

光学センサとSARの衛星画像データに含まれる 情報の詳細化および有用情報の引き出し



京都大学工学研究科都市社会工学専攻
地球資源学講座 地殻環境工学分野 小池 克明

● 研究の背景と目的

[光学センサ関連:I・II・III](#), [SAR関連:IV・V](#)

I. マルチスペクトルからハイパースペクトルへの変換

Hoang N.T., Koike K. (2017) *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v.133, p.157-173.

Hoang N.T., Koike K. (2018) *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v.137, p.15-28.

II. マルチスペクトル衛星画像の空間分解能の向上法

III. 金属鉱床に起因した植生異常検出のための新しい植生指標

Hede A.N.H., Kashiwaya K., Koike K., Sakurai S. (2015) *Remote Sensing of Environment*, v.171, p.83-97.

Hede A.N.H., Koike K. et al. (2017) *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v.18, p.1-13.

IV. ポラリメトリSARデータによる比誘電率・比透磁率の算定法

Saepuloh A., Koike K. et al. (2015) *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, v.12(8), p.1620-1624.

V. 差分干渉SAR (D-InSAR) による部分的地形変位から領域全体 変位への連続化

● まとめ

使用ENVI機能: Spectral Hourglass Wizard, SARscapeなど 1

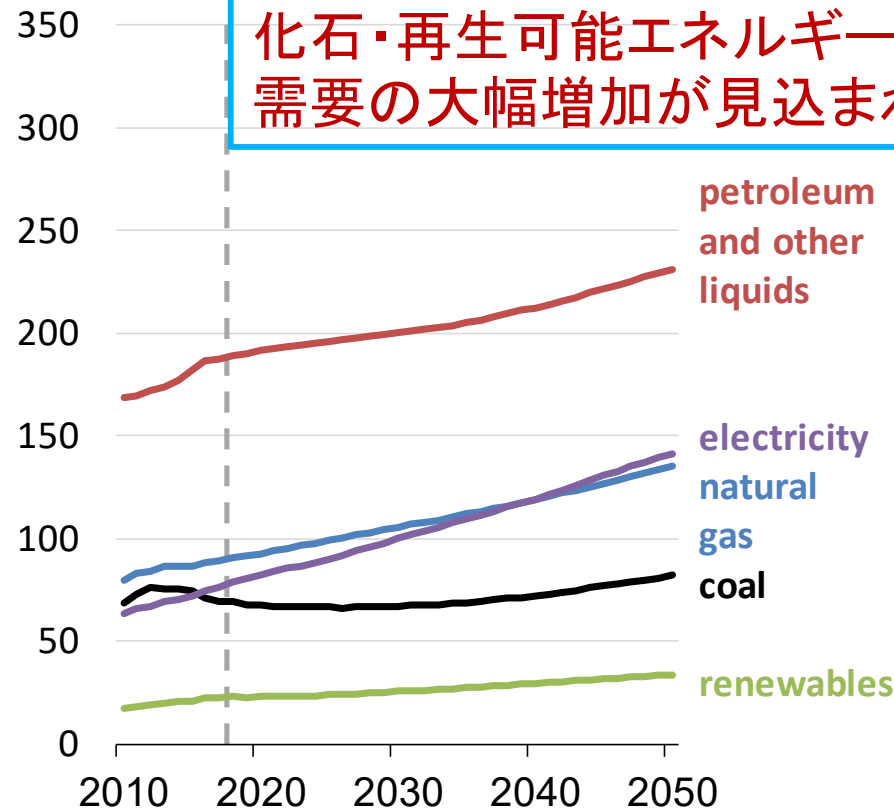
研究背景

金属は社会のあらゆる工業製品やインフラストラクチャーの材料

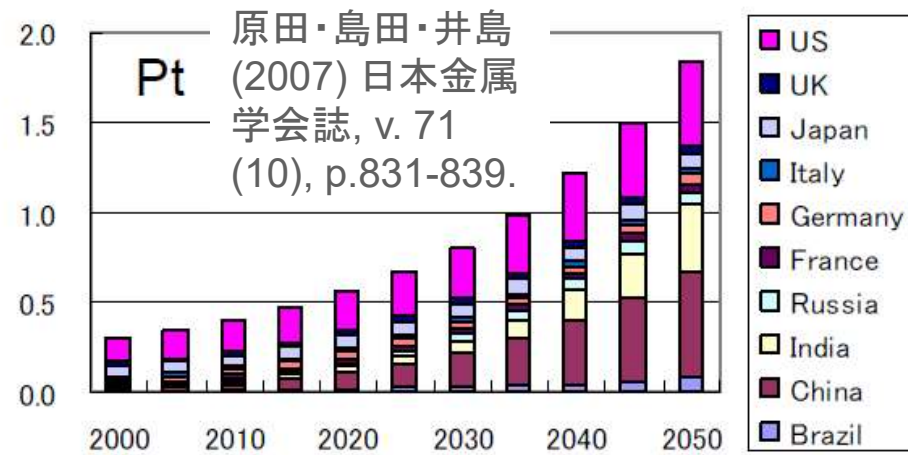
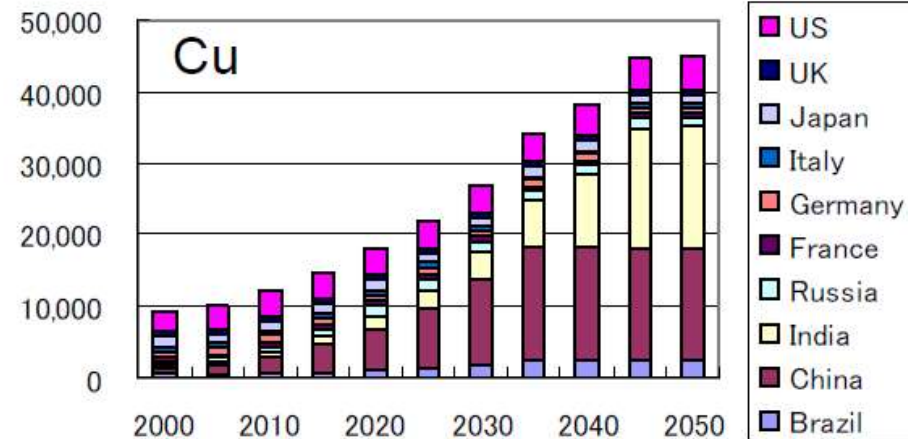
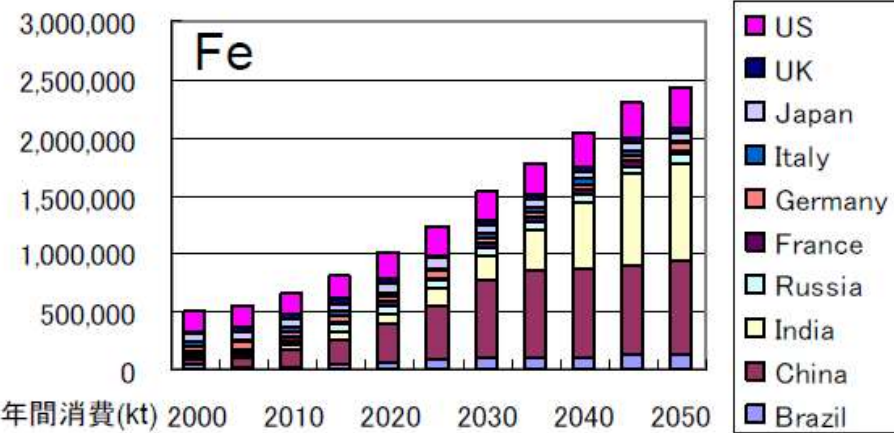
- 世界的な(特に発展途上国での)需要の指数関数的増加が見込まれている。
- 需要増加に対処するには、陸域・海域でのさらなる金属資源の確保が不可欠

End-use energy consumption by fuel, world
quadrillion British thermal units

化石・再生可能エネルギー資源も同様に需要の大幅増加が見込まれている。



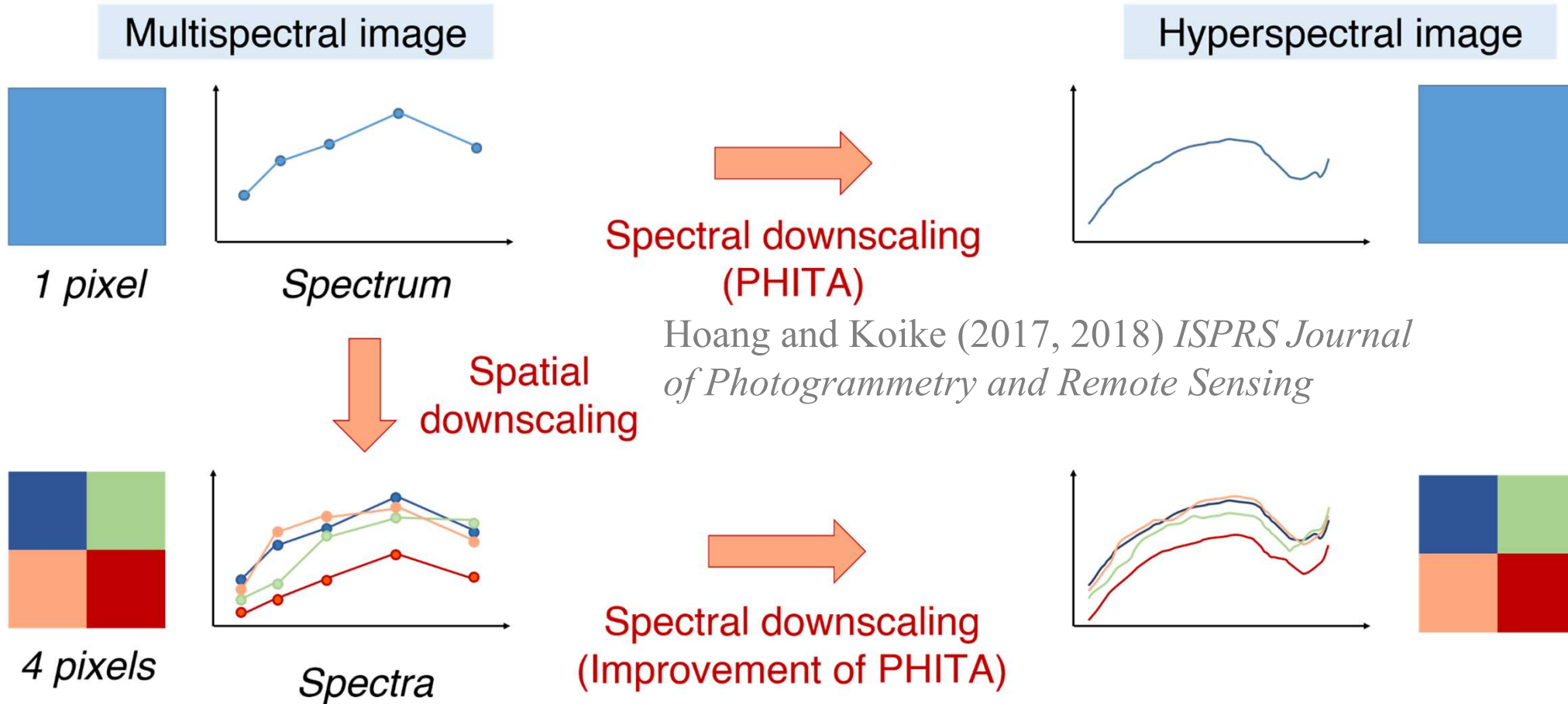
U.S. Energy Information Administration (eia), *International Energy Outlook 2019 with projections to 2050*, Sep. 2019, Washington, DC. www.eia.gov/ieo



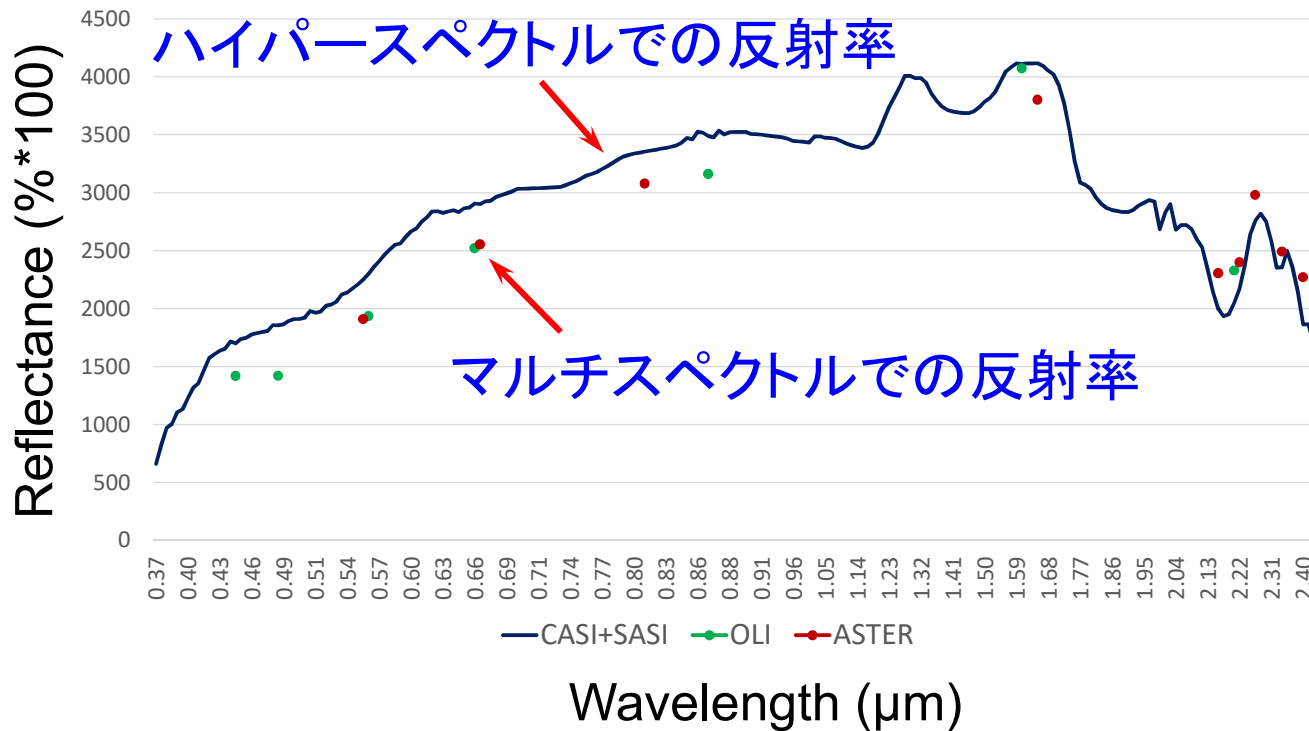
本研究の目指すところ

金属・地熱資源に起因した情報をマルチスペクトルやSAR衛星データから高精度に抽出するには？

- 植生の影響 → これに隠された地質情報を読み取れないか？
- 空間分解能, スペクトル分解能: 衛星マルチスペクトル ⇔ 航空機ハイパースペクトル
- RSは基本的には面情報 → 地下の3次元情報に拡張できないか？
- 地表面の計測 → 深部構造を推定できないか？
- 鉱物同定が主: 種々の物性や化学組成の情報が得られないか？
- 地表物質識別の不確かさ: 指標の高さ ≠ 確実性, Ground truthが不可欠



マルチスペクトルからハイパースペクトルへの変換 — 資源関連鉱物の識別精度を向上させるには？ —



●当然, ハイパースペクトルを利用すれば向上できる。

明礬石の反射スペクトルの比較

マルチスペクトル
画像を代表する
Landsat ETM+
scene
(185 × 185 km²)

唯一の汎地球的
ハイパースペクトル
画像である
Hyperion
scene
(7.5 × 100 km²)

Orbit

- ハイパースペクトルの撮影範囲は極限られている。
- Landsatシリーズなどのマルチスペクトル衛星データの方が観測範囲が遙かに広く, 全陸域をカバーし, 長年にわたるデータの蓄積も多い。



マルチスペクトル衛星データをハイパーに変換できないか？

多変量回帰モデルによるハイパースペクトルとマルチスペクトルの反射率データの関連付け

PHITA: *Pseudo-Hyperspectral Image Transformation Algorithm*

バンド i , 位置 j でのハイパー画像の反射率

バンド b , 位置 j でのマルチスペクトル画像の反射率

補助情報としての
鉱物指数など

$$H_{ij} = \beta_{0i} + \sum_{b=1}^n \beta_{bi} \cdot M_{bj} + \sum_{c=1}^m \beta_{ci} \cdot INDEX_{cj} + \varepsilon_{ij}$$

