

# 衛星画像における大気の影響とその対策

弘前大学理工学部 飯倉善和

## 衛星画像処理の概要

•物理量に変換してから応用を!

## 簡便な大気・地形効果補正とその問題点

$$DN = (DN - B) / (\cos b + C)$$

•回帰分析によるパラメータの推定

## 物理モデルに基づく大気・地形効果補正

•DN値から放射輝度値への校正

•放射伝達モデルによる大気の影響推定

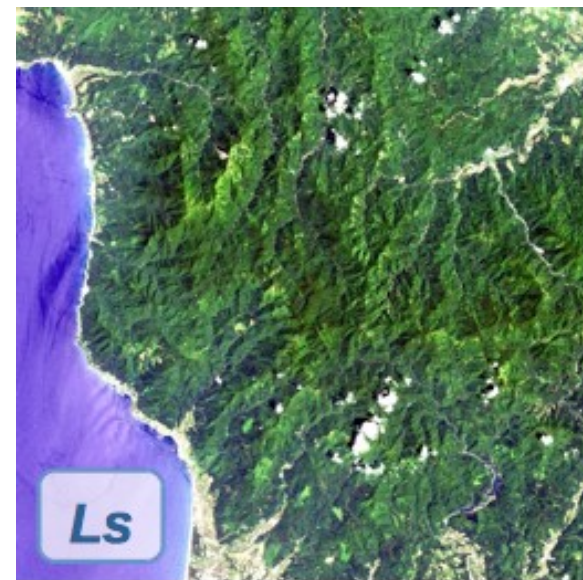
エアロゾルの鉛直分布および性質?

•起伏による影響の解析

## 空間的な変動(ヘイズや巻雲)による影響

•波長による影響の違い

•大気影響度の定義と補正への利用



Landsat ETM+  
June 30, 2002  
T108132

## 衛星データの体系的な処理

前処理: センサノイズの除去・DNの校正・精密幾何補正

大気・地形効果補正、方向性反射率の補正

物理量(画素単位): 地表面の分光反射率、温度、放射率

統計量(領域単位): 平均値、分散、統計分布の形状

応用分野: 土地被覆分類・土地利用図の作成、温度推定、  
変化抽出

合成開口レーダの利用: 後方散乱係数、散乱分解、干渉

ハイパースペクトルの利用: 分光反射率データベースの整備

### 参考文献

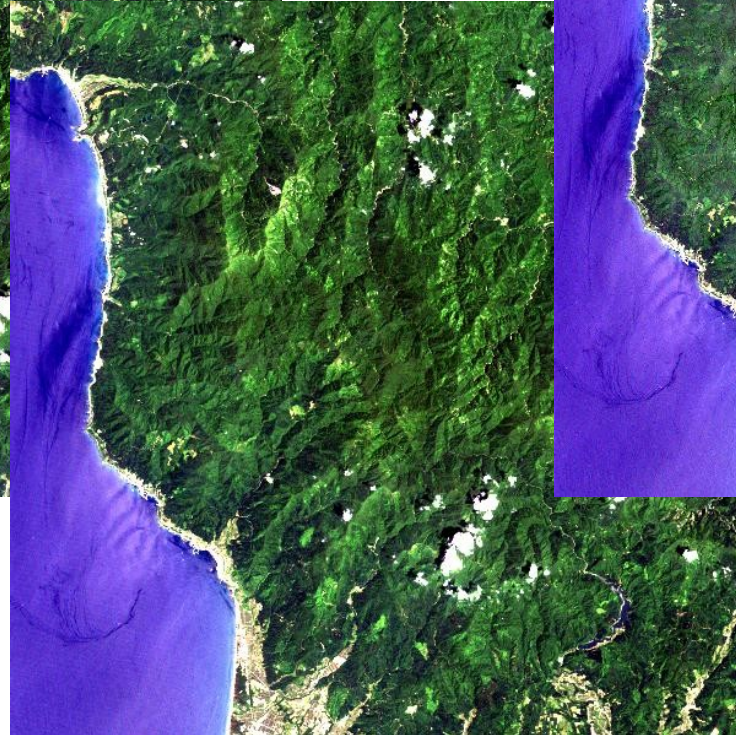
- A. Baraldi et al. (2010) : Operational Two-Stage Stratified Topographic Correction of Spaceborne Multispectral Imagery Employing an Automatic Spectral-Rule-Based Decision Tree Preliminary Classification, IEEE TGRS. 48(1), 112–146

