

衛星からの地表面反射率の推定
-**ASTER** 大気補正アルゴリズム開発の経験から-

森山雅雄(長崎大学)

1 Oct. 2013

はじめに

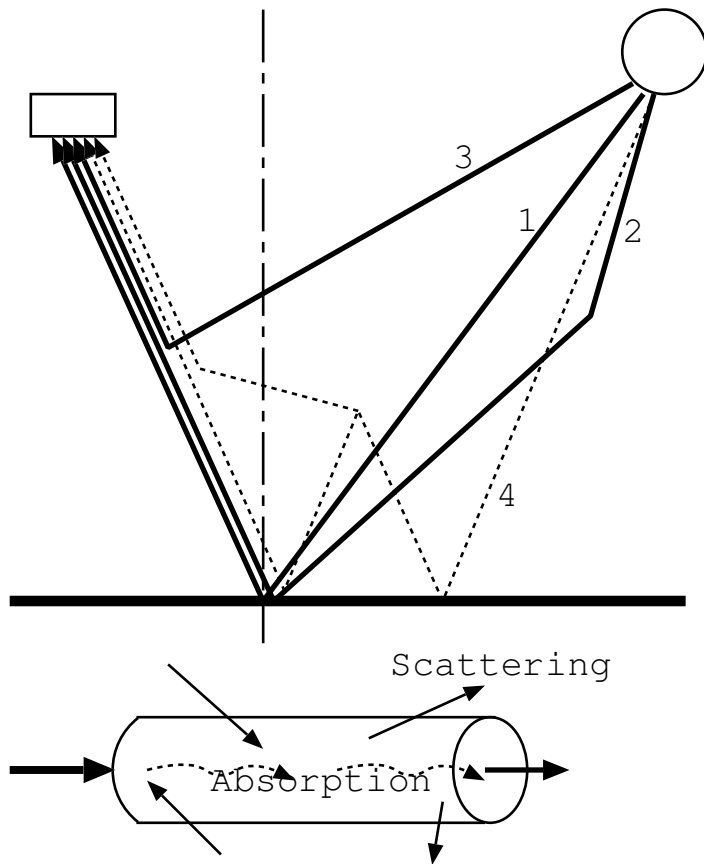
発表の流れ

- イン트로
- 放射伝達と従来型大気補正
- ASTER VNIR/SWIRの大気補正 + 地形効果補正手法
- ASTER 相対反射率推定手法
- BRDF
- お願い

リモートセンシングデータをどう使うか？ みるとはかる

1. みる: (機械)判読、とりあえず画像であればよい。
2. はかる: 物理量(またはそれと1対1に対応した指数)の推定、後段のモデルの入力となる。
品質向上、品質保証が必要。

放射伝達：衛星観測輝度の内訳

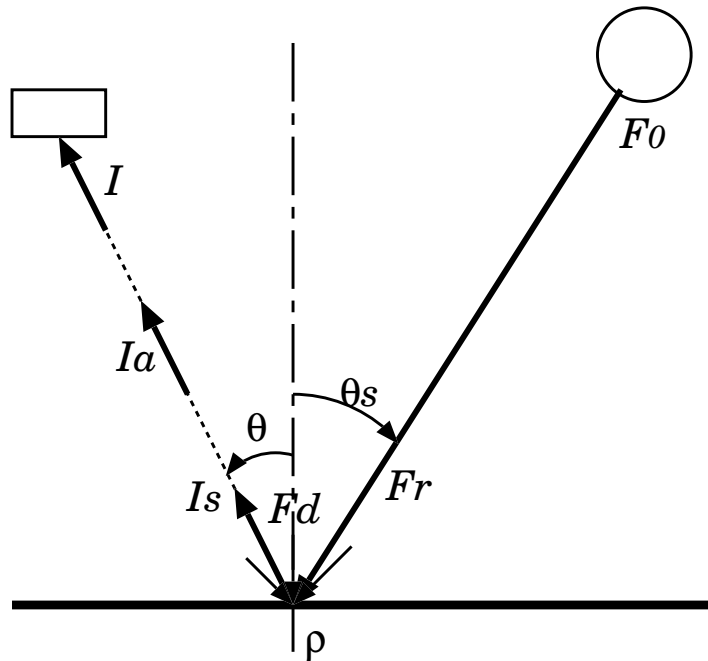


1. 直達反射成分: 直達日射の反射成分
2. 拡散反射成分: 拡散日射の反射成分
3. パスラジアンズ: 地表面に到達せずに散乱によって衛星に到達した成分
4. 周辺効果: 対象画素以外からの反射成分が散乱によって、対象画素を観測する光路上に乗ってくる成分 → 無視することが多い。