切片
未知の多変量回帰係数
残差

どのモデルが最良か？

$$y \sim x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5$$

$$y \sim x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_6$$

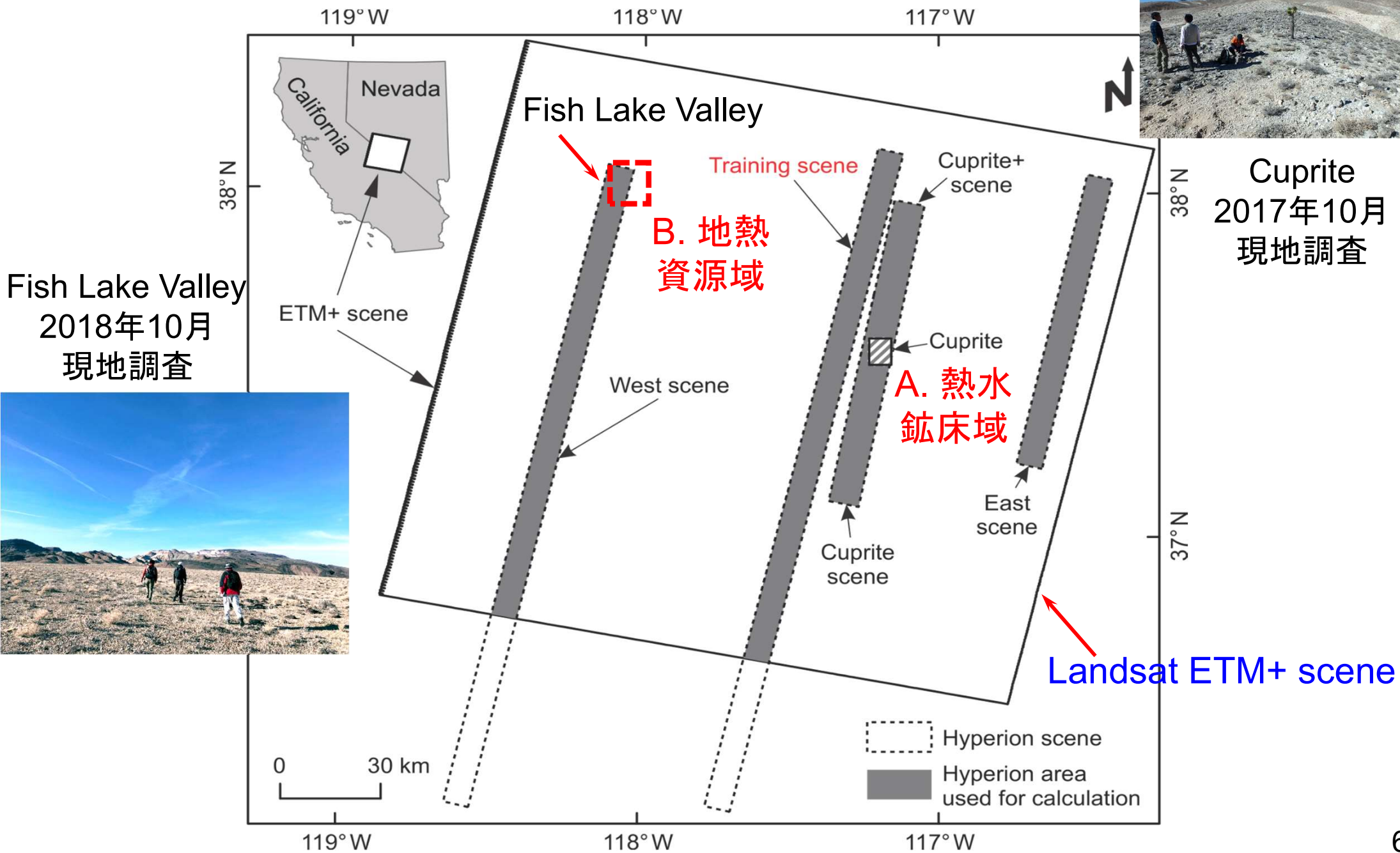
$$y \sim x_1 + x_2 + x_3 + x_4$$

$$y \sim x_1 + x_2 + x_3$$

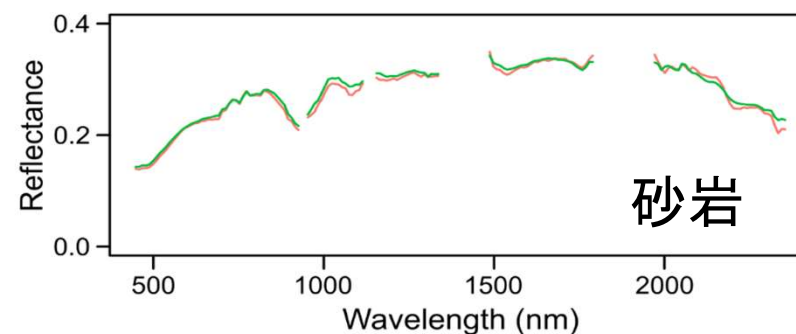
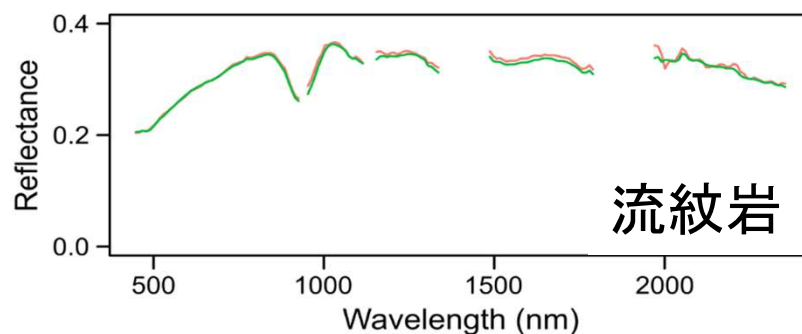
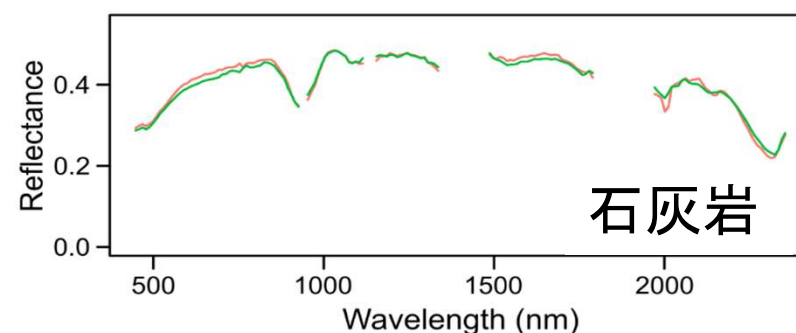
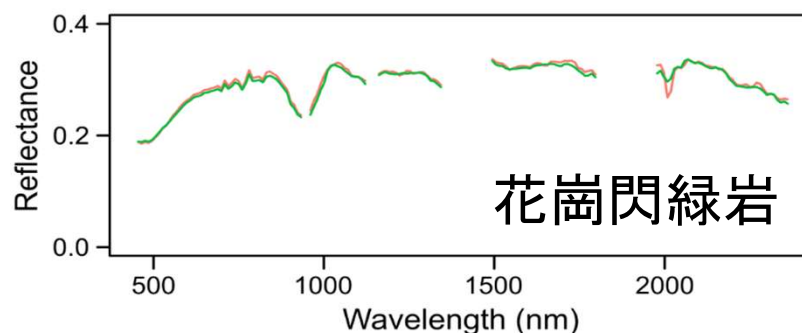
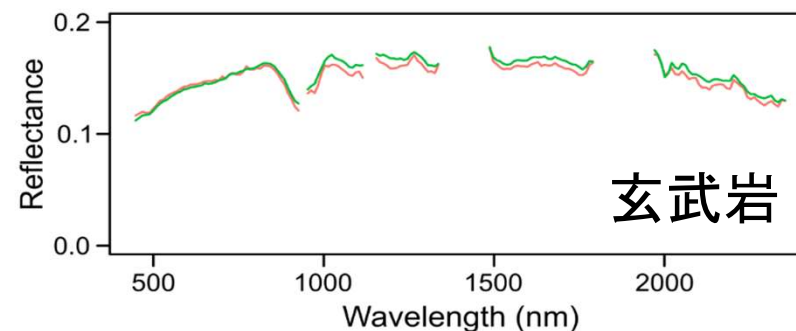
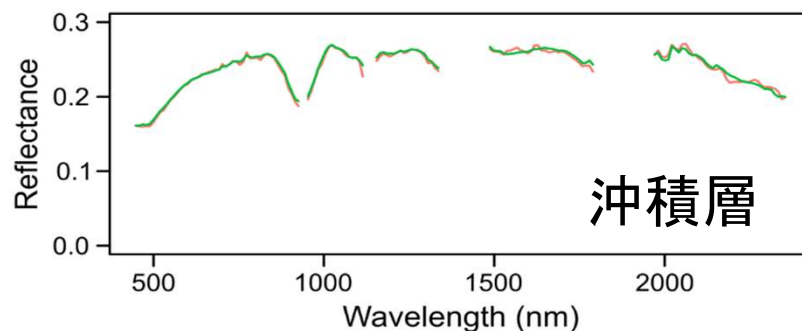
**Bayesian Model Averaging
(BMA)の適用**

誤差の大きさとモデルの複雑さの兼ね合いから、事後確率を最大にするモデルが最良

PHITAの適用対象地域(アメリカ西部ネバダ州)



ケーススタディAー熱水鉱床域(Cuprite)へのPHITAの適用： 反射スペクトルの再現性



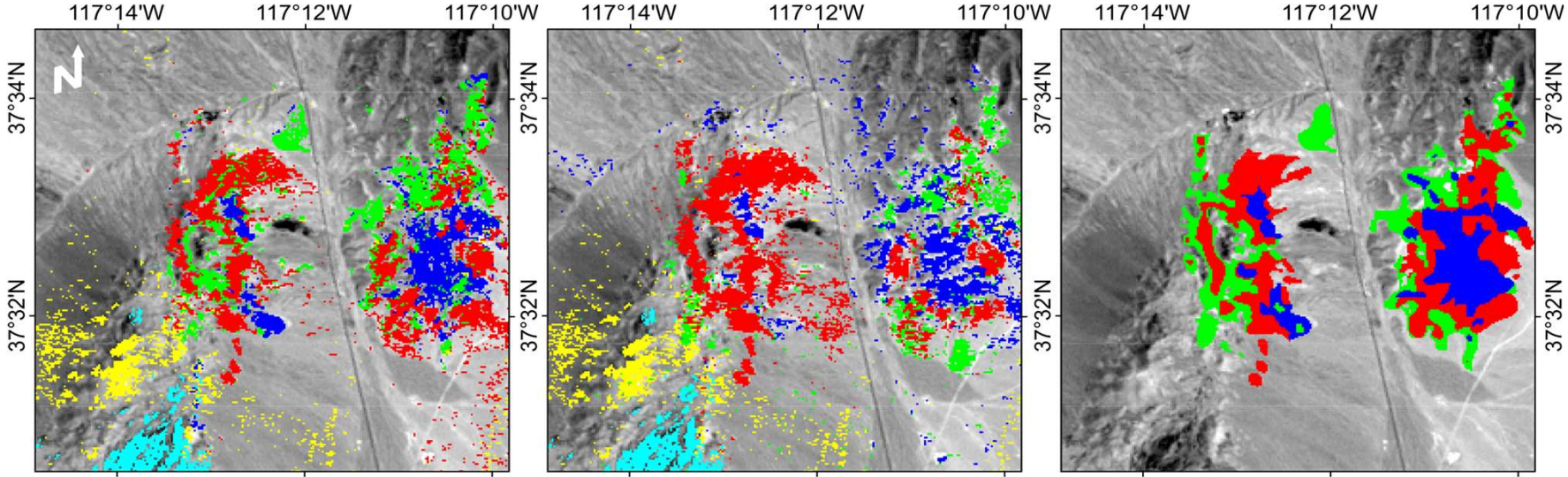
Hyperionの元画像(赤), およびLandsat ETM+から作成した
擬似Hyperion画像(緑)での反射スペクトルの比較

Hyperionの元画像と擬似Hyperion画像における各画素で最も多い端成分の比較 (トレーニングシーン外部)

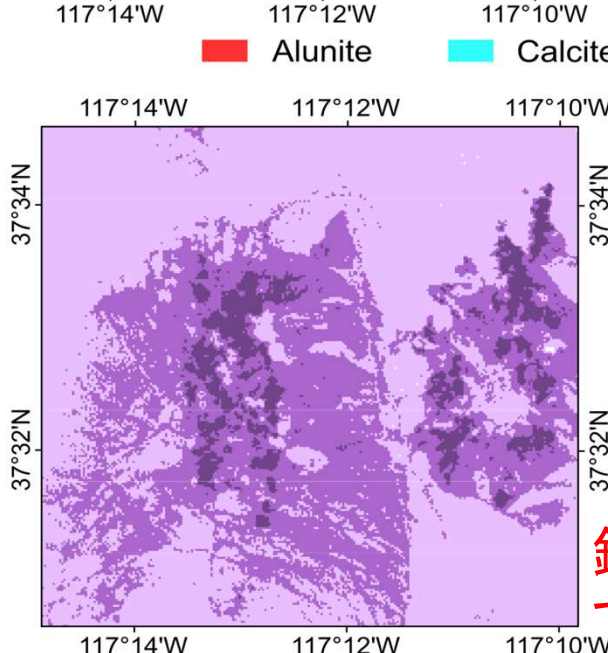
ETM+画像からの 擬似Hyperion画像

元Hyperion画像

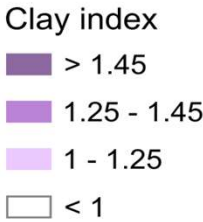
地質図



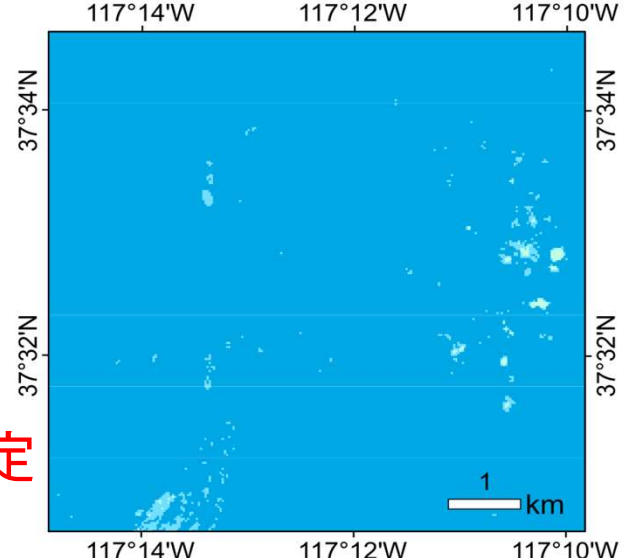
元ETM+ 画像での 指数



粘土鉱物 指数



鉱物名は特定
できない。

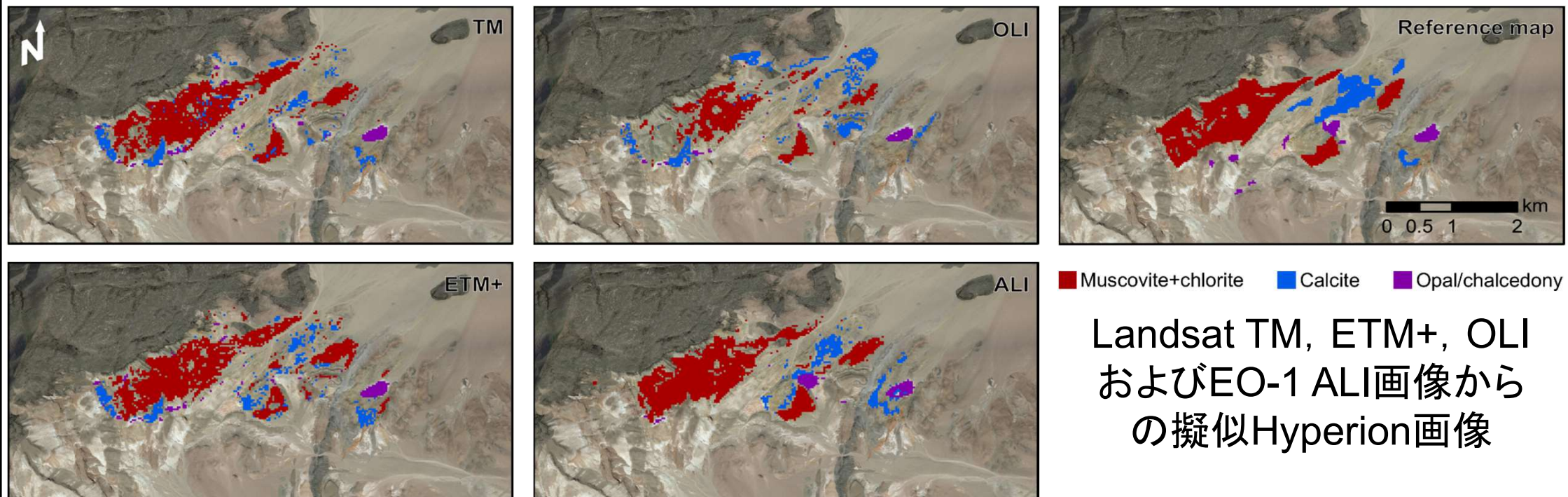


鉄酸化鉱物 指数



ケーススタディBー地熱資源域 (Fish Lake Valley) での 擬似Hyperionによる端成分分布の比較 (トレーニングシーン外部)

地質図

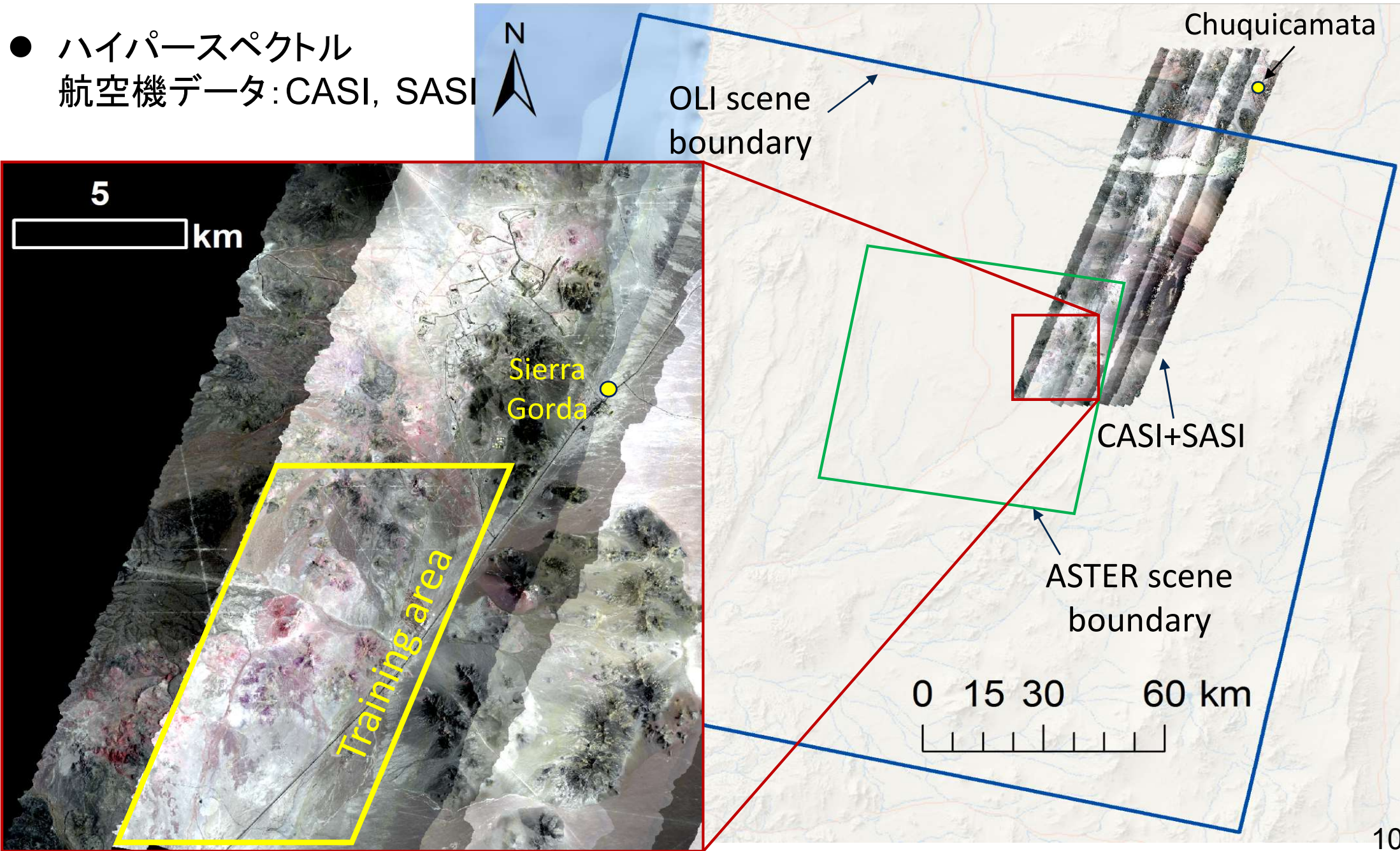


擬似Hyperion画像に基づく鉱物分類の精度 (地質図との比較による)

Indices	TM	ETM+	OLI	ALI
Overall accuracy (%)	64.89	65.23	42.56	75.33
Kappa coefficient	0.43	0.44	0.22	0.58