# 大気地形効果補正（可視）

補正前



補正後



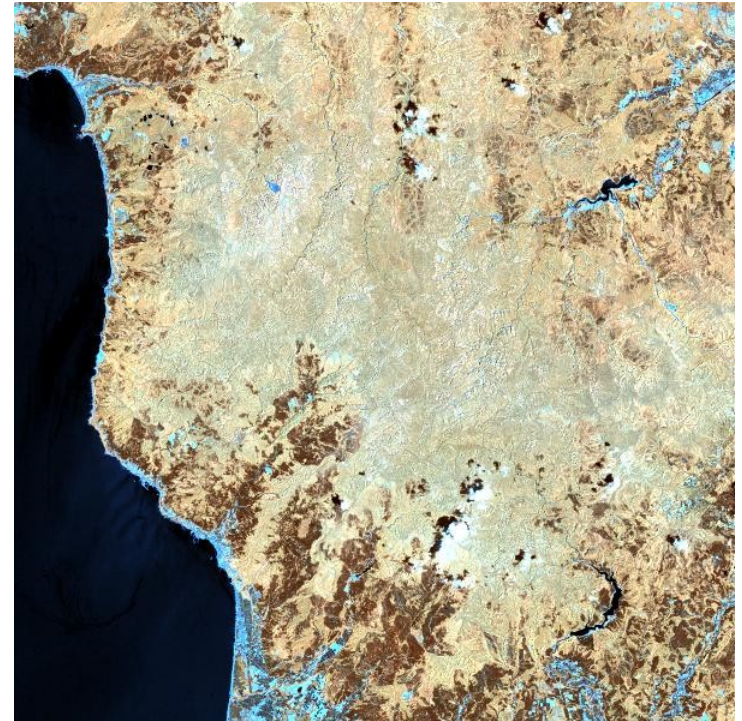
大気補正のみ

## 大気地形効果補正 (近赤外)

補正前



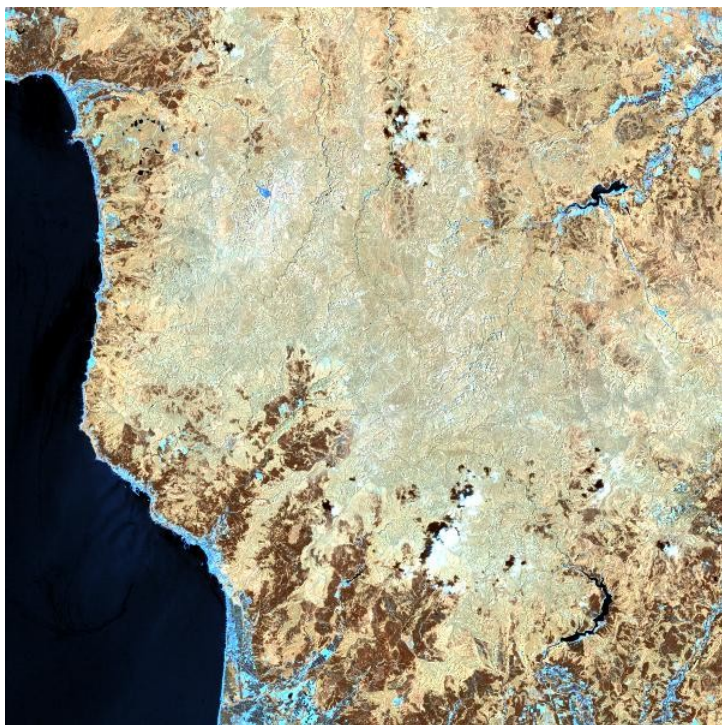
補正後



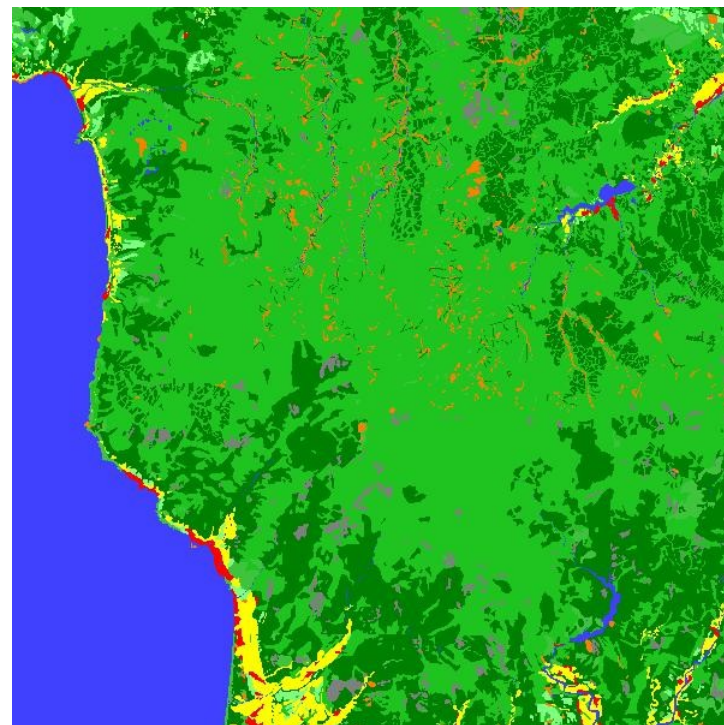
補正  
式:

$$DN = (DN - B) / (\cos b + C)$$

## 現存植生図（環境省）との比較



大気地形効果補正後  
〔近赤外カラー合成〕



うす緑： 広葉樹  
こい緑： 針葉樹  
赤： 市街地

## 実用的な大気地形効果補正方法

簡単な補正式：

修正コサイン法：

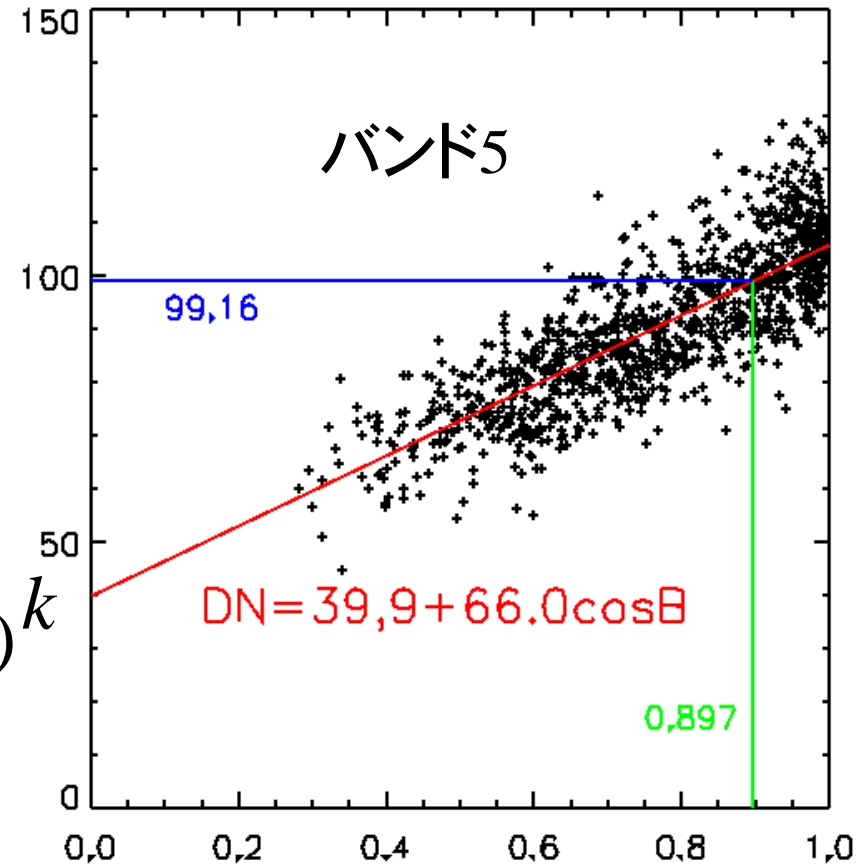
$$DN = (DN - a) / \cos b$$

C補正法：

$$DN = DN / (\cos b + a / b)$$

Minnaert補正法：

$$DN = DN \cos e / (\cos b \cos e)^k$$

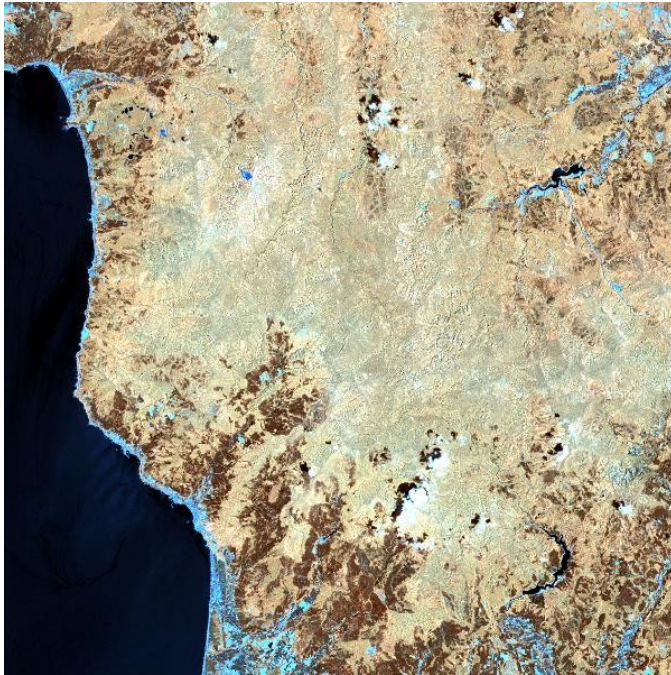


回帰分析：

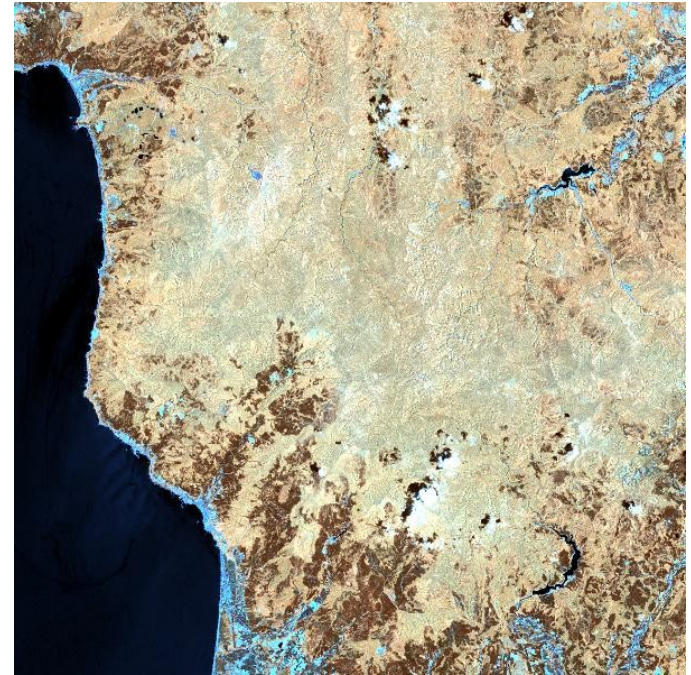
$$DN = a + b \cos b \quad \cos$$

## 簡単な補正式（一般形）：

$$DN = (DN - B) / (\cos b + C)$$



修正コサイン法： $C=0$



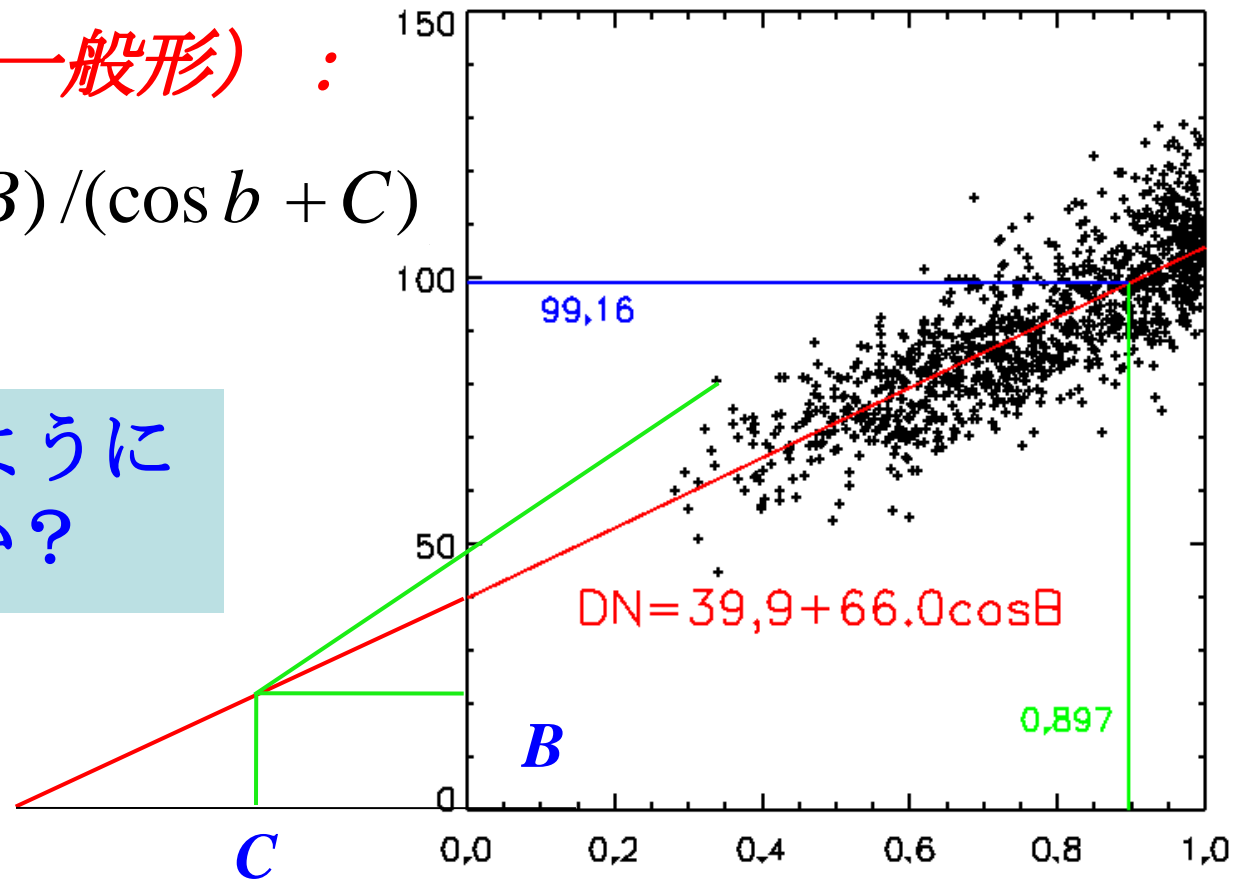
C補正法： $B=0$

回帰分析： $DN = a + b \cos b$

簡単な補正式（一般形）：

$$DN = (DN - B) / (\cos b + C)$$

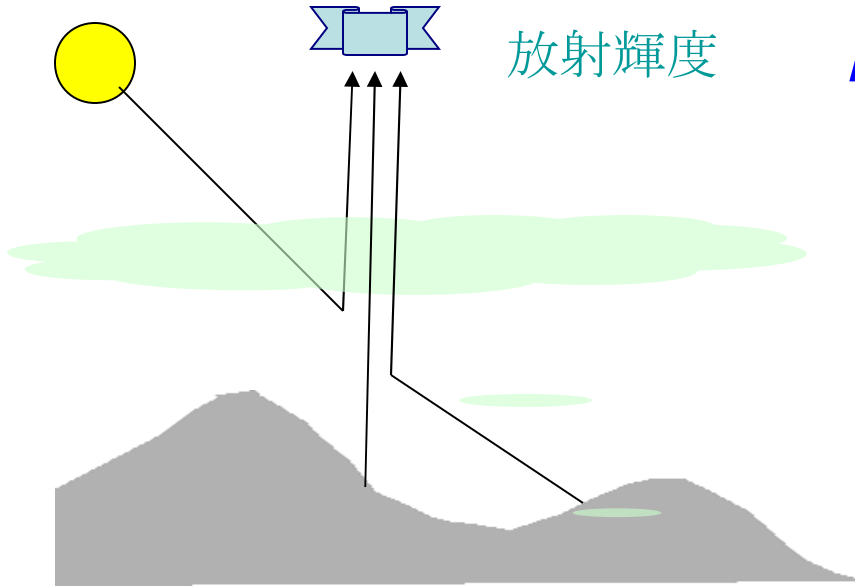
$B$ と $C$ をどのように決定するか？



物理モデルに戻って考える必要がある！！



# 物理モデル: 衛星で検知する放射輝度



$$L_s = T_s(z) \rho(x, y) I_0 / \pi + L_p(z) + L_b(z)$$

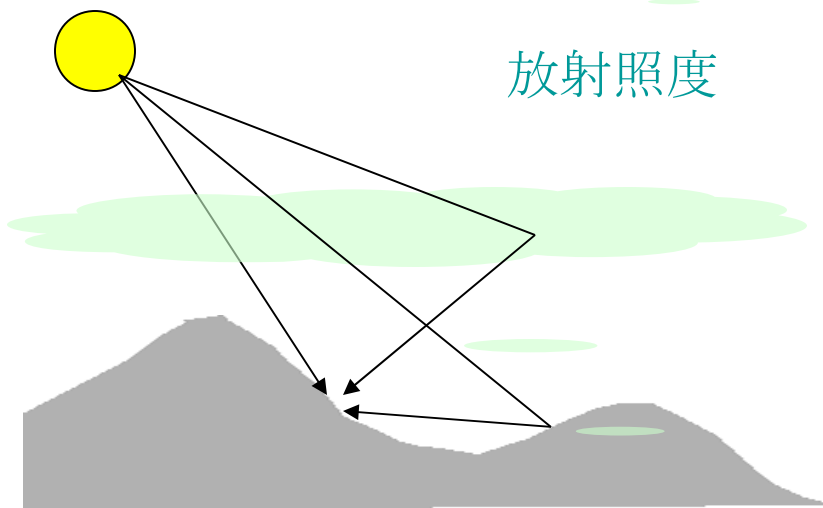
$T_s$  : Transmittance from  
surface to sensor

$\rho$  : Surface reflectance

$I_0$  : Irradiance at the surface

$L_p$  : Path radiance

$L_b$  : Background radiance



$$I_0(x, y) = E_0 T_\theta \cos \beta + E_d + E_t$$

$E_0$  : Solar radiance  
at top atmosphere

$T_\theta$  : Transmittance  
from sun to surface

$\theta$  : Solar incident angle

$E_d$  : Diffuse solar irradiance

$E_t$  : Reflection  
from neighbor slopes

## 物理モデルと実用的な補正式

衛星での放射輝度  $L_s = T_s(z)\rho(x,y)I_o/\pi + L_p(z) + L_b(z)$

衛星データからの推定  $L_s = \text{offset} + \text{gain} * DN$

地表での放射輝度  $L_s^* = \pi(L_s - L_p(z) - L_b(z)) / T_s(z)$

地表での放射照度  $I_o(x,y) = E_o T_\theta(z) \cos \beta + E_d + E_t$

分光反射率 
$$\rho = \frac{\pi(L_s - L_p - L_b)}{T_s(E_o T_q \cos b + E_d + E_t)} = \frac{pL_s^*}{I_o}$$

実用的な大気・地形効果補正 / BとCの決定

$$DN = (DN - B) / (\cos b + C)$$

## 最近の関連技術の発展



センサーの測定精度の向上  
数値標高モデルの利用

最適化法による精密幾何補正  
地形パラメータの厳密な計算

コンピュータの性能向上  
放射伝達方程式 (6S) の利用

## 科学的かつ体系的な処理が可能

物理モデルに基づいた処理  
モデルの妥当性の衛星データによる検証

# 解析例：利用した衛星画像

		band1	band2	band3	band4	band5	band7
NASA	gain	0.776	0.796	0.619	0.965	0.126	0.044
	offset	-6.20	-6.40	-5.00	-5.10	-1.00	-0.35
RESTEC	gain	1.176	1.205	0.939	0.965	0.190	0.044
	offset	-6.20	-6.40	-5.00	-5.10	-1.00	-0.35

