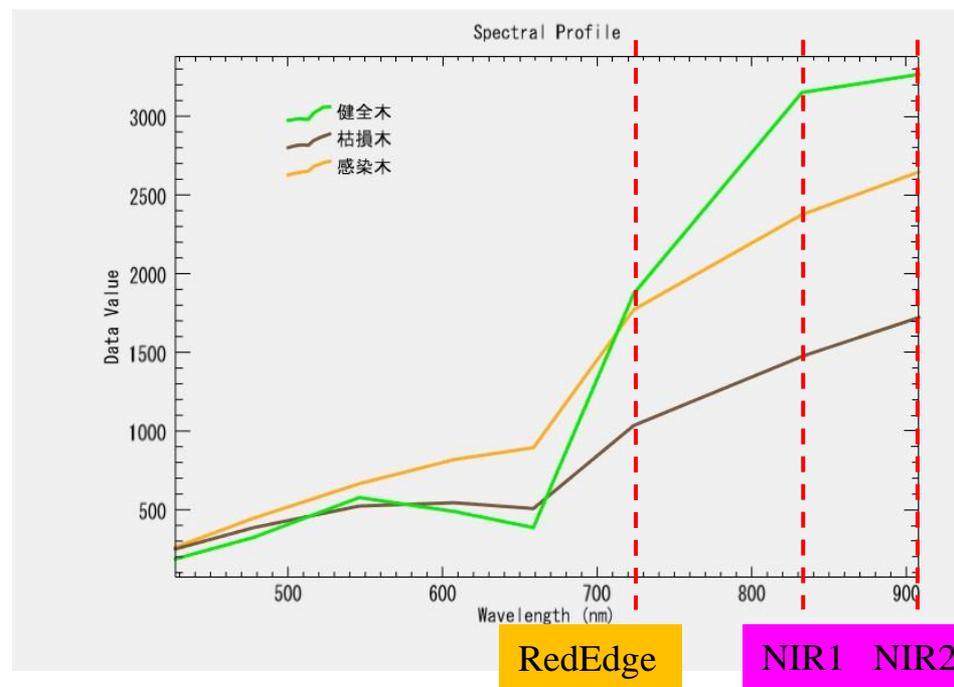
WorldView-2

- WorldView-2画像の分光反射特性は現地調査結果と合っていることがわかった:

分光反射計で計測した



WorldView-2データの反射曲線



そして、WorldView-2はRedEdgeと二つ近赤外線バンドを持っているので、被害木を枯損木と感染木に分類できることも期待している。

- しかし、松枯れ被害木の抽出とモニタリングには多時期観測データが必要である；
- 一方、精度の高いWorldViewやGeoEyeなどの撮影は非常に高価である；
- それで、安価で撮影できる国産高精度の衛星写真を期待している。

ALOS-3に期待していること

- 1m以内の高い解像度であること
- マツクイムシ被害木を分類するのに有効なバンドを含んでいること
- 高い位置精度であること
- 値段が安いこと
- 注文から受け取りまでの期間が短いこと

Thank you very much!