ケーススタディCーチリの大規模斑岩銅鉱床地域への適用

- マルチスペクトル衛星データ: Landsat 8 OLIとTerra ASTER
- ハイパースペクトル航空機データ: CASI, SASI



擬似ハイパースペクトル画像の作成結果

§ I. Hyper変換

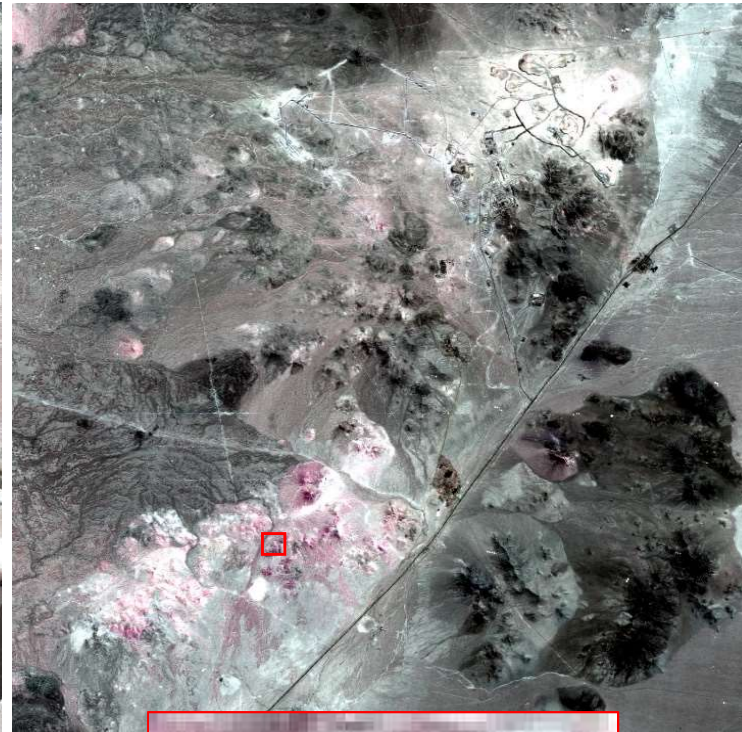
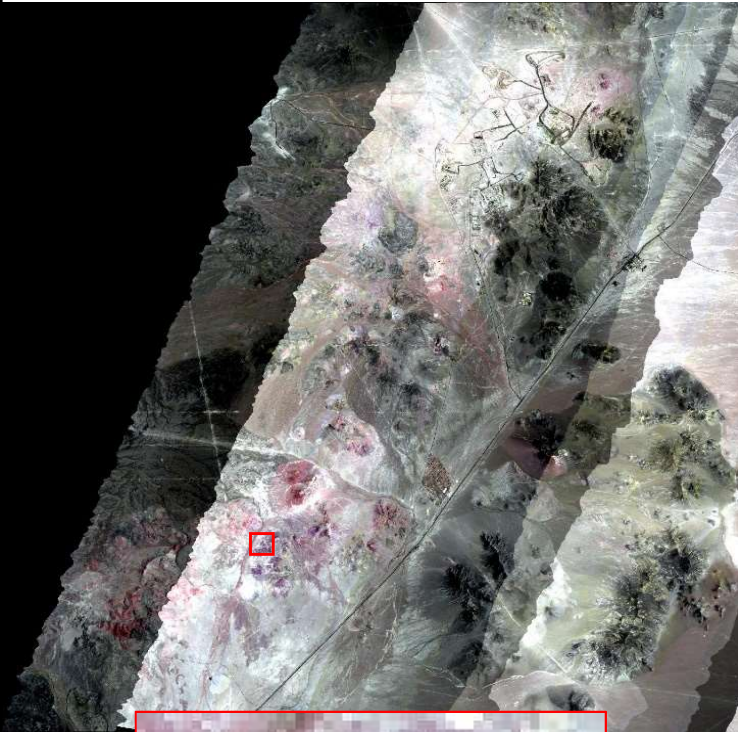
R: 2.1 μm , G: 2.2 μm and B: 2.3 μm

トレーニング範囲とその外部におけるOLI, ASTERからのCASI+SASIシミュレーション画像
と元画像の比較: 短波長赤外域フォールスカラー合成画像

CASI-SASI

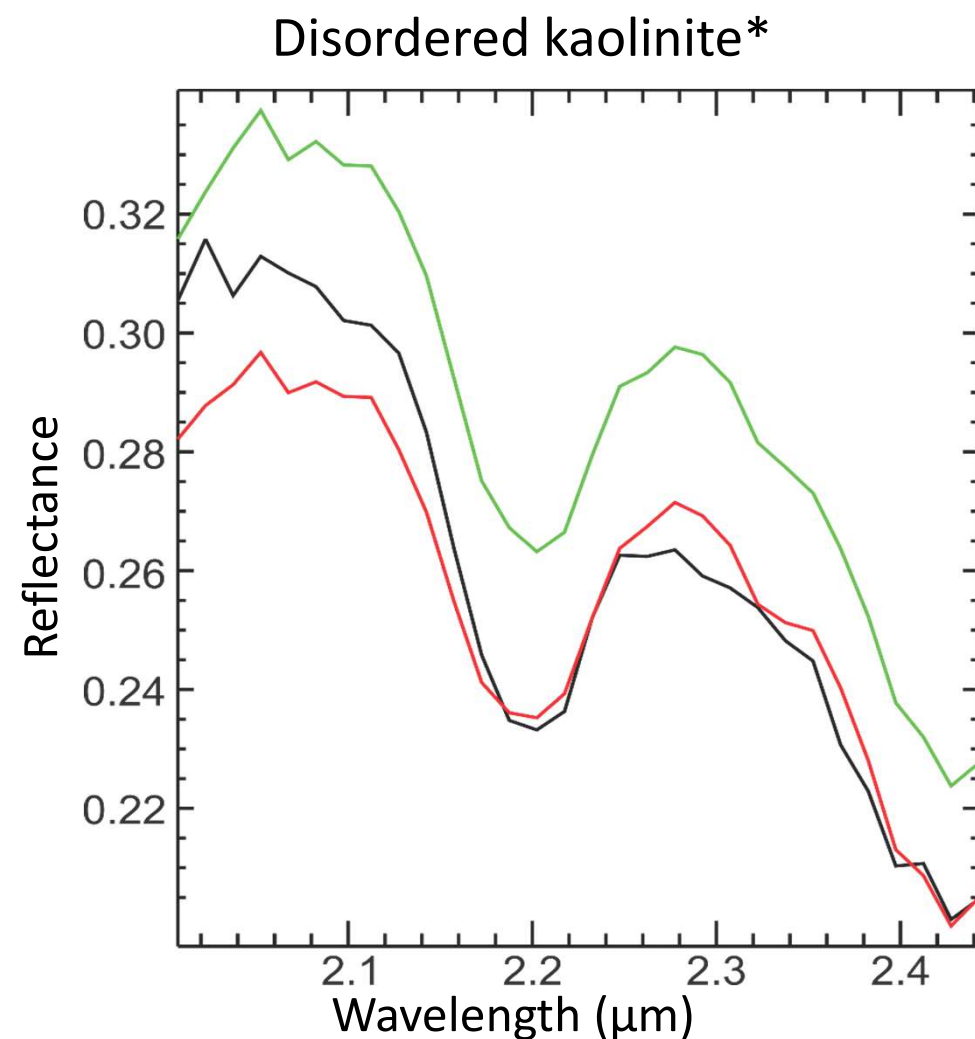
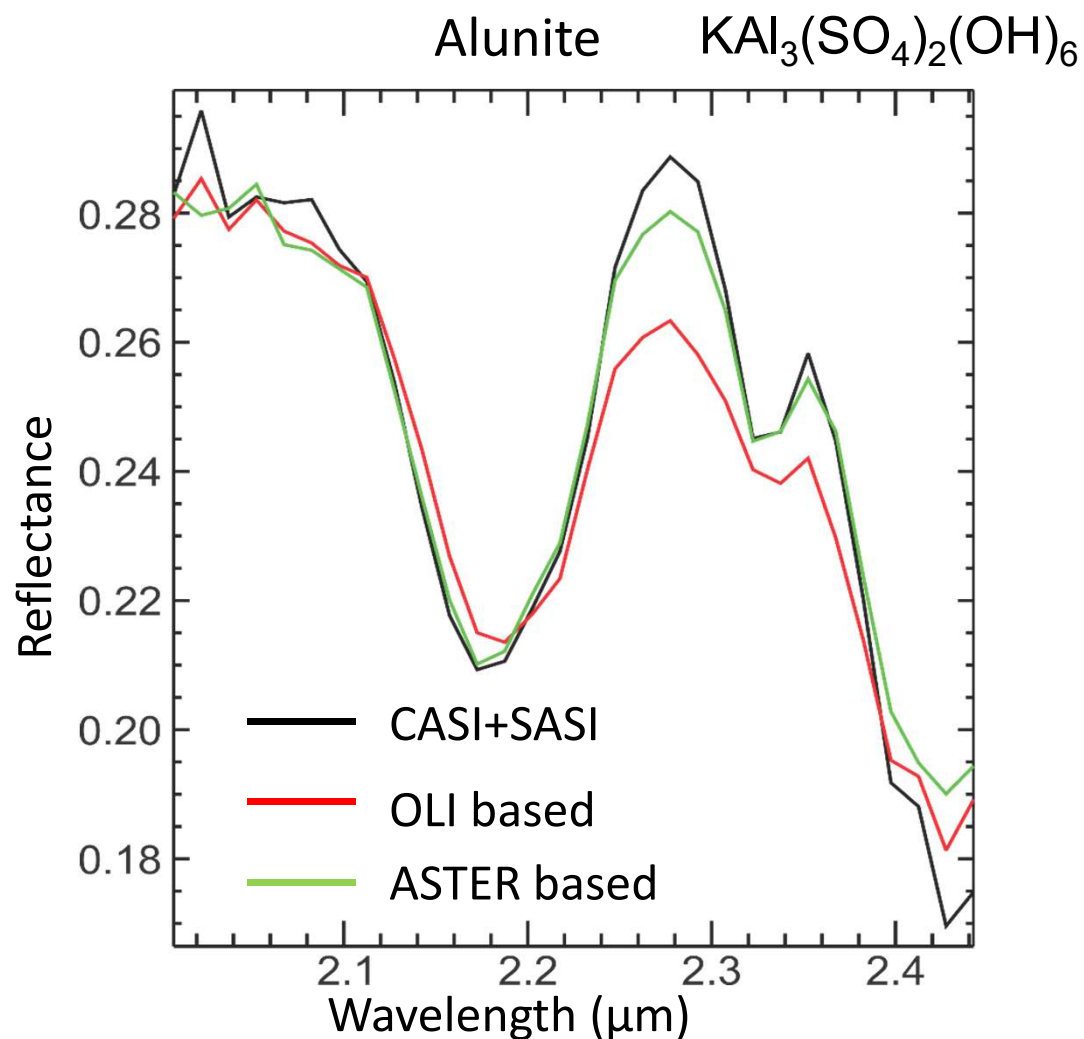
OLI-based

ASTER-based



代表的鉱物のシミュレーション画像での短波長赤外域反射スペクトル

OLI, ASTERからのCASI+SASIシミュレーション画像と元画像での明礬石, カオリナイトの反射スペクトルの比較 → いずれも反射率吸収パターンが再現できている。

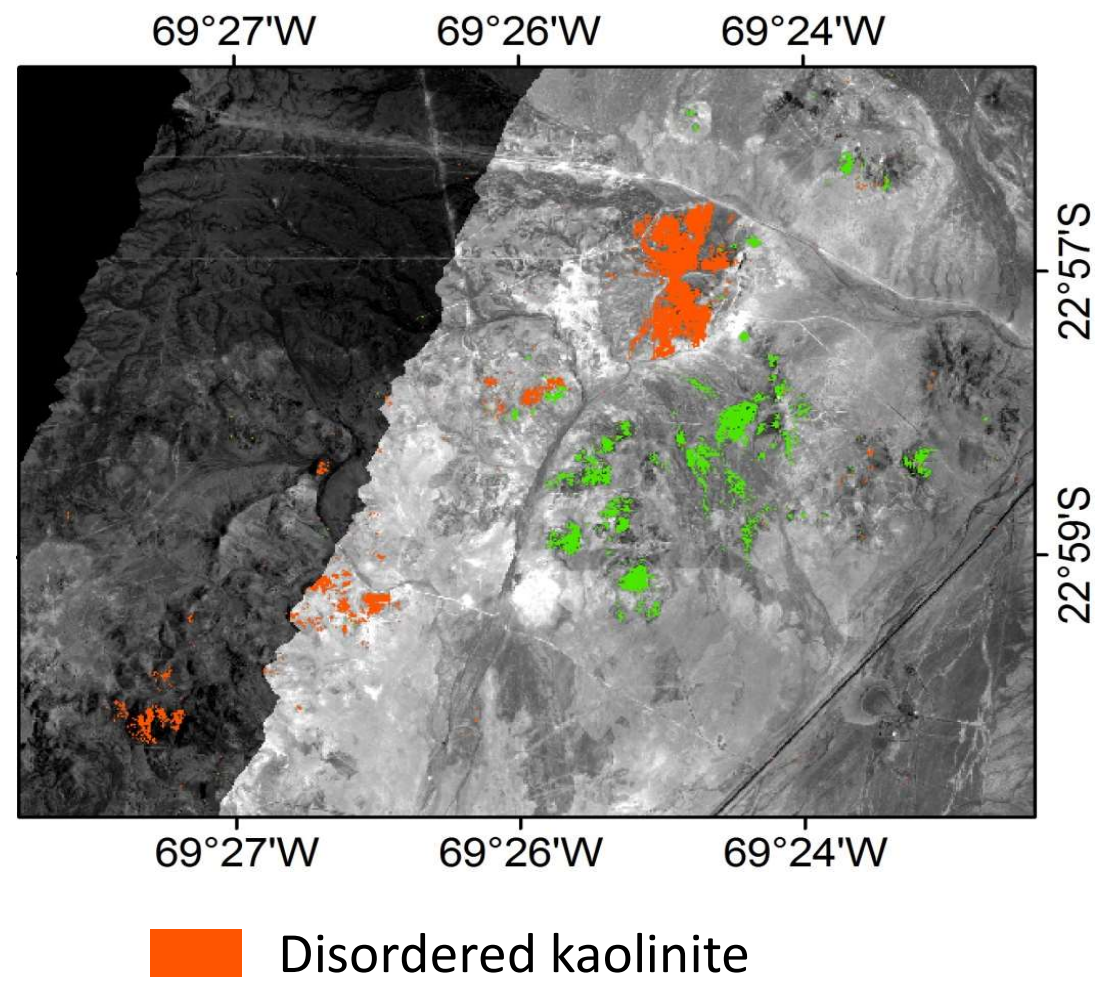
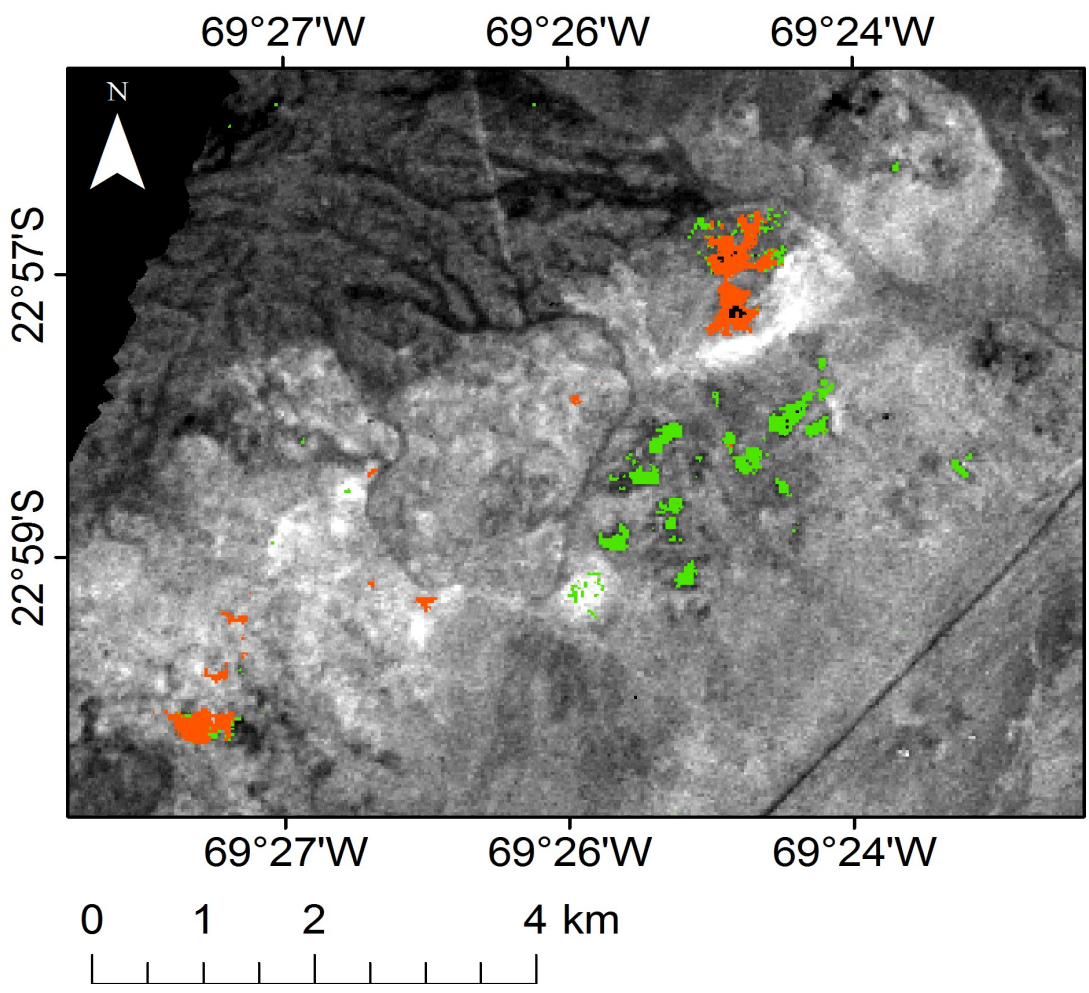


*It can also be mixtures of well-ordered kaolinite and dickite/alunite/ halloysite