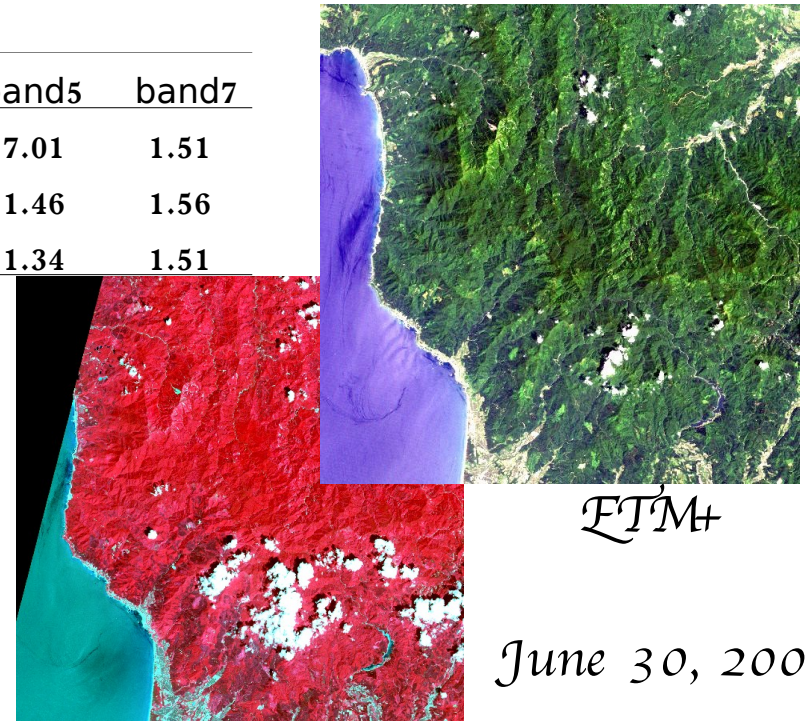
2006年4月～2008年9月までの ETM+プロダクトの文字情報に不備

## ブナ林での放射輝度値 $L_s$

	band1	band2	band3	band4	band5	band7
RESTEC	67.17	53.13	25.07	117.10	17.01	1.51
NASA	45.29	36.11	17.25	118.03	11.46	1.56
RESTEC-NEW	44.72	35.44	16.69	117.08	11.34	1.51

## 水域での放射輝度値 $L_s$

	band4	band5	band6	band7
ASTER	3.576	1.101	0.993	1.059
BETA	3.417	1.051	0.930	0.977
ETM	1.824 (band 5)		0.518 (band7)	



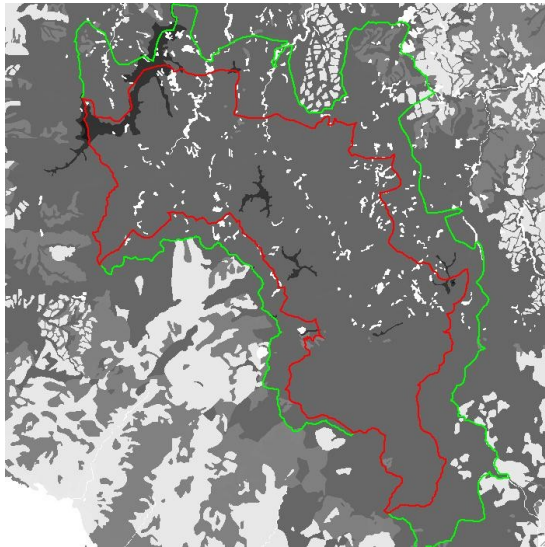
ETM+

June 30, 2002

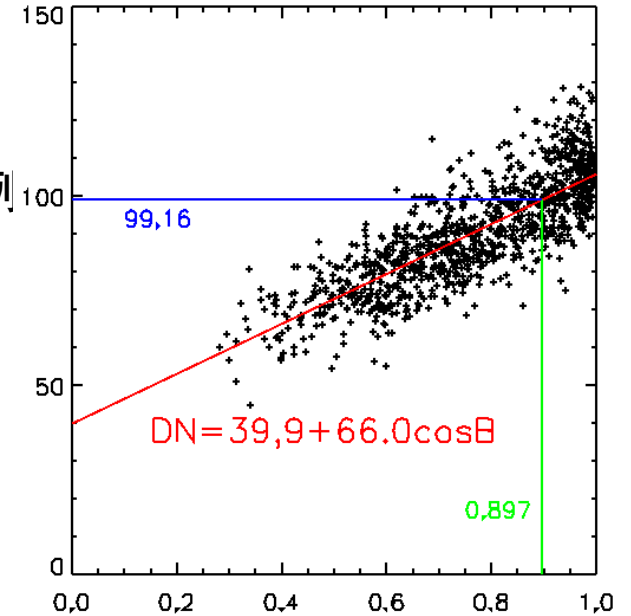
ASTER

# 平坦地におけるブナ林の放射輝度(夏)

サンプルデータの選択: 世界遺産地域のブナ林



Band 5 の例



	band1	band2	band3	band4	band5	band7
◆EF◆◆0	63.440	42.946	29.382	54.116	39.894	21.011
7Xツ御手Fテ 1	3.865	12.341	7.740	82.510	66.050	25.114
1.5xR×IDN	66.908	54.019	36.326	128.148	99.158	43.544
gain	0.776	0.796	0.619	0.965	0.126	0.044
offset	-6.20	-6.40	-5.00	-5.10	-1.00	-0.35
1.5xR×ILs	45.700	36.582	17.493	118.626	11.467	1.554

## 6Sによる大気パラメータの計算

### 入力データ の例

<b>0</b>	<b>(User Define)</b>
<b>26.2 123.6 0 0 6 30</b>	<b>(for Solar Information)</b>
<b>2</b>	<b>(Mid Latitude Summer)</b>
<b>2</b>	<b>(Maritime AEROSOL MODEL)</b>
<b>24.5</b>	<b>(Direct Visibility Input km)</b>
<b>-0.684</b>	<b>(TARGET ALTITUDE IN KM)</b>
<b>-1000</b>	<b>(SATELLITE CASE)</b>
<b>138</b>	<b>(Landsat ETM+ Band 1)</b>
<b>0</b>	<b>(HOMOGENEOUS CASE)</b>
<b>0</b>	<b>(DIRECTIONAL EFFECTS)</b>
<b>0</b>	<b>(Next Value is Surface Reflectance)</b>
<b>0.0063</b>	<b>(Surface Reflectance)</b>
<b>-1</b>	<b>(No ATMOSPHERIC CORRECTION)</b>