擬似ハイパースペクトル画像と元画像から抽出された明礬石, カオリナイトの分布の比較

ASTER-based pseudo-hyperspectral image

CASI+SASI image



Background is Band 204

- Disordered kaolinite
- Alunite

ASTER画像の鉱物識別精度が向上できた。

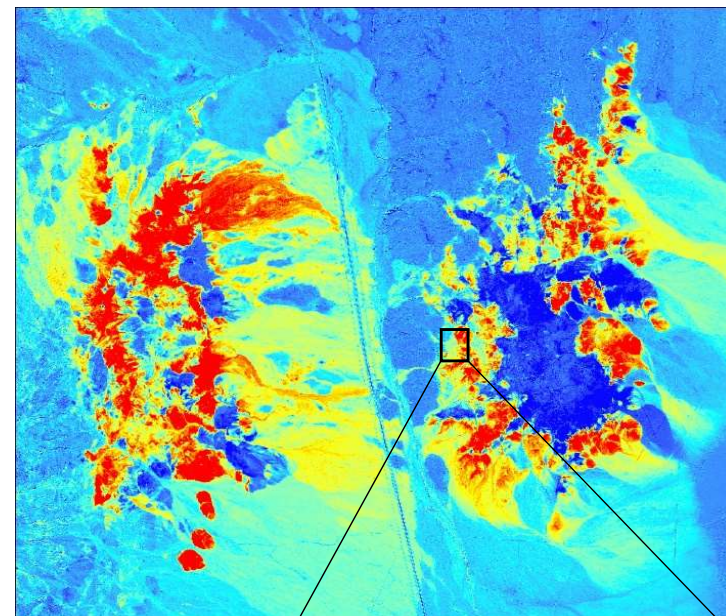
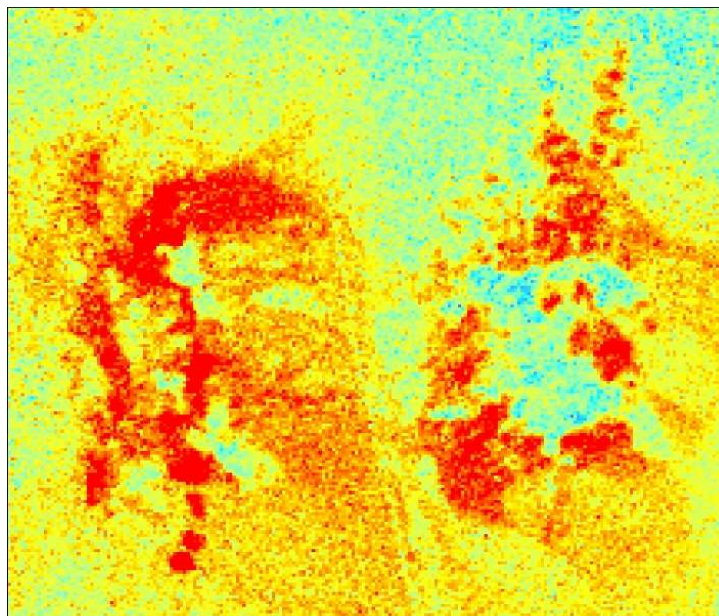
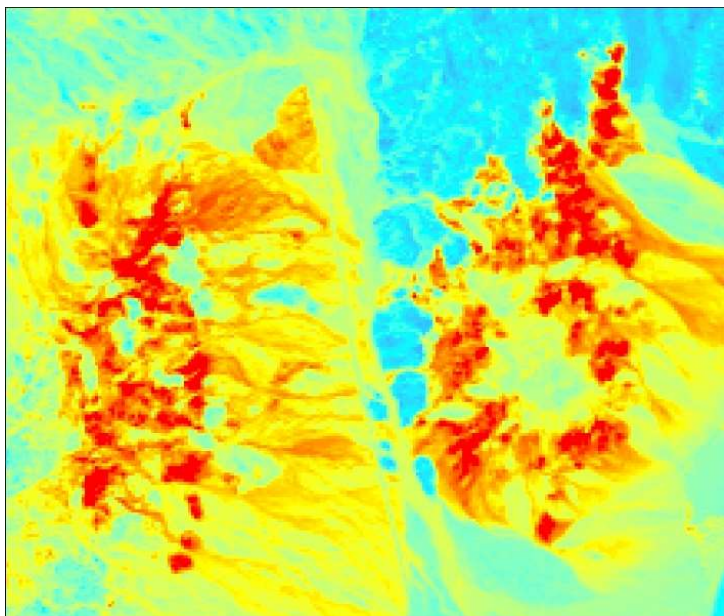
§ II マルチスペクトル衛星画像の空間分解能の向上法

ダウンスケーリングの必要性: 3種の衛星画像での粘土指数(CLAY), 明礬指数(ALI)の比較

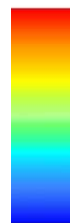
Landsat 8 OLIによるCLAY

ASTERによるALI

WorldView-3によるALI



High



Low

1 km

鉱物の識別精度を向上させるにはスペクトルに加えて空間分解能のダウンスケーリングも不可欠

OLIやASTER画像をWorldView-3 SWIRの空間分解能に変換できるか？

高分解能化の対象画像の選択

OLI, ASTER, WorldView-3の各バンドの波長域

Bands	OLI		ASTER		WorldView-3	
	Spectral range (μm)	Spatial resolution (m)	Spectral range (μm)	Spatial resolution (m)	Spectral range (μm)	Spatial resolution (m)
1	0.435 - 0.451	30	0.52 - 0.60	15	0.400 - 0.450	1.2
2	0.452 - 0.512	30	0.63 - 0.69	15	0.450 - 0.510	1.2
3	0.533 - 0.590	30	0.76 - 0.86	15	0.510 - 0.580	1.2
4	0.636 - 0.673	30	1.600 - 1.700	30	0.585 - 0.625	1.2
5	0.851 - 0.879	30	2.145 - 2.185	30	0.630 - 0.690	1.2
6	1.566 - 1.651	30	2.185 - 2.225	30	0.705 - 0.745	1.2
7	2.107 - 2.294	30	2.235 - 2.285	30	0.770 - 0.895	1.2
8			2.295 - 2.365	30	0.860 - 1.040	1.2
9			2.360 - 2.430	30	1.195 - 1.225	7.5
10					1.550 - 1.590	7.5
11					1.640 - 1.680	7.5
12					1.710 - 1.750	7.5
13					2.145 - 2.185	7.5
14					2.185 - 2.225	7.5
15					2.235 - 2.285	7.5
16					2.295 - 2.365	7.5

ASTERとWV-3の4つのSWIRバンドは重なっているため、これらを高分解能化の対象に選択

高分解能化の対象地域と用いた衛星画像

• WorldView-3

– Date: 19 Sep 2014

• ASTER

– Cuprite: 18 Mar 2007

– Goldfield: 15 Aug 2006

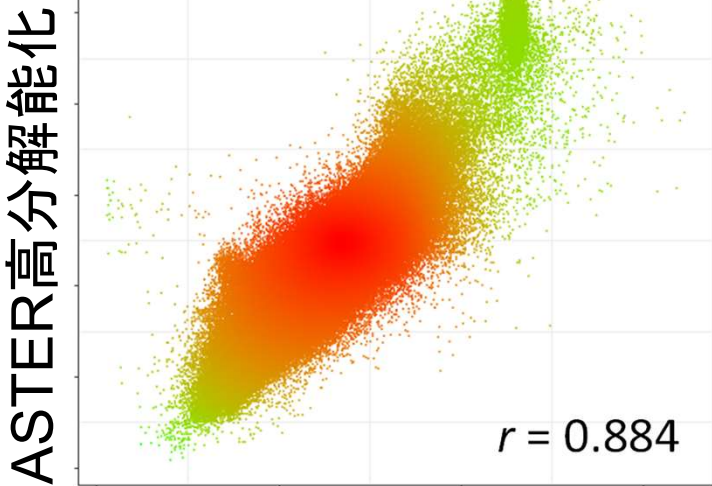
□ トレーニングエリア

□ 高分解能化エリア



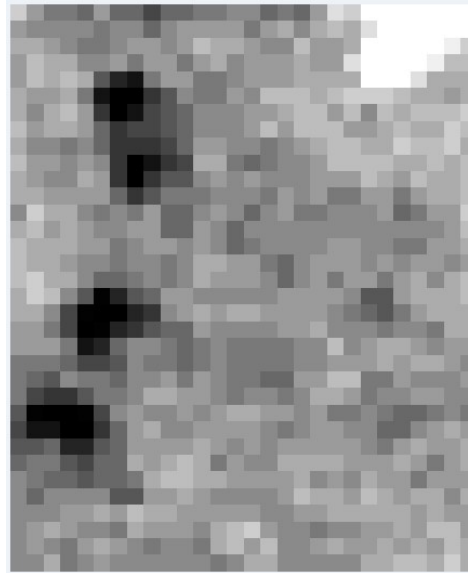
ASTER画像の高分解能化の結果の一例

Band 5の比較

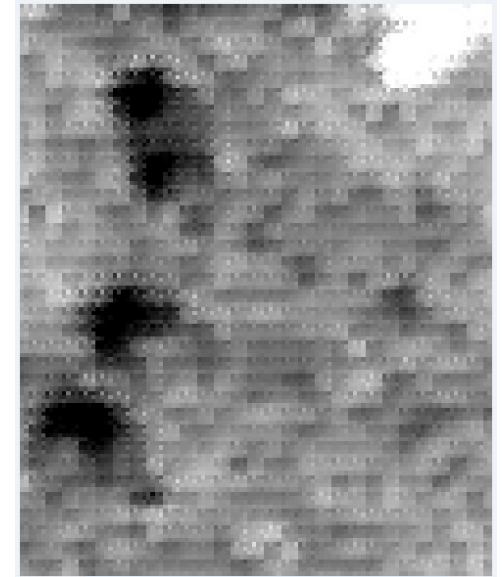


WV-3

元のASTER
Band 5画像



高分解能化
ASTER画像



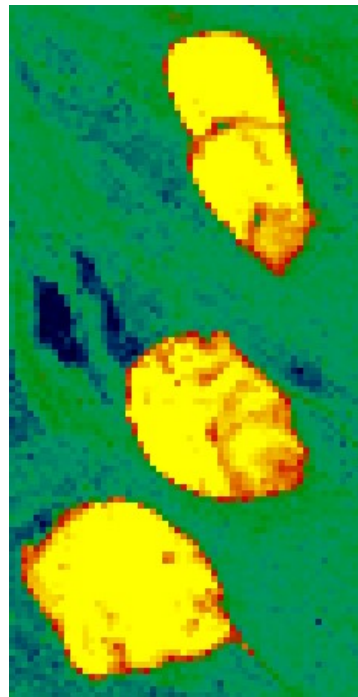
明礬丘での明礬指数 (Alunite index)の比較



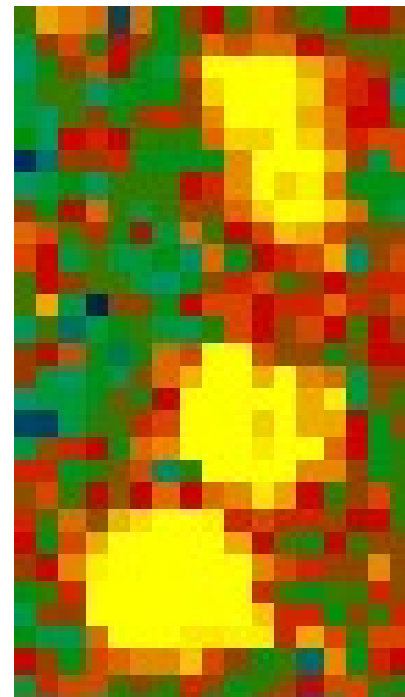
Low High

ASTER画像のノイズの影響を
どのように除去できるか？

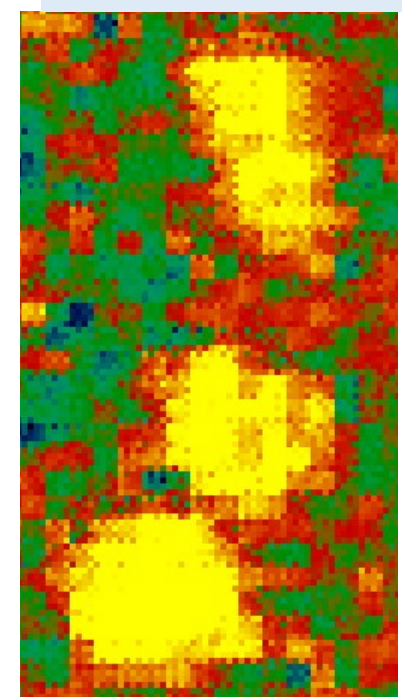
WV-3



元のASTER画像



高分解能化
ASTER画像

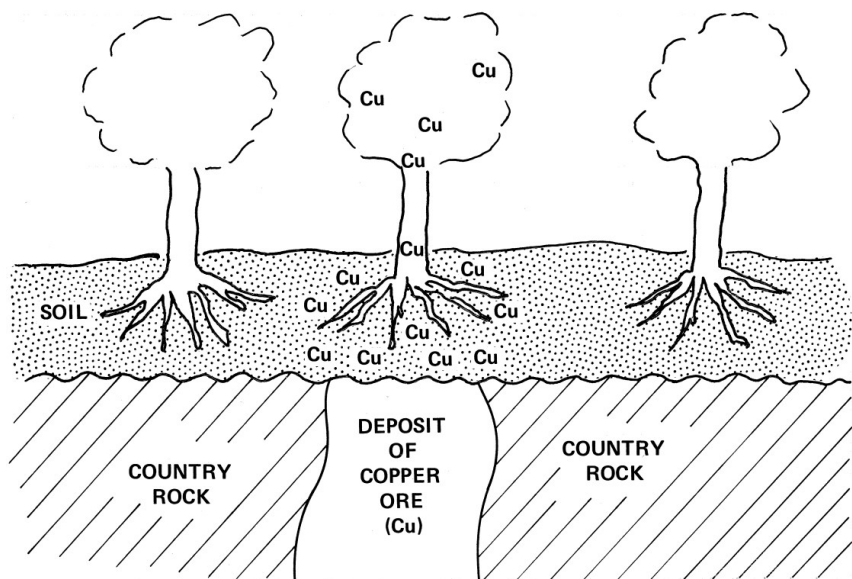


金属鉱床に起因した植生異常検出のための新しい植生指標

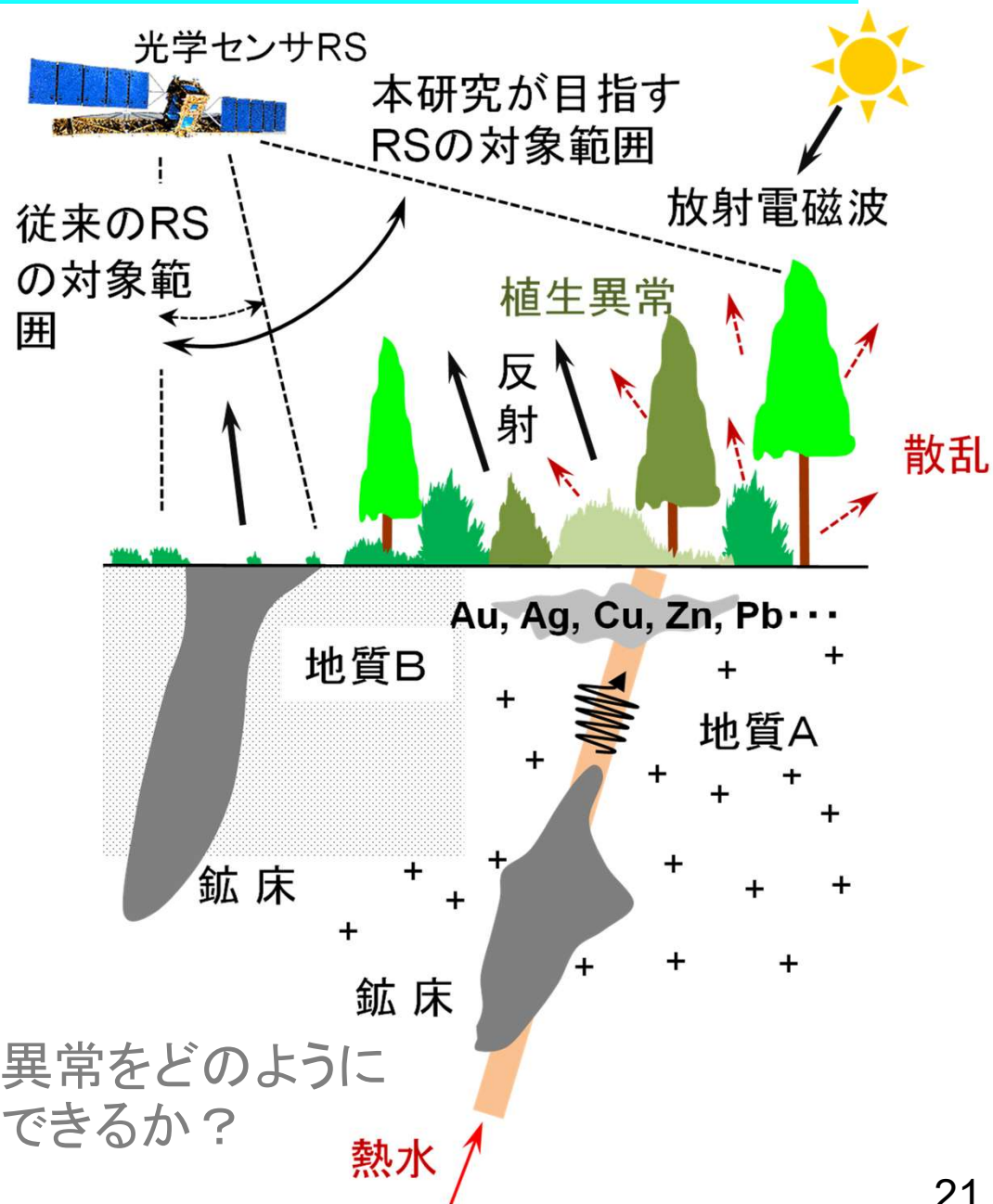
<従来の問題点> 地表が植生に覆われていない乾燥地域が金属資源探査の主な適用の対象となり、湿潤温暖帯や熱帯という地表が植生に厚く覆われる地域に対する探査は実用化されていない。

この問題にチャレンジするための作業仮説

鉱床域の表土中には金属濃度が高く、これは植生の種類や生理的活性に影響を及ぼす。



Sabins, F.F. (1999) *Ore Geology Reviews* 14, pp. 157-183.

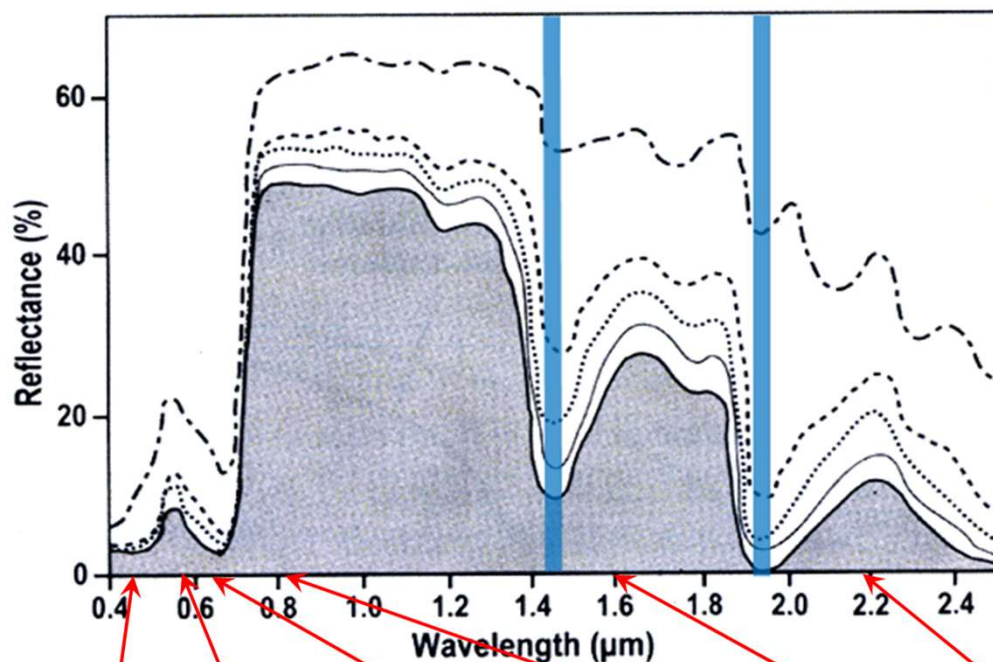


新しい植生指標

VIGS (Vegetation Index considering Greenness and Short-wave infrared region)

$$\text{VIGS} = k_1 \frac{G-R}{G+R} + k_2 \frac{N-R}{N+R} + k_3 \frac{N-S_1}{N+S_1} + k_4 \frac{N-S_2}{N+S_2}$$

Magnolia grandiflora (タイサンボク) の葉



Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 7
0.45 ~ 0.52 μm	0.52 ~ 0.60 μm	0.63 ~ 0.69 μm	0.76 ~ 0.90 μm	1.55 ~ 1.75 μm	2.08 ~ 2.35 μm



Relative water content of *Magnolia grandiflora*

- 5%
- 25%
- 50%
- 75%
- 100%

Jensen (2000)
Remote Sensing of the Environment

- $k_1 \sim k_4$ は重み係数
- G, R, N は可視域の緑と赤, 近赤外域での反射率
- S_1 と S_2 は短波長赤外域の2つのバンドでの反射率

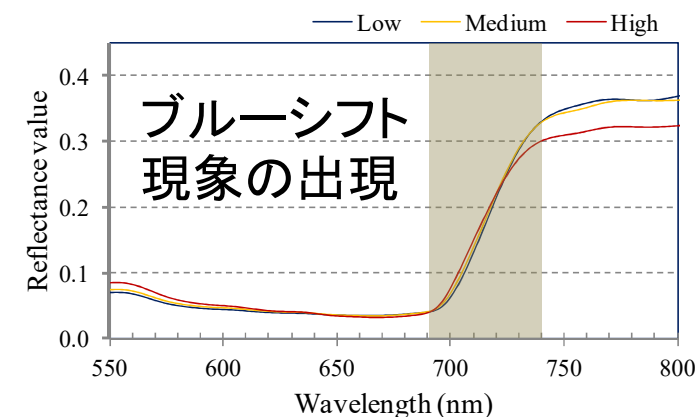
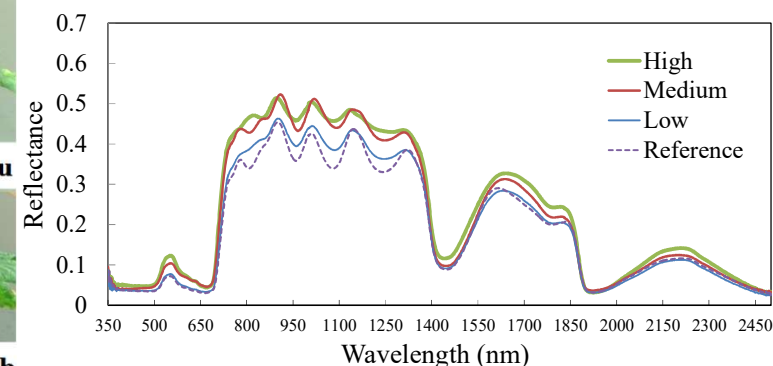
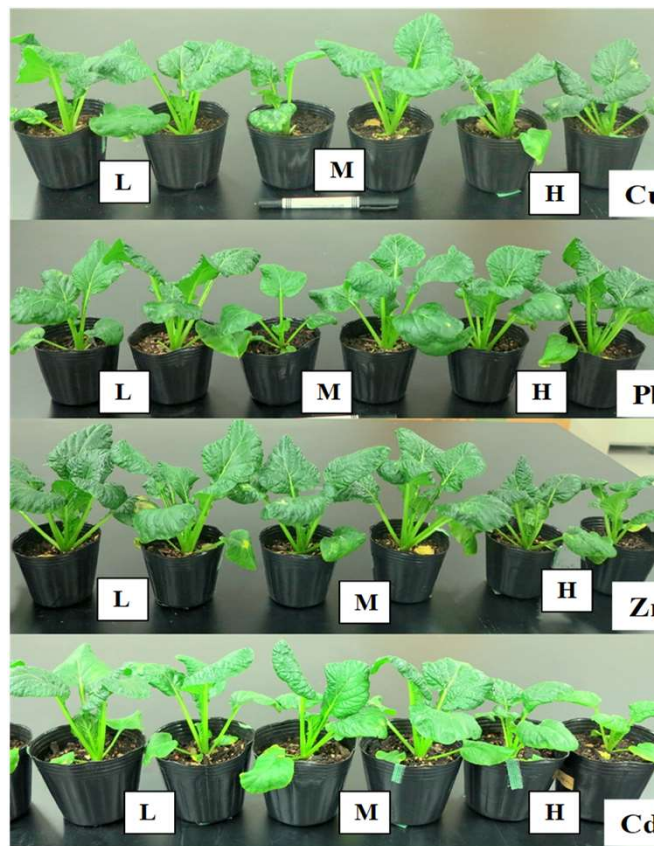


- (例えば) Landsat TMとETM+では, バンド5 (1.55 ~ 1.75 μm) とバンド7 (2.08 ~ 2.35 μm) の反射率を用いる。
- いずれも大気補正後の反射率

短波長赤外域では含水量に伴う反射率の減少が顕著

金属起因植物ストレスの室内実験

- 金属としてCu, Pb, Zn, Cdを対象。それぞれ標準金属溶液 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$, and $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ をソースとする。
- ポットの土に150 mLを均一に混ぜ、一週間養生。
- 金属濃度をlow (20 ppm), medium (100 ppm), high (200 ppm)に分類

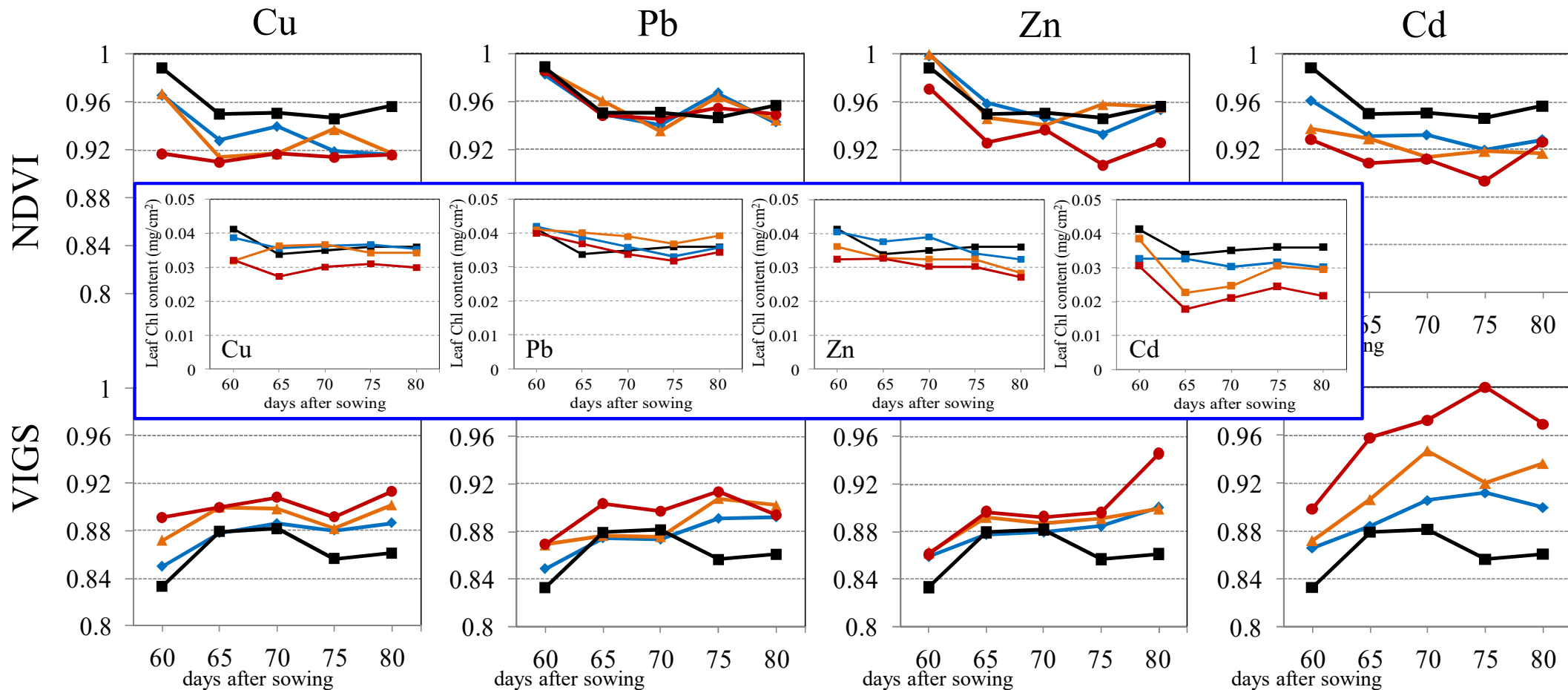


金属添加土と通常土を用いたコマツナの室内での育成(ポットの高さは10 cm)

金属濃度クラスとコマツナの生育状況(L = low, M = medium, H = high: 種まきから70日目の状況)

FieldSpecによる葉の反射スペクトル測定

VIGSの有効性の検証(室内実験)

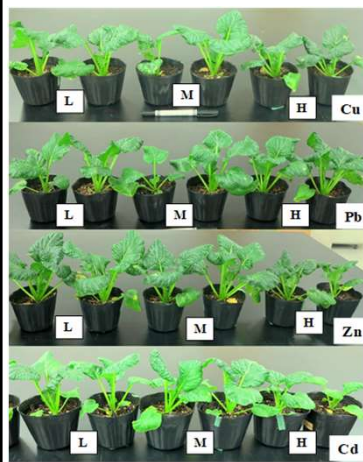


■ Reference ◆ Low ▲ Medium ● High

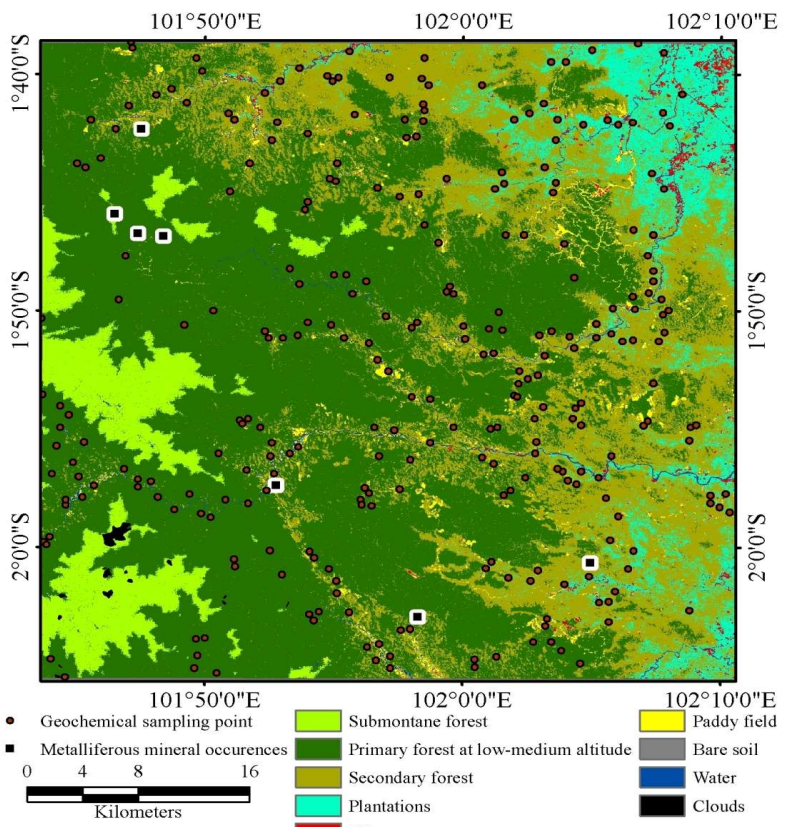
NDVIとVIGSの時間変化の比較。Referenceは金属添加無しの土。



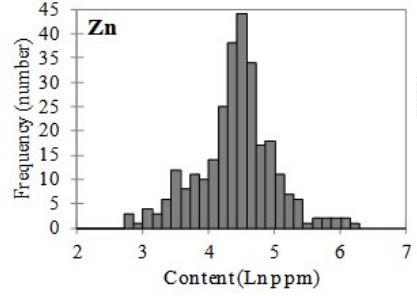
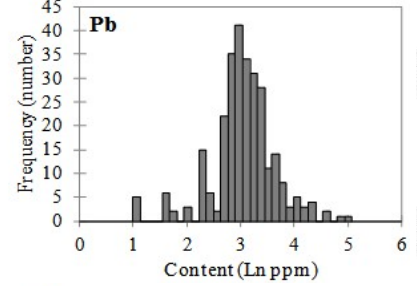
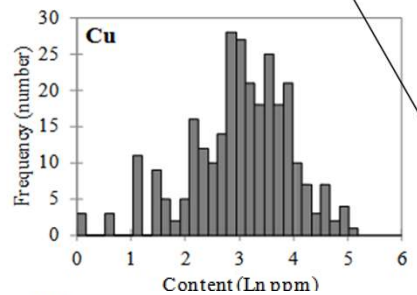
VIGSの方が金属濃度の相違に敏感(特にPbとCd)であり, 金属濃度と植物ストレスの大きさ関係が整合している。



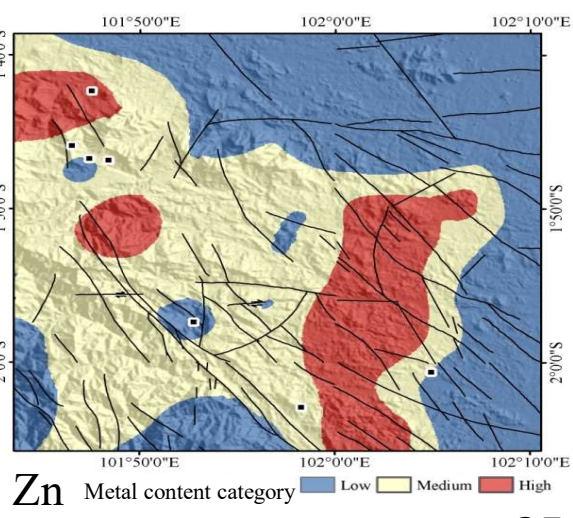
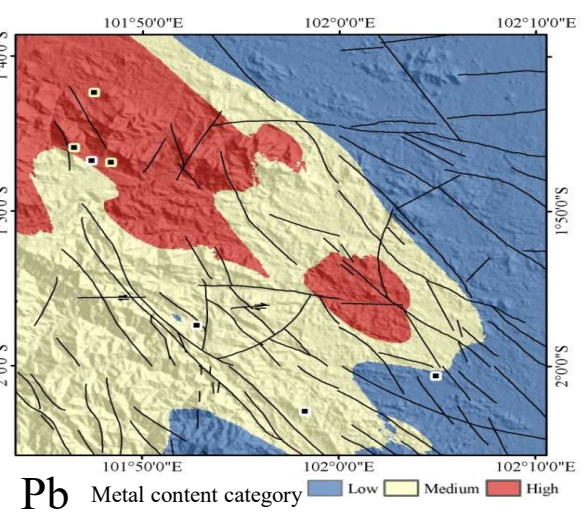
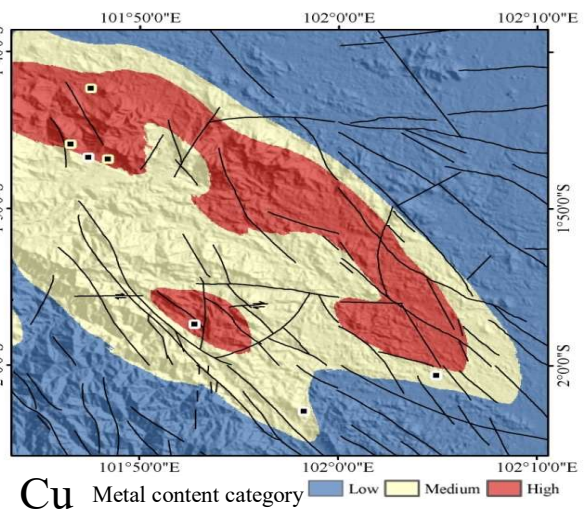
ケーススタディ1ー熱水鉱床域へのVIGSの適用(スマトラ中部)ー



対象地域の位置と土地被覆図
(熱帯の原生林が卓越し、周
囲に二次林と亜熱帯山地林が
分布する。・は表土中の金属
濃度分析地点、□は金属鉱床
を表す)

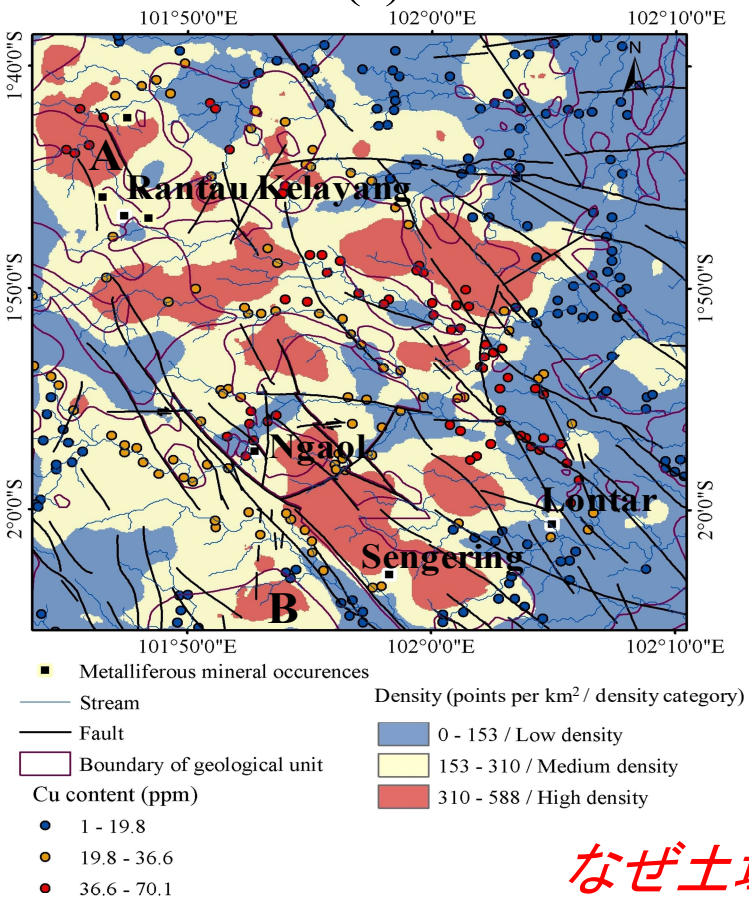


クリギングによるCu, Pb, Zn濃度
分布とC-Aモデルによるlow,
medium, high濃度クラスへの分類

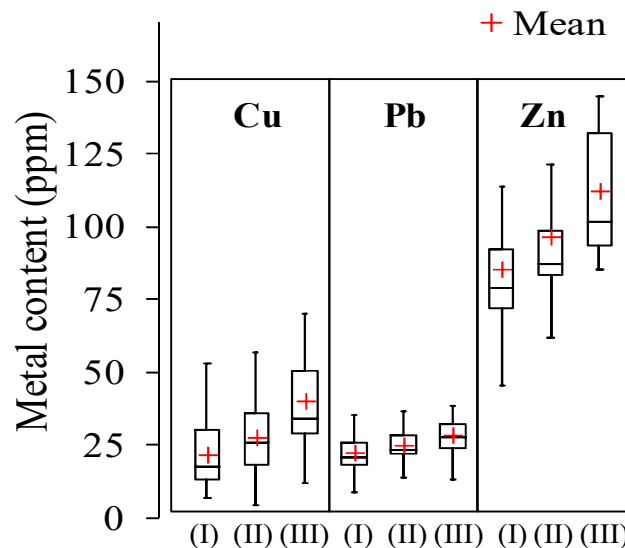


金属濃度とVIGS異常値地点分布との関係

(a)