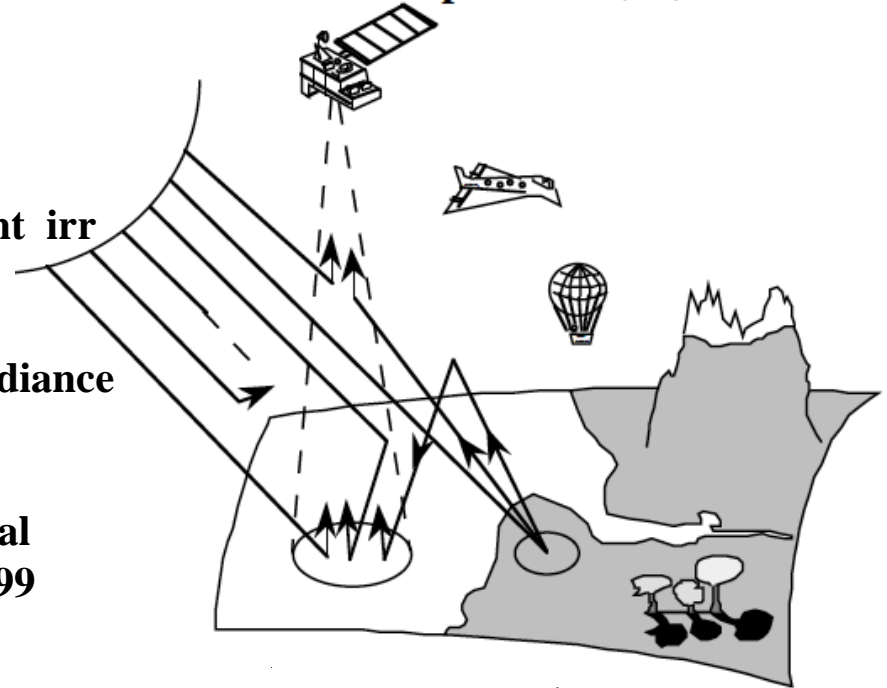
# 出力結果の例

```

*****
*   apparent ref ectance           0.0842
*   appar. rad.(w/m2/sr/mic)      45.761
*****
*   irr. at ground level (w/m2/mic)
*   direct solar irr.  atm. diffuse irr.  environment irr
*   1088.789           424.090           1.595
*   rad at satel. level (w/m2/sr/mic)
*   atm. intrin. rad.  background rad.  pixel radiance
*   43.032             0.700             2.029
*****
*
*   downward      upward      total
* gas. trans. :   0.99417      0.99477      0.98899
*****
*
*   rayleigh      aerosols      total
* optical depth:  0.16301      0.23571      0.39872
*****

```

Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S)



$$E_0 T_q = E_s / \cos q$$

平坦な地形(6S):  $L_s = r T_s (E_0 T_q \cos q + E_d^h + E_e) / p + L_p + L_b$

起伏のある地形:  $L_s = r T_s (E_0 T_q \cos b + E_d + E_t) / p + L_p + L_b$

## 6Sによる大気パラメータの推定(夏)

高度	0.684km	視程	24.5km			
	band 1	band 2	band 3	band 4	band 5	band 7
放射輝度 $L_s$	45.761	36.867	17.522	118.62	11.453	1.536
真の反射率	0.0063	0.0320	0.0120	0.4240	0.1880	0.0760
見かけの反射率	0.0842	0.0724	0.0408	0.4054	0.1815	0.0677
$L_p$	43.03	23.59	13.09	5.86	0.56	0.10
$L_b$	0.70	2.90	0.86	19.70	1.55	0.17
$L_{pixel}$	2.03	10.38	3.57	93.06	9.35	1.27
$E_{direct}$	1088.79	1089.65	976.10	689.29	158.27	55.45
$E_{difuse}$	424.09	341.77	264.20	162.89	29.22	8.41
$E_e$	1.60	5.48	1.33	24.89	1.51	0.15
$T_{down}$	0.6378	0.6810	0.7237	0.7498	0.7983	0.7781
$T_{up}$	0.6680	0.7085	0.7482	0.7724	0.8170	0.7984

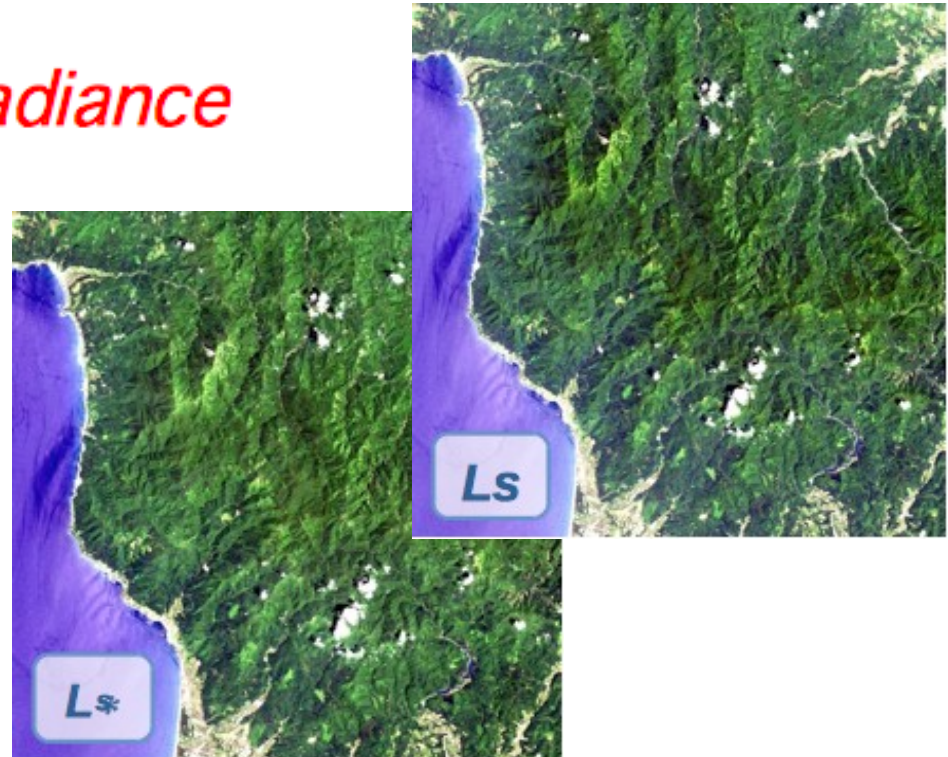


## パズラディアンズ ( $L_p$ ) と透過率 ( $T$ ) の標高依存性

Altitude	0.584-0.784km		Visibility 24.5km			
	band1	band2	band3	band4	band5	band7
$L_p$ /km	8.23	5.86	3.86	2.11	0.26	0.05
depth/km	0.131	0.117	0.107	0.098	0.080	0.071

*Estimation at surface radiance*

$$L_s^* = \frac{L_s - L_p - L_b + (h - h_0)dL_p}{T_s e^{(h - h_0)dT}}$$



# 起伏のある地形での補正

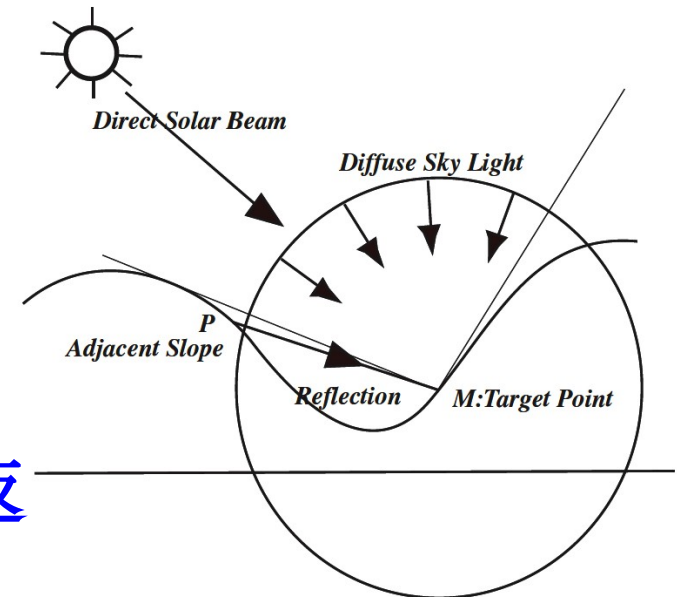
**簡単な補正式:**  $DN = (DN - B) / (\cos b + C)$

$L = offset + gain * DN$  (校正)

**物理モデル:** 
$$\rho = \frac{\pi(L_s - L_p - L_b)}{T_s(E_0 T_q \cos b + E_d + E_t)}$$

$B = (offset + L_p + L_b)$

$$C = \frac{E_d^h (1 - T_q \cos q) V_d + E_t}{E_0 T_q + E_d^h T_q}$$



画素ごとに天空視野要素や照返光を計算する必要がある！！

# 地表での放射照度の推定

$$C = (E_d + E_t) / E_0 T_q = \frac{E_d^h V_d + p \bar{L} C_t}{E_0 T_q}$$

(補正パラメータCの決定)