(b)



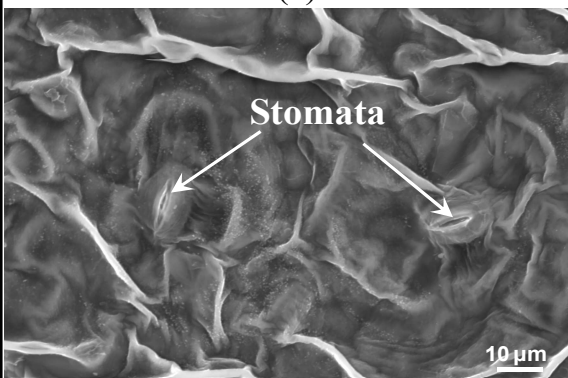
(a) VIGS異常値 (> 平均 + 標準偏差) の分布密度: (I) low, (II) medium, (III) highとCu濃度, 断層, 金属鉱床との関係

(b) Cu, Pb, and Zn濃度とVIGS異常値分布密度との関係

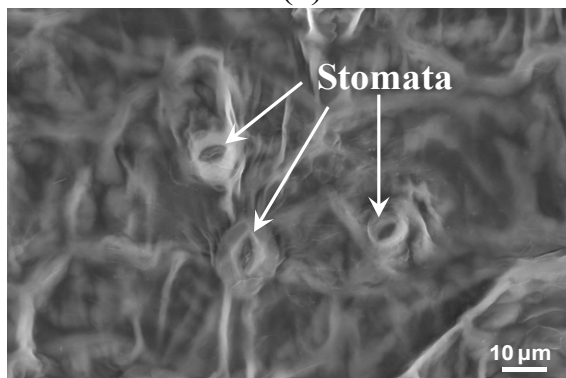
- (I) Low density
- (II) Medium density
- (III) High density

なぜ土壌金属が植物ストレスを誘引するのか？

(a)



(b)



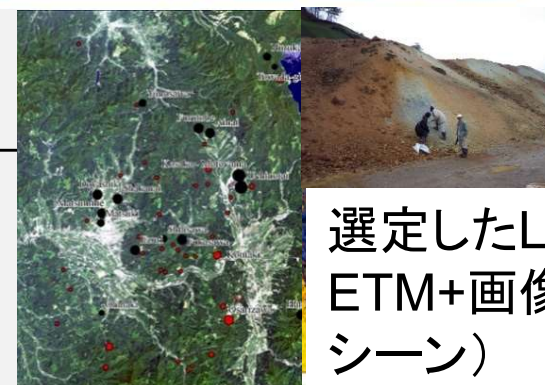
金属吸収が気孔に及ぼす影響のSEM画像

(a) 高Cd濃度によって閉じた気孔

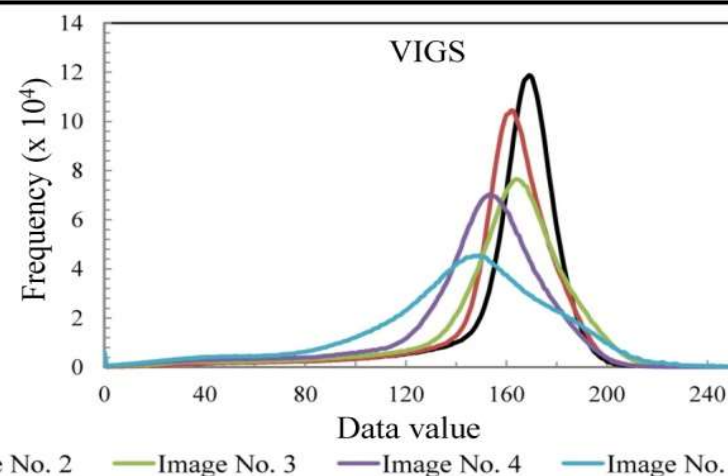
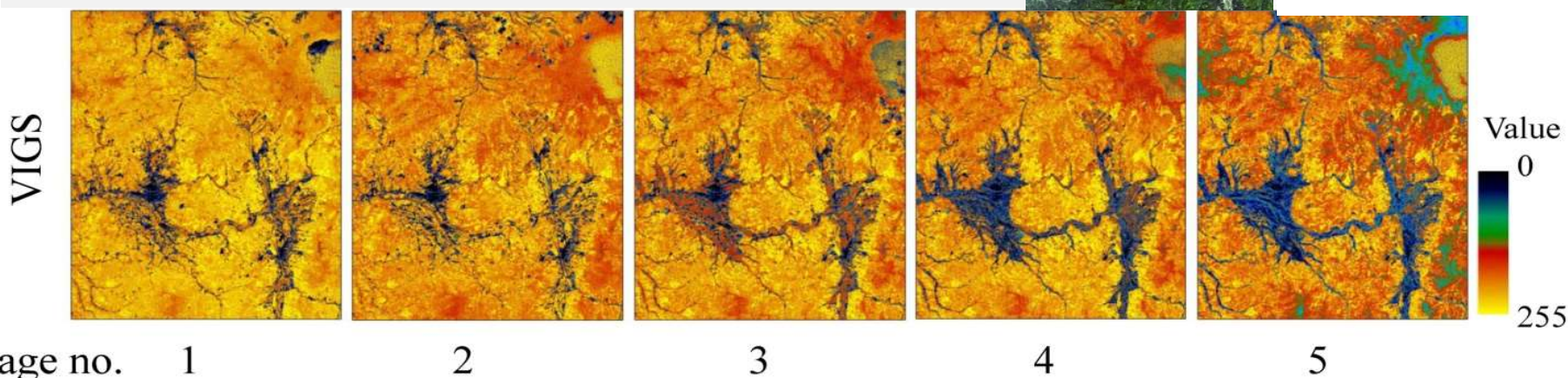
(b) 金属添加無しの土による葉の気孔

ケーススタディ2ー黒鉱鉱床域への適用(秋田県北鹿地域)ー

Image No.	Acquisition	Sun azimuth (°)	Sun elevation (°)	Cloud cover (%)	Surface temperature (° C)	Season
1	7/25/2002	127.24	60.61	0.08	26.5	Summer
2	8/20/2000	137.52	55.48	0.44	25.6	Summer
3	9/5/2000	143.74	51.1	0.28	20.1	Autumn
4	9/21/2000	149.47	46.12	0.04	17.5	Autumn
5	10/13/2002	154.7	38.71	0.04	12.5	Autumn



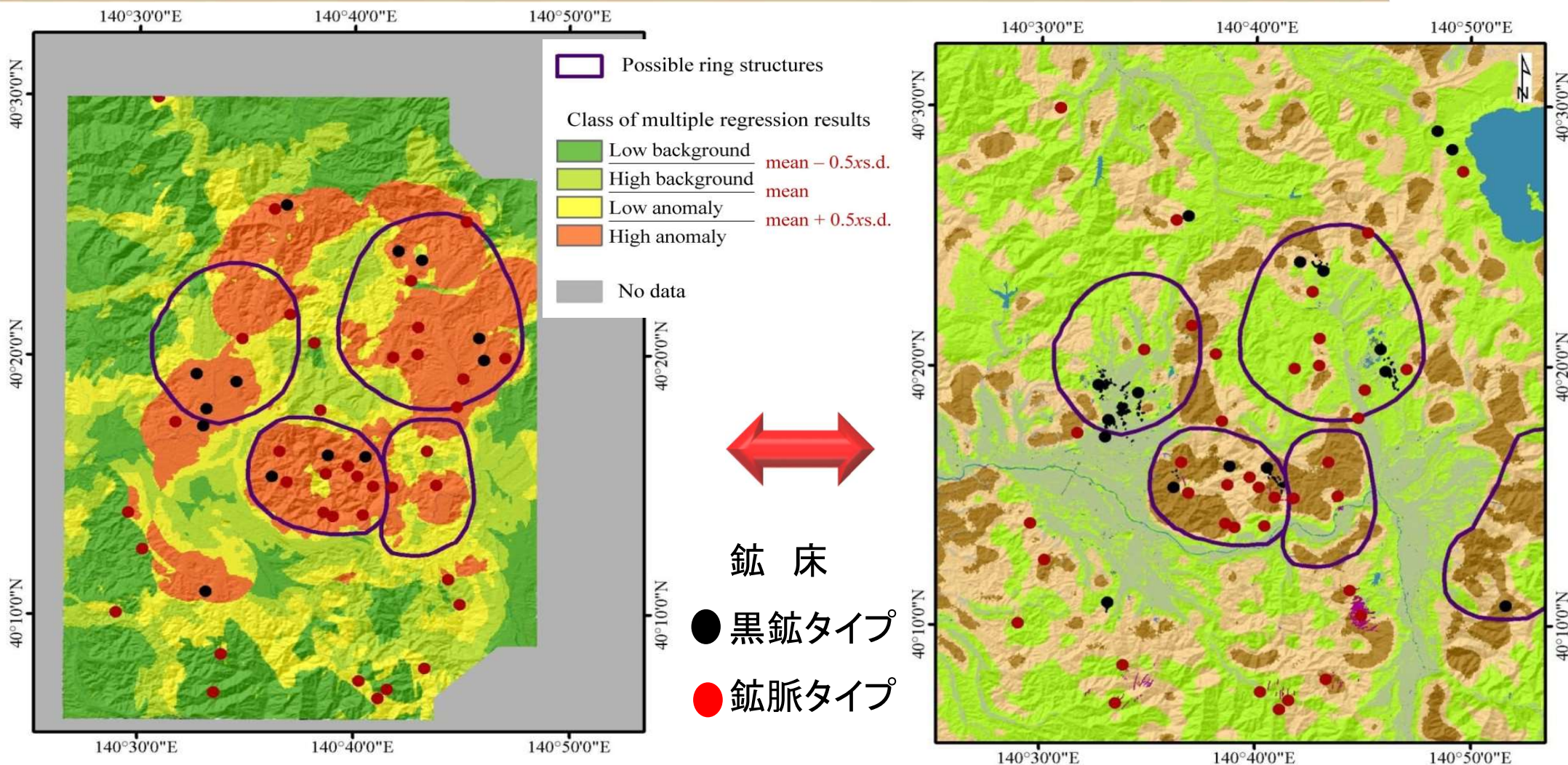
選定したLandsat ETM+画像(夏~秋のシーン)



VIGSは植生活活性度の低下を良く表している。

夏から秋にかけてのVIGSの変化(値を0から255の1バイト整数に変換)

鉱床存在評価データとの比較によるVIGS比異常値分布の検証



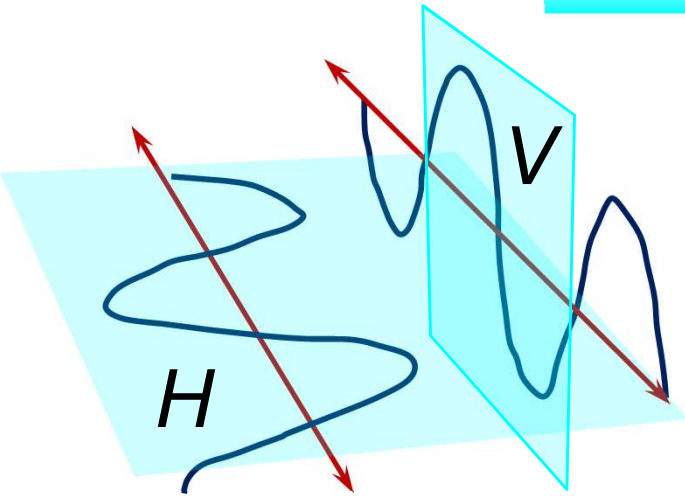
鉱床
 ● 黒鉱タイプ
 ● 鉱脈タイプ

リング構造やデイサイト溶岩への近さ, 化学変質指数や重力異常の大きさなどの多変量解析に基づく鉱床存在ポテンシャル図 (Suzuki, 2003) と4領域への区分 (評価値の平均と標準偏差に基づく)

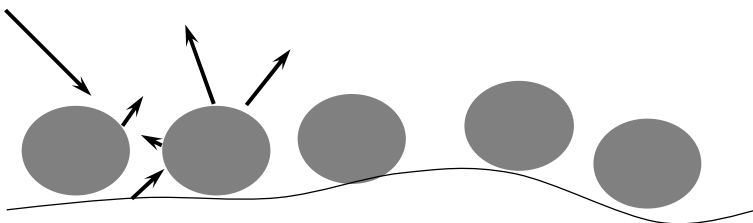
VIGS比残差成分のクラス平均

§ IV

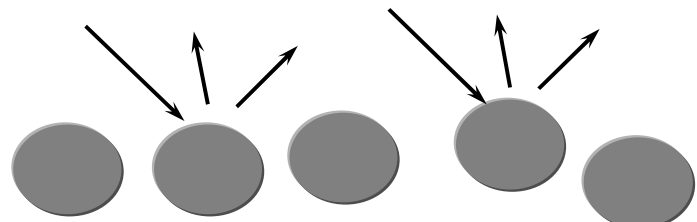
ポラリメトリSARデータによる比誘電率・比透磁率の算定法とその応用



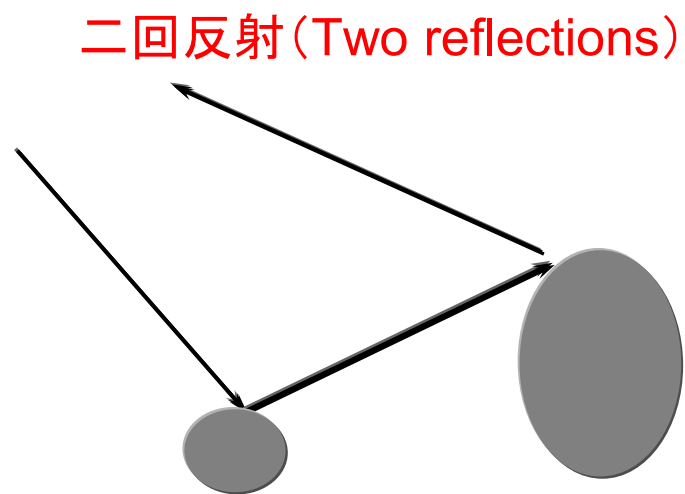
偏波の概念



体積散乱 (Volume scattering)



表面散乱 (Surface scattering)



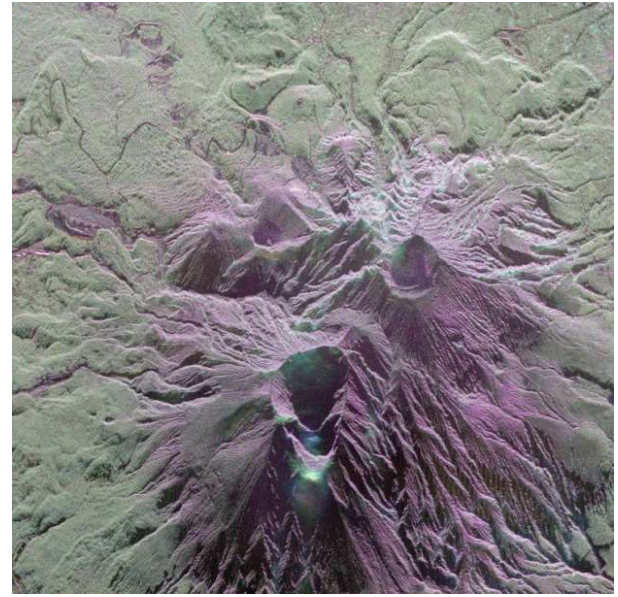
二回反射 (Two reflections)


- HVによる散乱: 体積散乱が主
- HH: 二回反射が主
- VV: 表面散乱が主

多偏波SARデータを用いたポラリメトリSAR技術が発達

ただし、地表粗度を間接的に利用して、粗度の類似性からSAR画像を分類することが多い。

地質の同定や土壌含水率推定の観点から、多偏波SARデータより地表物質の粗度、比誘電率、比透磁率を算定できないか？




- 後方散乱係数を比誘電率, 比透磁率と地表粗度から算定(計算値とする)。
- クロス偏波成分(HV)の地表粗度は誘電率・透磁率の算定には影響しない(Barrick and Peak, 1968)。  HH, VVの2成分にのみ適用

$$\gamma_{HH}^0 = \frac{(4k^4 h_0^2 \cos^4 \theta_i)(\mu_r - 1) \left[(\varepsilon_r \mu_r - \sin^2 \theta_i) + \mu_r \sin^2 \theta_i \right] + \mu_r^2 (\varepsilon_r - 1)^2 W(x, y)}{\left[\pi(\mu_r \cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon_r \mu_r - \sin^2 \theta_i})^4 \right]}$$

$$\gamma_{VV}^0 = \frac{(4k^4 h_0^2 \cos^4 \theta_i)(\varepsilon_r - 1) \left[(\varepsilon_r \mu_r - \sin^2 \theta_i) + \varepsilon_r \sin^2 \theta_i \right] + \varepsilon_r^2 (\mu_r - 1)^2 W(x, y)}{\left[\pi(\varepsilon_r \cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon_r \mu_r - \sin^2 \theta_i})^4 \right]}$$

k : 波数, h_0 : 地表粗度, θ_i : 入射角, ε_r : 比誘電率, μ_r : 比透磁率, W : スペクトル密度

(Barrick and Peak, 1968; Fung and Chen, 2010)

 目的関数の最適解を求める手法であるNelder-Mead Simplex 法を利用

$$O(\mu_r, \varepsilon_r) = \operatorname{argmin} \left\{ \left[\gamma_{HH}^0 - \sigma_{HH}^0 \quad \gamma_{VV}^0 - \sigma_{VV}^0 \right] \begin{bmatrix} \gamma_{HH}^0 - \sigma_{HH}^0 \\ \gamma_{VV}^0 - \sigma_{VV}^0 \end{bmatrix} (\mu_r, \varepsilon_r) (\rho, \chi, \kappa, \zeta) \right\}$$

γ_{HH}^0 : 計算値

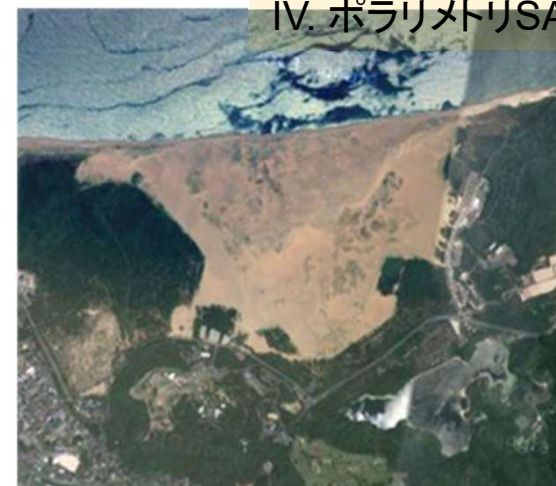
σ_{HH}^0 : 実測値

(ρ : 反射, χ : 拡張, κ : 縮小, ζ : 収縮)

 誤差を最小化するように, 比誘電率と比透磁率を算定

解析対象その1: 鳥取砂丘周辺

①



②

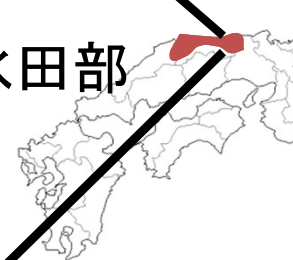


③



解析領域:
200 × 200pixel
(2.5km × 2.5km)

- ①鳥取砂丘
- ②鳥取空港
- ③鳥取平野水田部



ALOS PALSARデータを利用



観測日時

- ・2008年10月25日
- ・2009年4月27日

⇒いずれも13:30頃観測

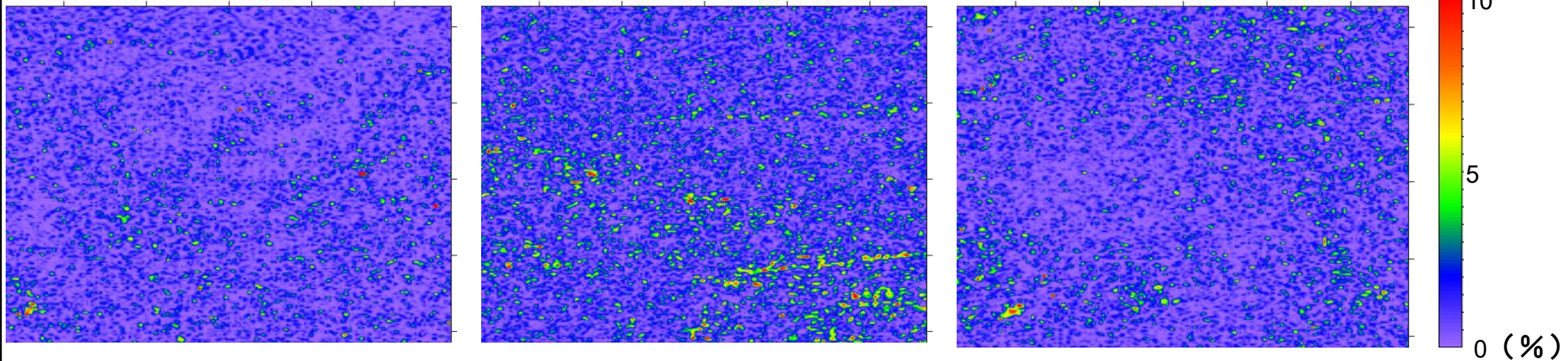
フルポラリメトリRGB合成画像
HH: Red, HV: Green, VV: Blue

計算値と実測値(後方散乱係数)の誤差

鳥取砂丘

鳥取空港

水田域



2008年10月25日のHH成分での誤差

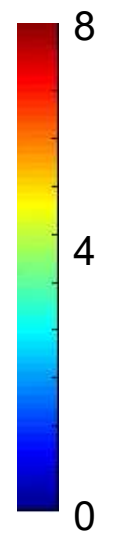
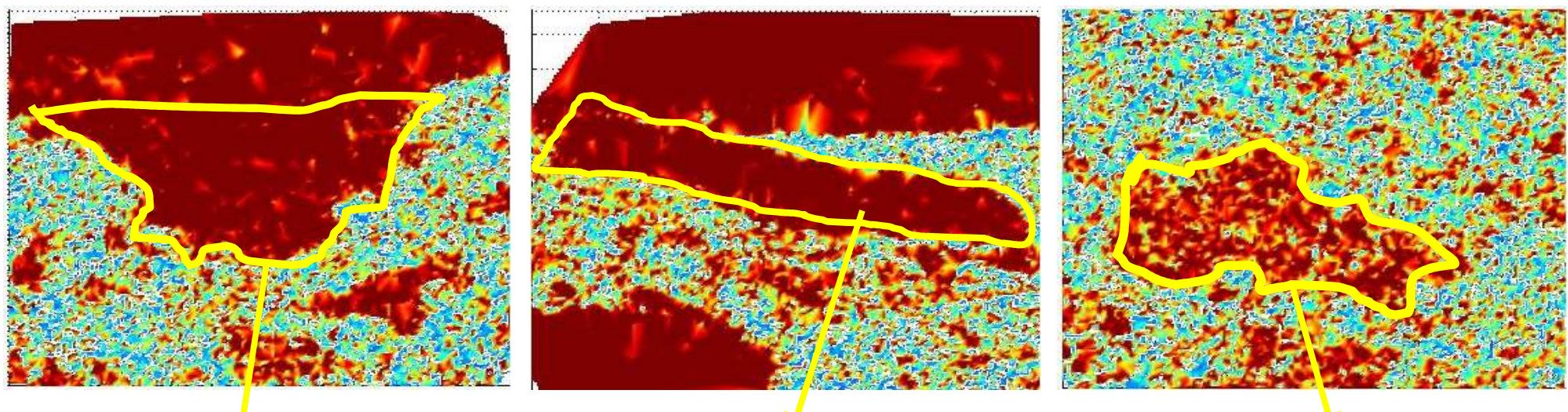
	2008/10/25	2009/04/27		2008/10/25	2009/04/27		2008/10/25	2009/04/27
HH	0.9	1.0	HH	1.3	1.4	HH	0.9	1.3
VV	0.8	1.0	VV	1.3	1.4	VV	0.9	1.2

各地域での誤差の平均値(%)

- 誤差の平均値はいずれの地域でも1%前後
⇒ 計算手法の妥当性

- 偏波の種類に関わらず、同一シーンでの誤差は同程度である。

比誘電率の分布 (2008/10/25)



湿潤した砂の比誘電率に相当する。

湿潤したアスファルトの比誘電率に相当する。

粘土質土壌の比誘電率に近い。

いずれの領域でも比誘電率の妥当な値が算定できた。⇒ 手法 (mdPSAR) の有効性

	2008/10/25	2009/04/27
砂丘	13.4	10.6
空港	12.3	9.8
水田	8.2	6.3

湿度の影響

	比誘電率
粘土質土壌(乾燥)	4 - 6
粘土質土壌(湿潤)	10 - 15
アスファルト(湿潤)	6 - 12
砂(湿潤)	10 - 30

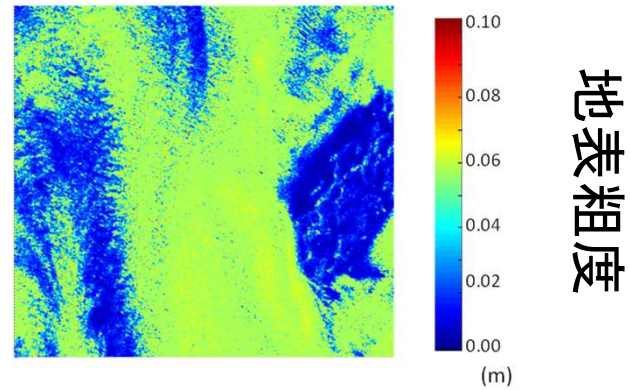
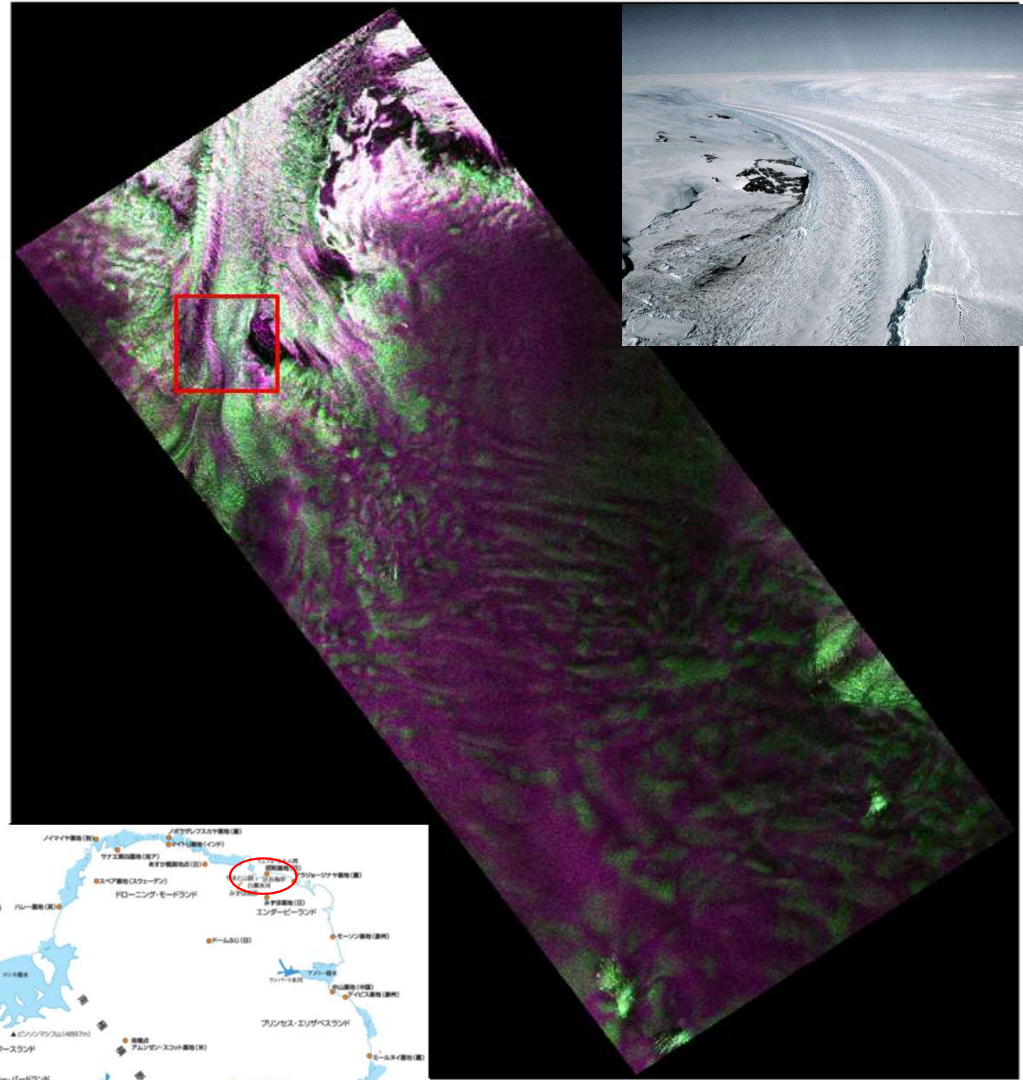
代表的な地球構成物質の比誘電率
(物理探査ハンドブック手法編 p. 404)

各地域中央部での比誘電率平均値

解析対象その2: 南極氷河地形

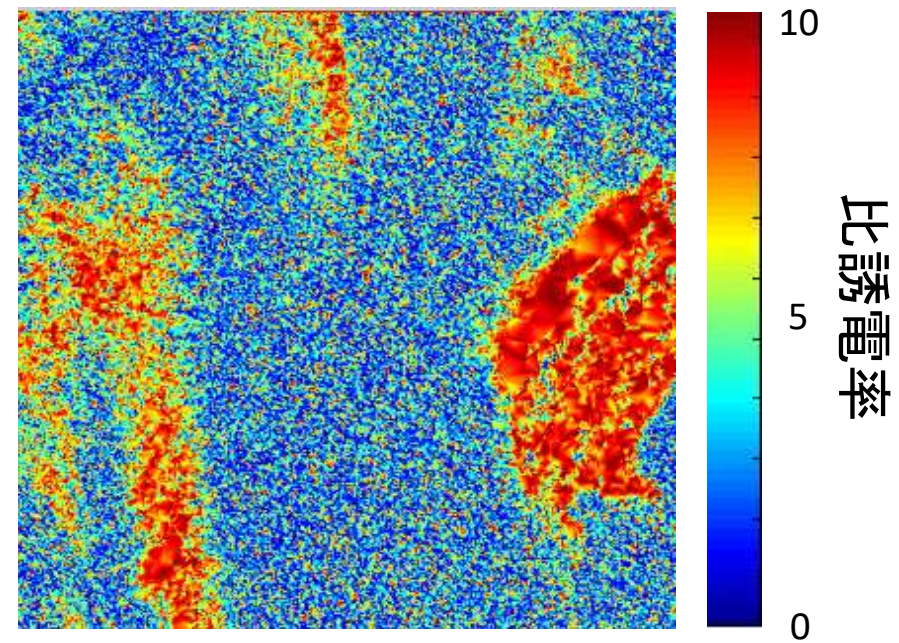
http://userdisk.webry.biglobe.ne.jp/013/770/47/N000/000/000/123950292594116409755_108.jpg

IV. ポラリメトリSAR



相対的に滑らかな地表の比誘電率が大きい→ 氷表面が少し融解？

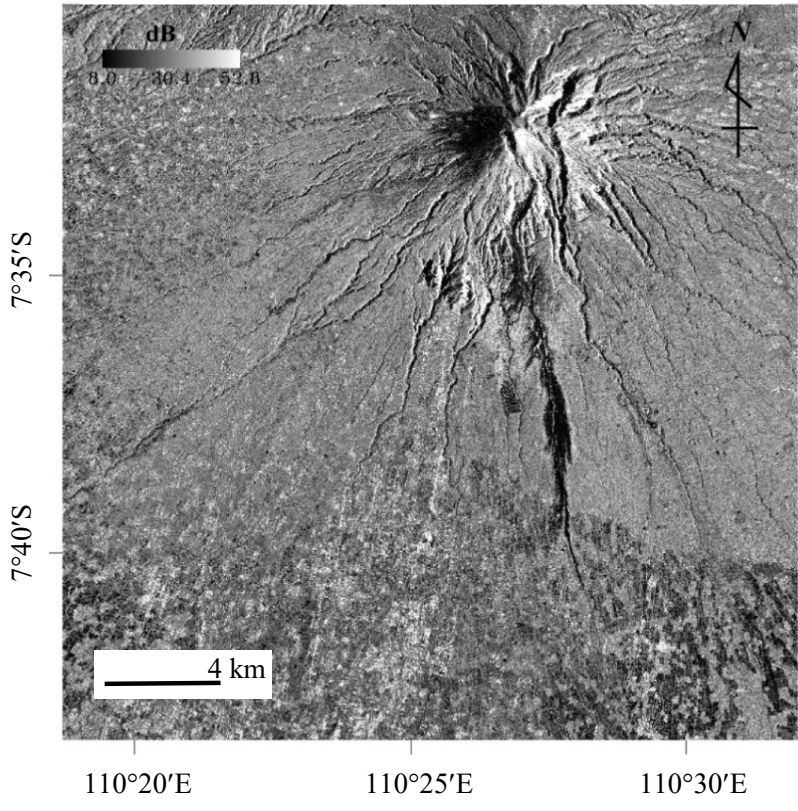
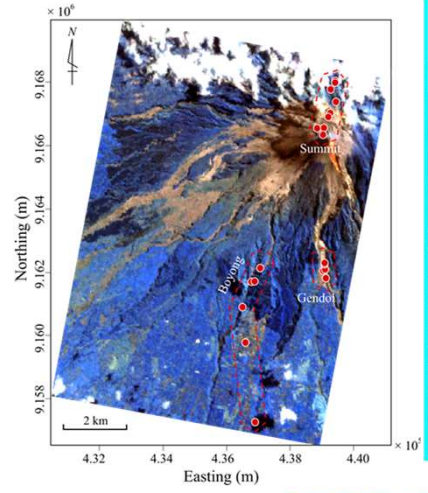
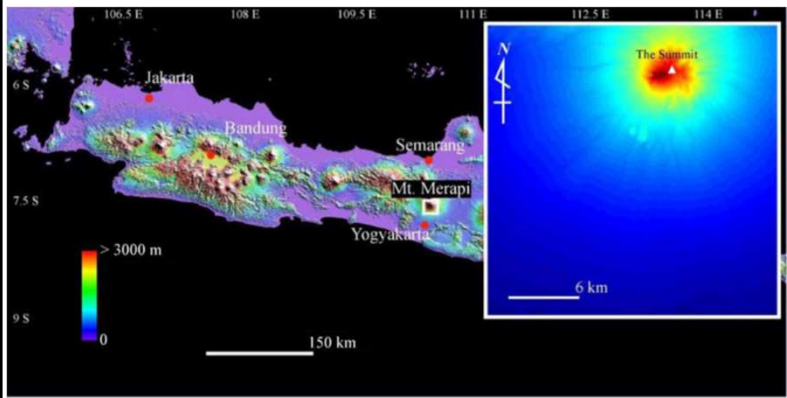
氷の比誘電率は約4.2, 水は約80



白瀬氷河付近のALOS PALSAR偏波合成画像 (HH: Red, HV: Green, VV: Blue)
赤の四角は計算領域 (6.25 km四方)