天空視野要素の計算

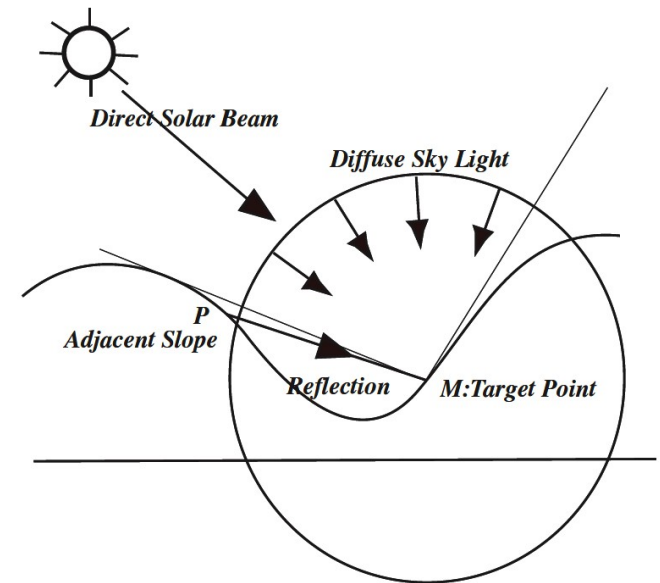
複数の方位に置ける地平線の計算

照返し光の計算

衛星データを用いた視野域上の厳密な積分  
平均放射輝度と地形構成要素を用いた計算

スカイライトの非等方性

$$E_d = E_d^h \{ T_q \cos b + (1 - T_q \cos q) V_d \} \quad C = \frac{E_d^h (1 - T_q \cos q) V_d + E_t}{E_0 T_q + E_d^h T_q}$$

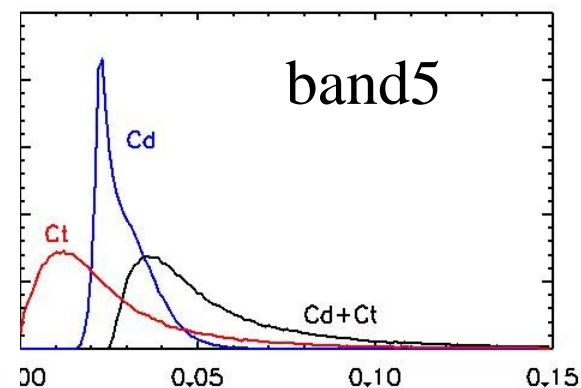
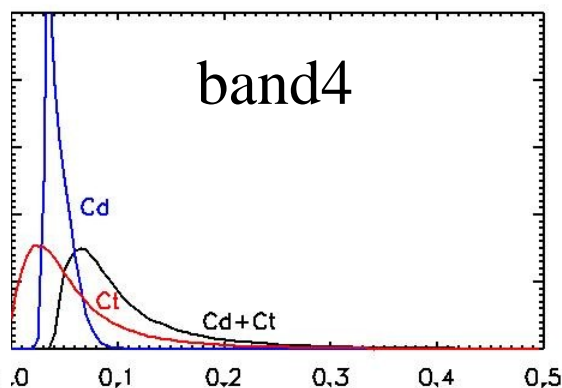
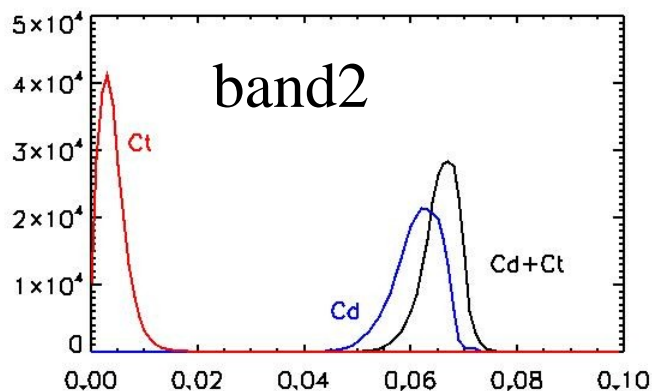


J. E. Hay(1983), Solar energy system design: the impact of mesoscale variation in solar radiation, Atmos. Ocean

# 補正パラメータの推定

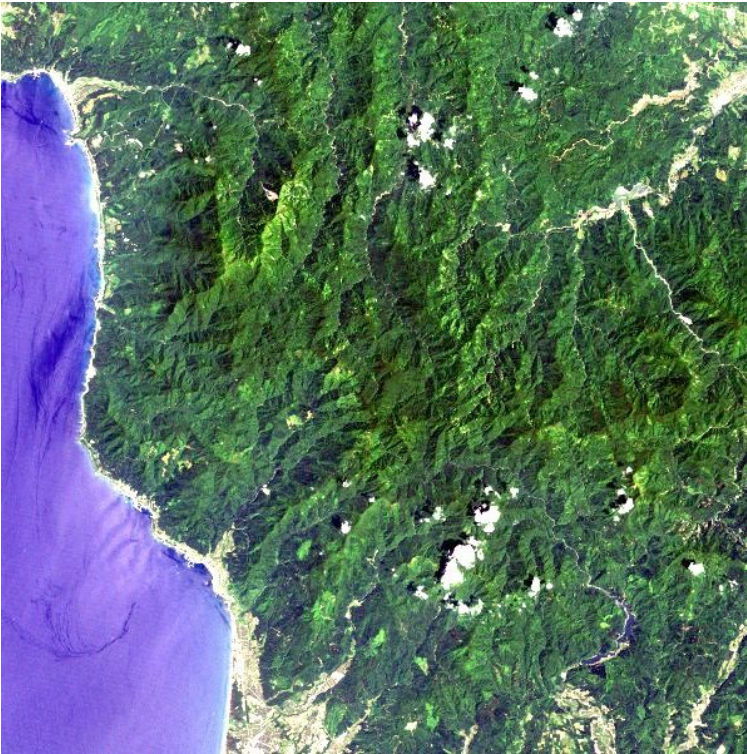
$$DN = (DN - B) / (\cos b + C)$$

	band 1	band 2	band 3	band 4	band 5	band 7
<b>B</b>	64.371	41.335	30.607	31.760	24.705	14.180
C1:平均	0.1218	0.0617	0.0461	0.0469	0.0298	0.0224
標準偏差	0.0316	0.0044	0.0033	0.0122	0.0077	0.0058
C2:平均	0.0034	0.0045	0.0021	0.0654	0.0282	0.0113
標準偏差	0.0032	0.0027	0.0015	0.0645	0.0279	0.0111
<b>C=C1+C2:平均</b>	<b>0.1252</b>	<b>0.0661</b>	<b>0.0482</b>	<b>0.1123</b>	<b>0.0580</b>	<b>0.0337</b>
<b>標準偏差</b>	<b>0.0338</b>	<b>0.0035</b>	<b>0.0030</b>	<b>0.0722</b>	<b>0.0330</b>	<b>0.0152</b>



# 陰影補正(地形効果補正)

$$\rho = \frac{\pi(L_s - L_p - L_b)}{T_s(E_0 T_q \cos b + E_d + E_t)} = \frac{pL_s^*}{I_o}$$



## 地表での放射輝度の推定

$$DN = (DN - B) / (\cos b + C)$$

(補正パラメータBの決定)

$$Ls^* = \pi(Ls - Lp(z) - Lb(z)) / Ts(z)$$

### 校正係数 $a, b$ の信頼性

ランドサットTMでは10%以下

ランドサットETM+では5%程度

テラASTER/だいちAVNIR-2?