解析対象その3: 噴火を繰り返す活火山の周辺

インドネシア ジャワ島中部のメラピ火山

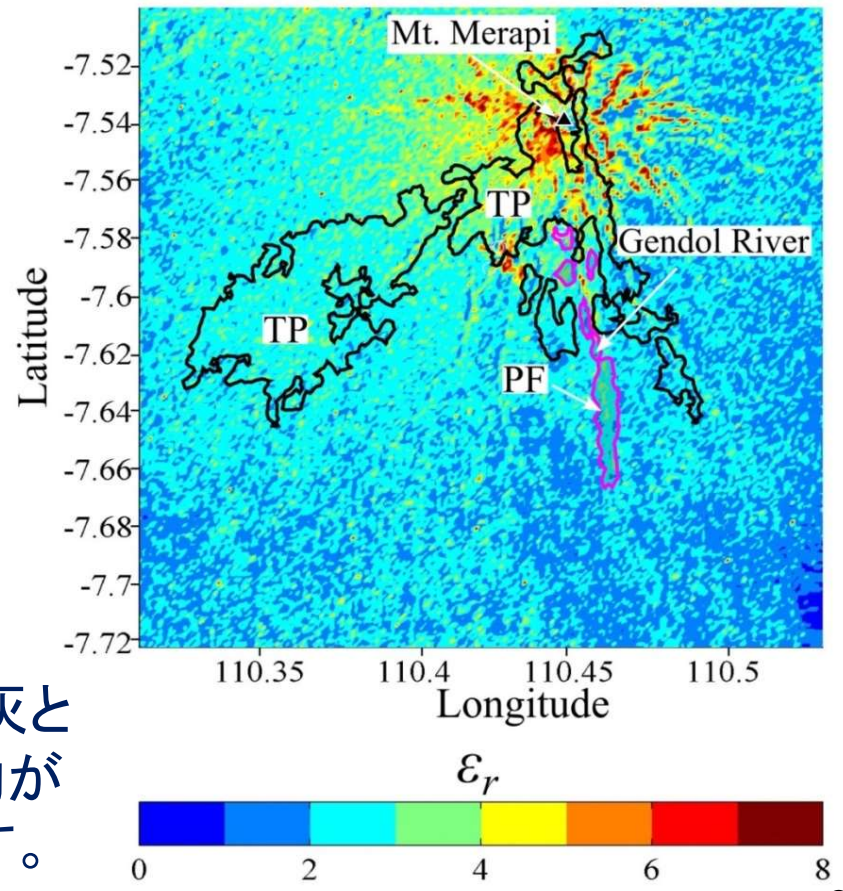


ALOS PALSARの強度画像

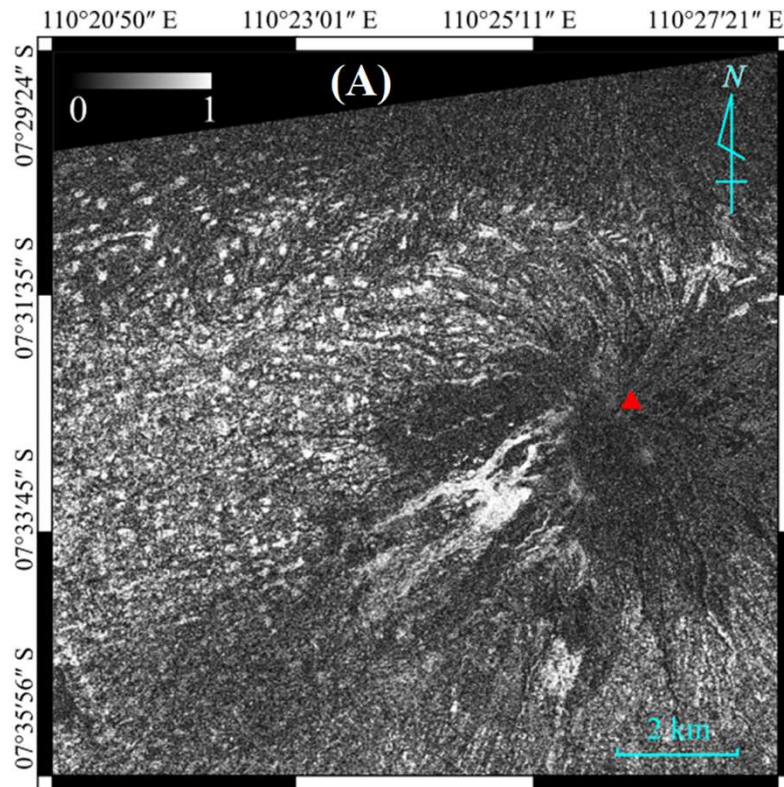
2010年11月5日の噴火に伴う火砕流堆積物(PF)とテフラ堆積物(TP)の分布と比誘電率の計算結果



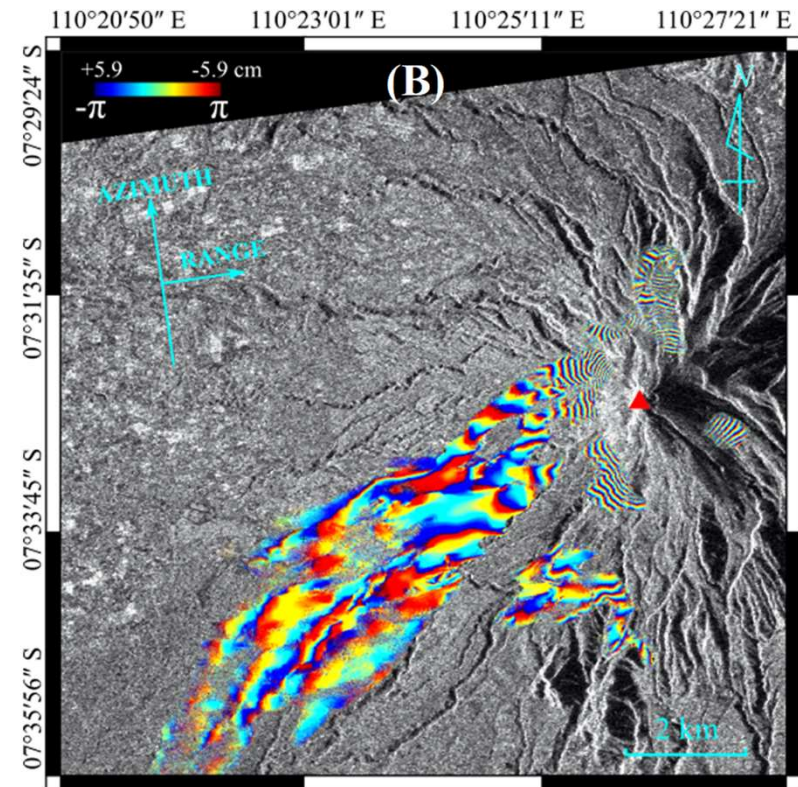
含水率が高い火山灰と軽石からなる堆積物が高い比誘電率を示す。



差分干渉SAR (D-InSAR) による 部分的な地形変位から領域全体変位への連続化



コヒーレンス (白色ほど高い)



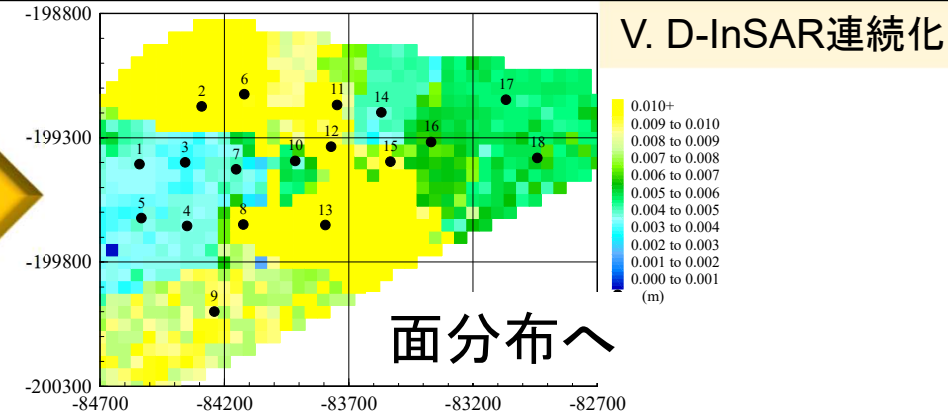
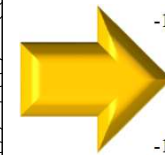
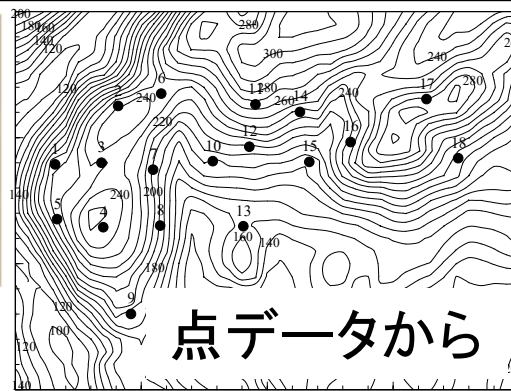
InSARによるインターフェログラム

コヒーレンスが低い場所は干渉しないので、得られるのは断片的な地形変位となる。

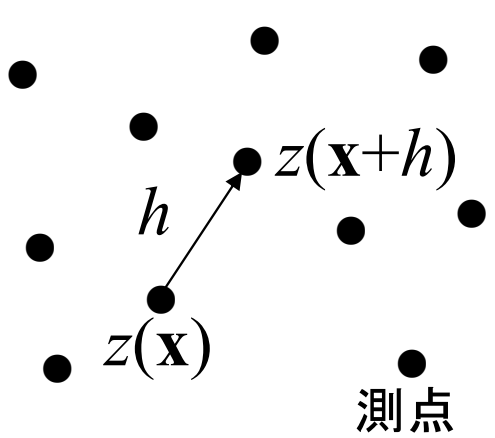


コヒーレンスが低い場所での地形変位も推定できるように、
領域全体にわたって地形変位を連続化できないか？

地球統計学による 点データから2次元、 3次元分布の推定



セミバリオグラム (semivariogram): データの空間的相関構造を定量化するための統計量

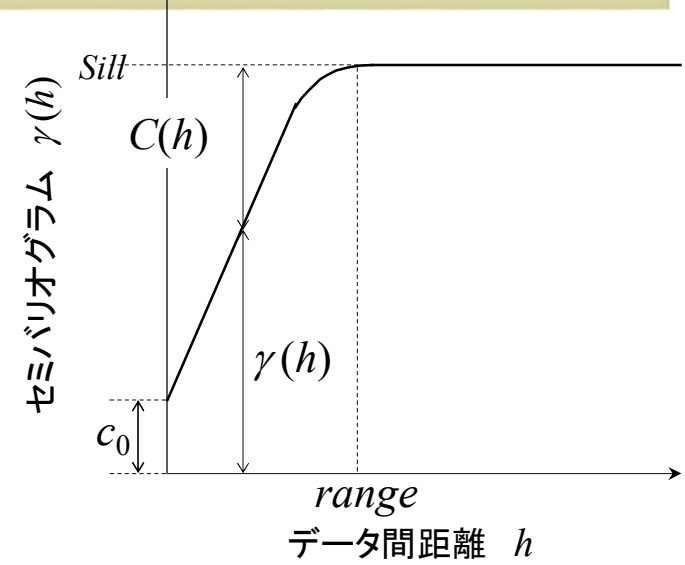


【一つの変量に対する定義】

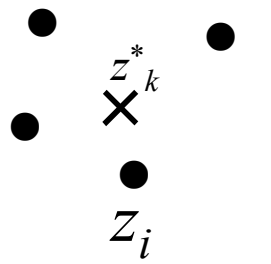
$$\gamma(h) = E \left\{ [z(\mathbf{x} + h) - z(\mathbf{x})]^2 \right\} / 2$$

→ h だけ離れたデータ組の分散を表現

\mathbf{x} : 測点の座標, h : 距離, $z(\mathbf{x})$: データ値



セミバリオグラムを用いた任意の点やブロックでの値の推定法 → クリギングと総称 (Kriging)



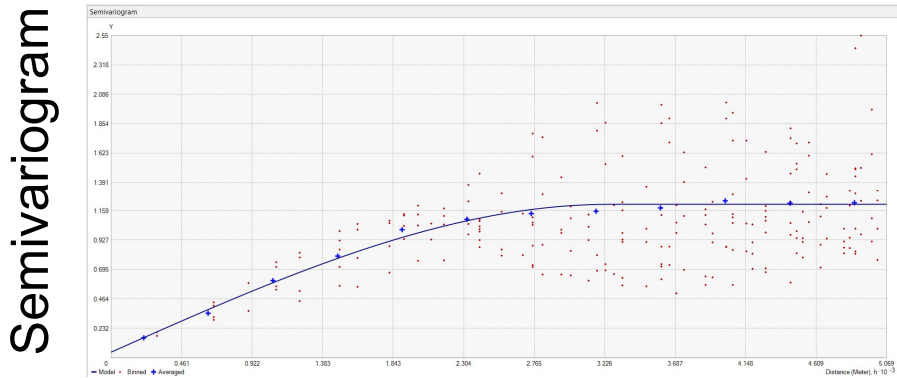
クリギングの基本式:
$$z_k^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i$$

z_k^* は推定値, λ_i は*i*番目のデータに対する重み係数, n は計算に用いるデータ数

PS-InSARにおけるポイントでの 地表変位から連続的な変位への 変換：地球統計学の応用

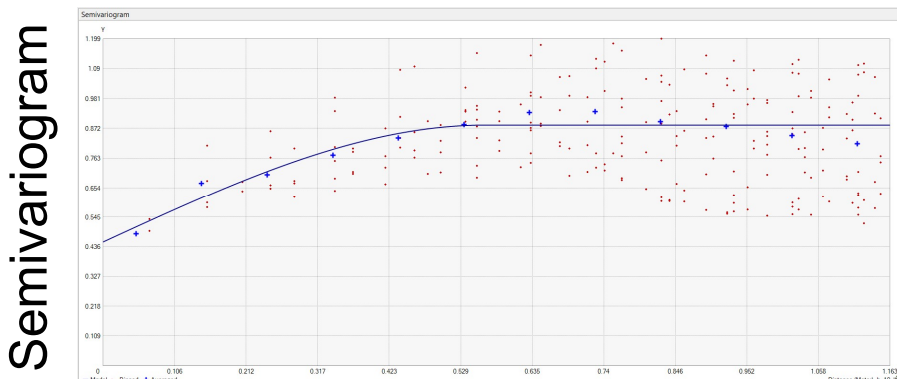
V. D-InSAR連続化

- Sentinel-1 Ascending軌道データ (2014-2017) を用いたPS-InSAR結果

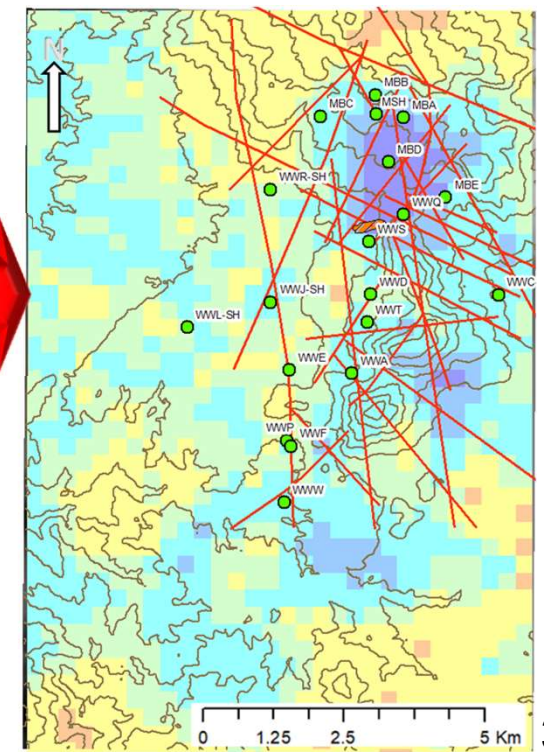
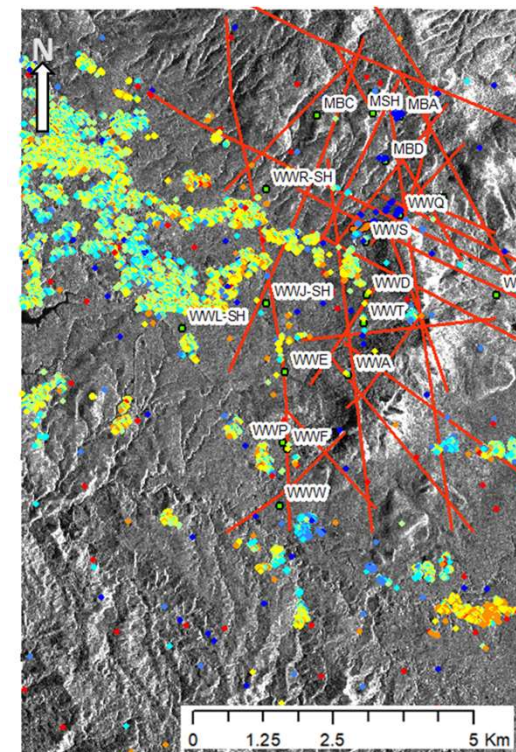
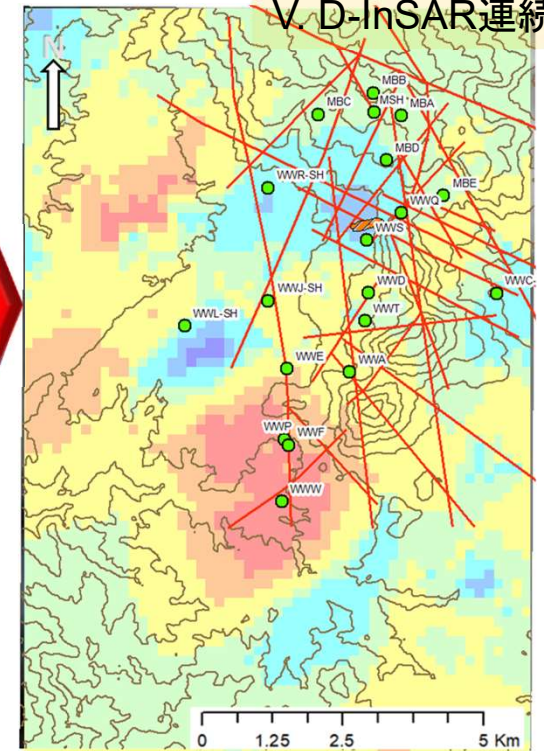
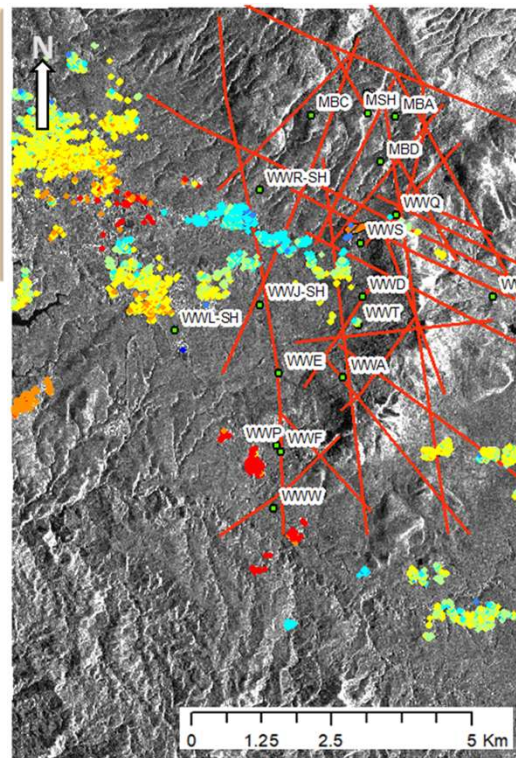


データ間距離

- Sentinel-1 Descending軌道データ (2015-2017) を用いたPS-InSAR結果



データ間距離



まとめ

- 【§ I】 PHITAによれば、2 μm 以上のSWIRに1つのバンドしかないLandsatシリーズのようなマルチスペクトル画像でもハイパー化でき、ハイパースペクトル画像が存在しない範囲でもマルチスペクトル衛星データから資源関連鉱物の分布を詳細にマッピングできる。
- 【§ II】 小領域での放射輝度関係に基づいて、バンド波長域が同じであれば低空間分解能画像から高分解能画像をシミュレーションできる。この高分解能化にASTER画像を用いた場合、ノイズ軽減の対策が必要になる。
- 【§ III】 近赤外域と短波長赤外域での反射率も考慮したVIGSによれば、金属濃度と植生ストレスとの関係をNDVIよりも正確に評価でき、ストレス増大に伴う値の変化も大きいことがわかった。また、2つの鉱床域への適用結果、VIGS異常地点の高密度域は高Cu濃度部、VIGS値の平均／標準偏差比が大きい部分は既知鉱床の位置と調和的であった。
- 【§ IV】 HH, VVの偏波SARデータの組み合わせによって、比誘電率・比透磁率の値と空間分布が算定でき、含水率が高い部分の特定などに利用できる。
- 【§ V】 PS-InSARによるPS点が飛び飛びに分布していても、地球統計学の応用によって領域全体にわたっての連続的な地表変位に変換できる。これとAscending・Descending軌道データとの組み合わせは、3次元的な地表変位の抽出に有効である。

謝辞： CASI, SASIデータは経済産業省からのJOGMEC受託事業「平成20年度次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発(金属資源探査技術の研究開発)」により提供いただいた。