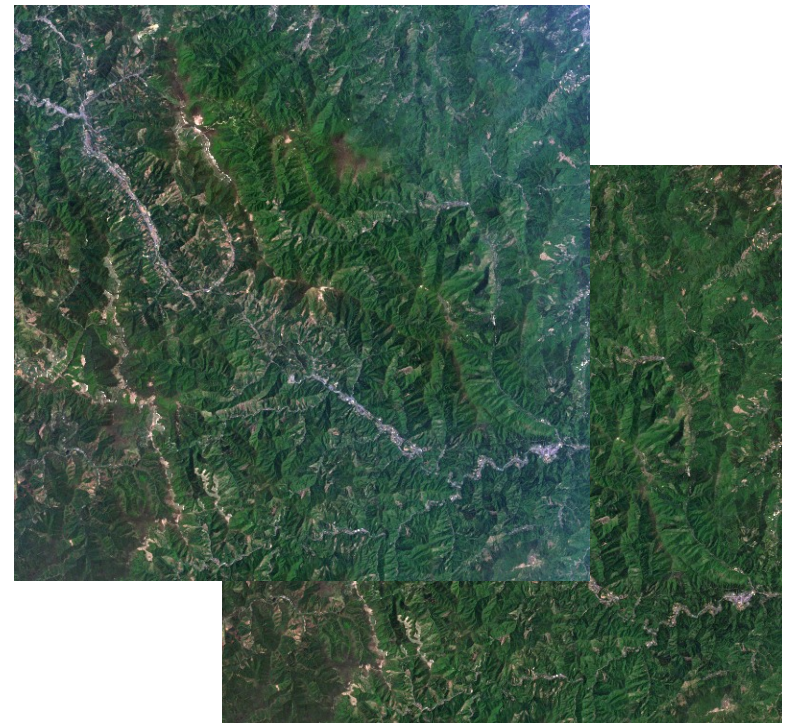
### パ斯拉ディアンズ $L_p$ の空間変動

可視バンドにおける標高依存性

ヘイズや巻雲の影響

### 背景放射輝度 $L_b$ の空間変動

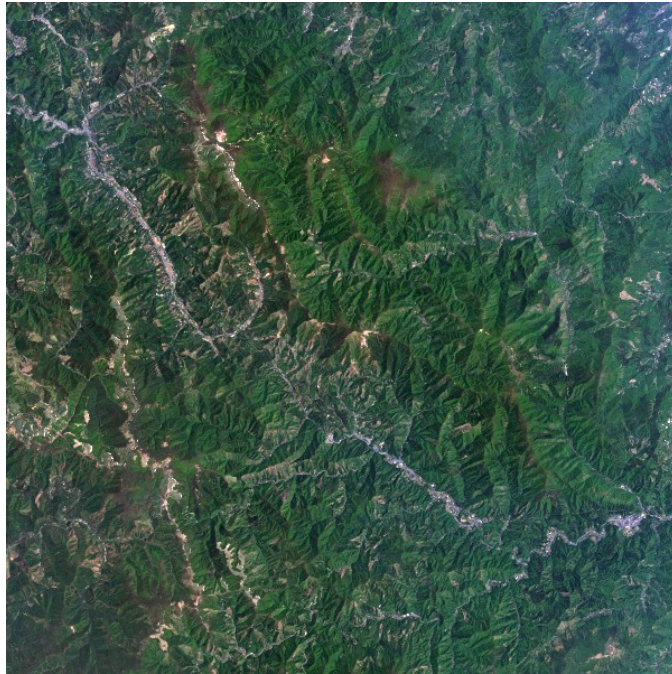
周りの画素の輝度に影響される。



Landsat TM June 3, 1996  
T107132

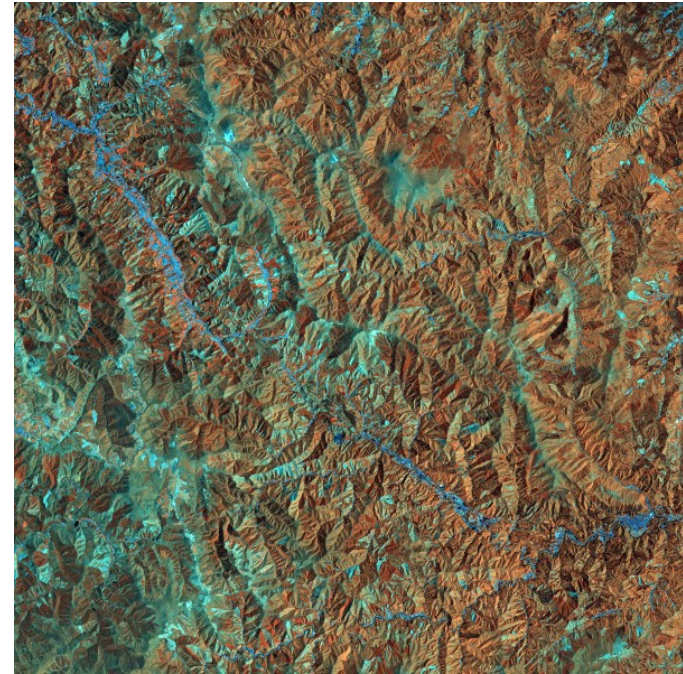
# 波長による大気の影響の違い

近赤外バンドのDNがすべて一致している画素を分類クラスとした。



TRUEカラー合成画像:

R(Band 3),G(Band 2),B(Band 1)



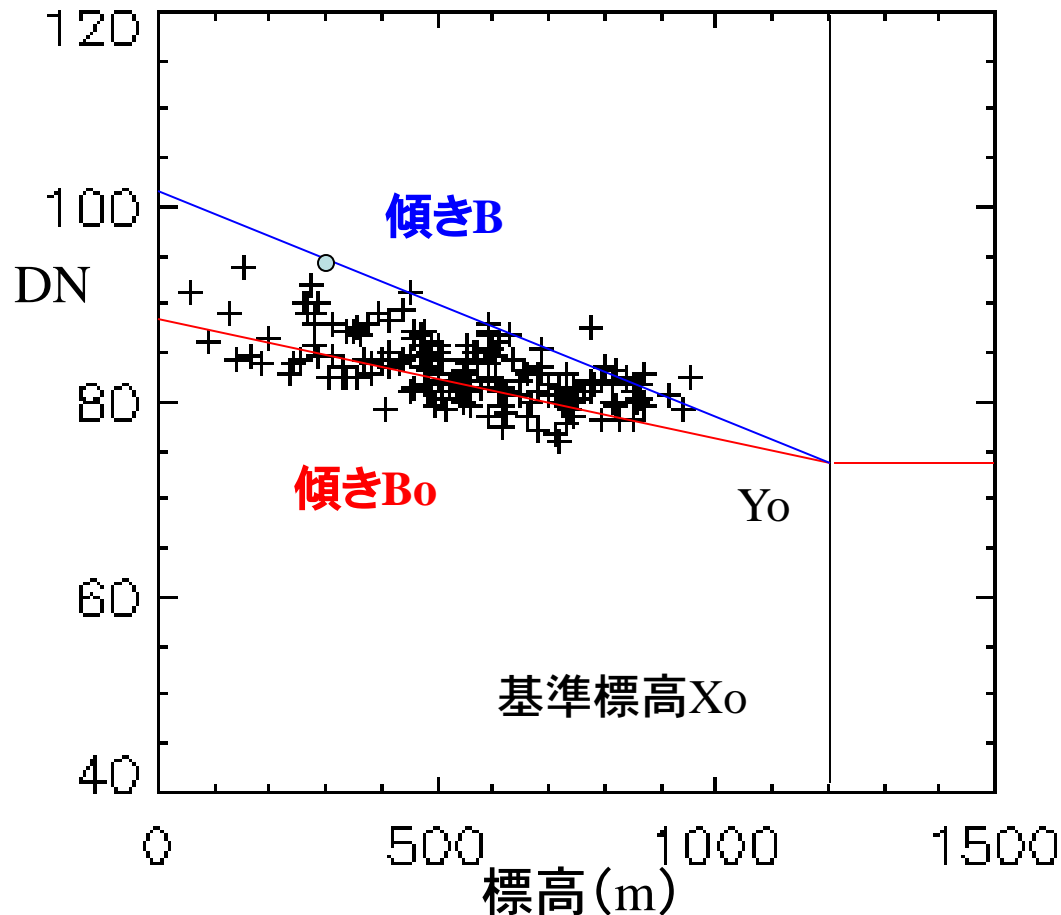
FALSEカラー合成画像:

R(Band 4),G(Band 5),B(Band 7)

M.J.Carlotto (1999) : Reducing the effects of space-varying wavelength-dependent scattering in multispectral imagery, Int J. Remotesensing, 20(17), 3333-3334

# 画素毎のパラメタBの推定

1. 傾き $B_0$ を8とする。
2.  $X_0$ におけるDNの値 $Y_0$ を求める。
3. 各画素毎にBを計算する。



分類クラスのDN:

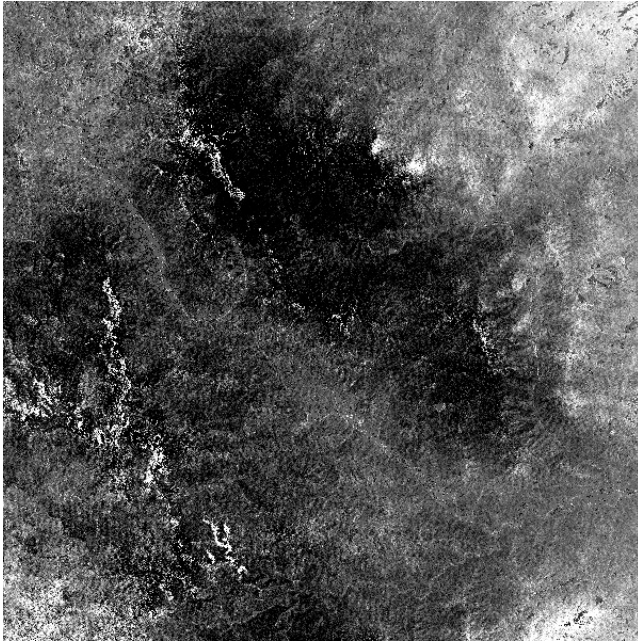
バンド4(102)

バンド5(70)

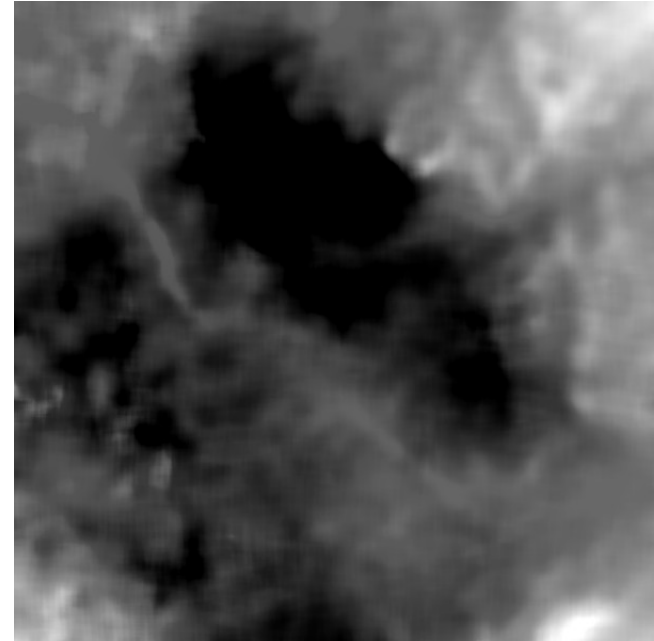
バンド7(20)



# 大気の影響度の推定



画素毎に推定した傾き $B$



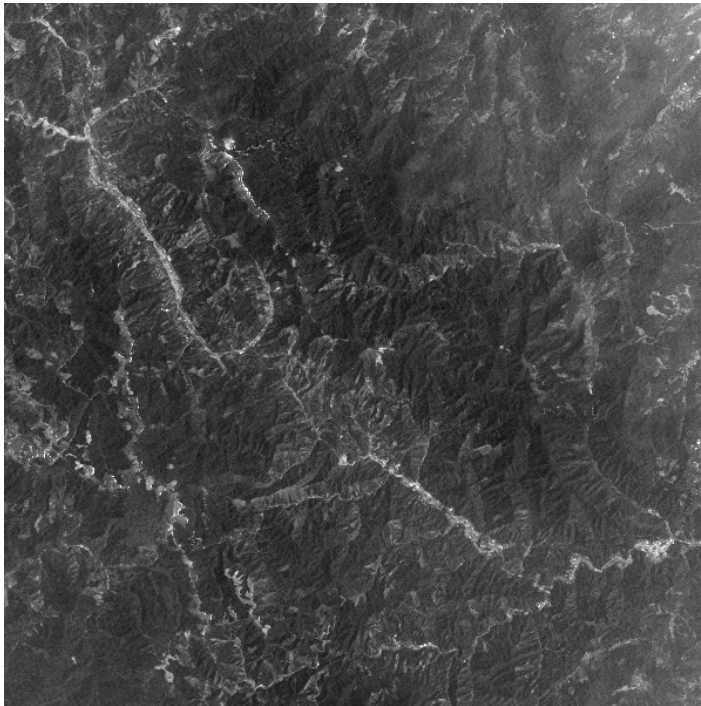
地域的な影響度 $B'$

画素毎の傾き $B$ に空間的な中央値フィルタ(600 m以内)を適用して平滑化した結果

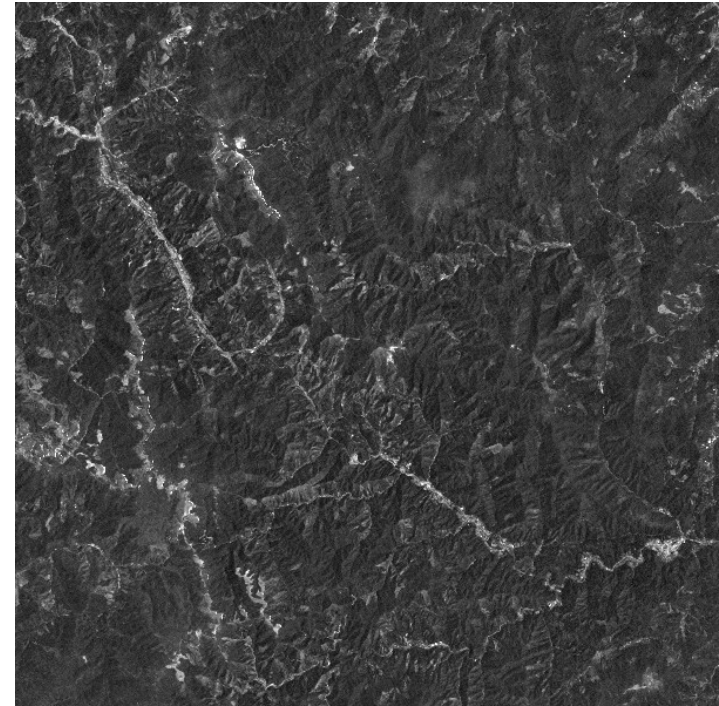
飯倉(2005):起伏のある地形での衛星画像に対するヘイズの影響の補正、  
リモセン学会第39回学術講演会論文集、87-88

# 影響度を利用した大気補正

## バンド1



**補正前**



**補正後**

補正後の $DN = DN - B'(X_0 - X)$   
但し  $X$ は標高、 $X_0$ は基準標高

## まとめ

衛星データは物理量に変換してから利用すべきである。  
物理的なモデルとデータに基づいて体系的に処理する。  
起伏のある地形においては、

大気の影響と地形の影響は不可分の関係にある  
**提供されるデータは信用ができるか？**

幾何的な精度の評価

校正係数の信頼性

**大気パラメータは観測されているのか？**

基本的な気象観測と利用できるデータ

エアロゾルの性質と分布：視程？

空間的に変化する大気パラメータをどう取り扱うの  
か？

**大気地形効果補正をどのように検証するか？**

## 参考文献

- A. Baraldi et al. : Operational Two-Stage Stratified Topographic Correction of Spaceborne Multispectral Imagery Employing an Automatic Spectral-Rule-Based Decision Tree Preliminary Classification, IEEE TGRS. 48(1), 112-146, 2010
- F. Tupin et al. : How Advanced Image Processing Helps for Sar Image Restoration and Analysis, IEEE Geoscience and Remote Sensing Society Newsletter, 10-17, March 2011
- J. S. Pearlman, et al.: Hyperion, a Space-based Imaging Spectrometer, IEEE, Trans. Geosci. Remote Sens., 41, 1160-1173, 2003.
- Dell'Endice, et al.: Scene-based method for spatial misregistration detection in hyperspectral imagery, Applied Optics, 46, 15, pp. 2803-2816, 2007.
- E. Vermote et al: Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum - Vector (6SV), 6S User Guide Version 3, November 2006
- M.J. Carlotto : Reducing the effects of space-varying. Wavelength-dependent scattering in multispectral imagery, Int J. Remotesensing, 20(17), pp.3333-3334, 1999
- S. Liang et al. : Atmospheric Correction of Landsat ETM+ Land Surface Imagery- Part I, IEEE TGRS. 39(11), 2490-2498, 2001