太陽放射と大気の相互作用

- 吸収: 特定波長で生じる
 - 散乱: 短波長ほど顕著
-
- 減衰: 散乱と吸収による: 乗法的
 - 散乱: 多方向からの放射の散乱: 加法的

最も簡単な放射伝達方程式と大気補正法



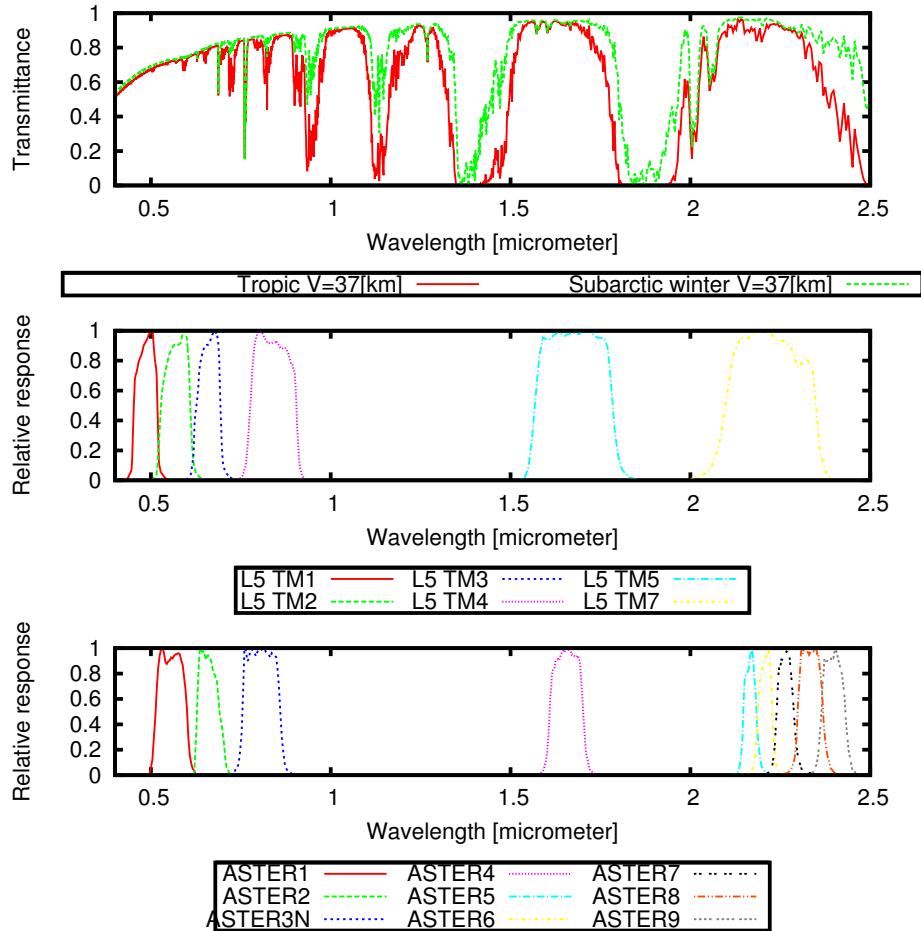
$$I = \tau(\theta) [F_r(\theta_s) \cos(\theta_s) + F_d(\theta_s)] \frac{\rho}{\pi} + I_a(\theta_s, \theta)$$

- θ_s : 太陽天頂角、 θ : 観測天頂角
- $F_r(\theta_s)$: 直達日射 ($= F_0 \tau(\theta_s)$)、 τ : 透過率
- $F_d(\theta_s)$: 拡散日射
- $I_a(\theta_s, \theta)$: パスラジアンズ
- 仮定
 1. ランバート反射面 (反射輝度は方向によらず一定)
 2. 地表面は水平 (地形効果は無視)

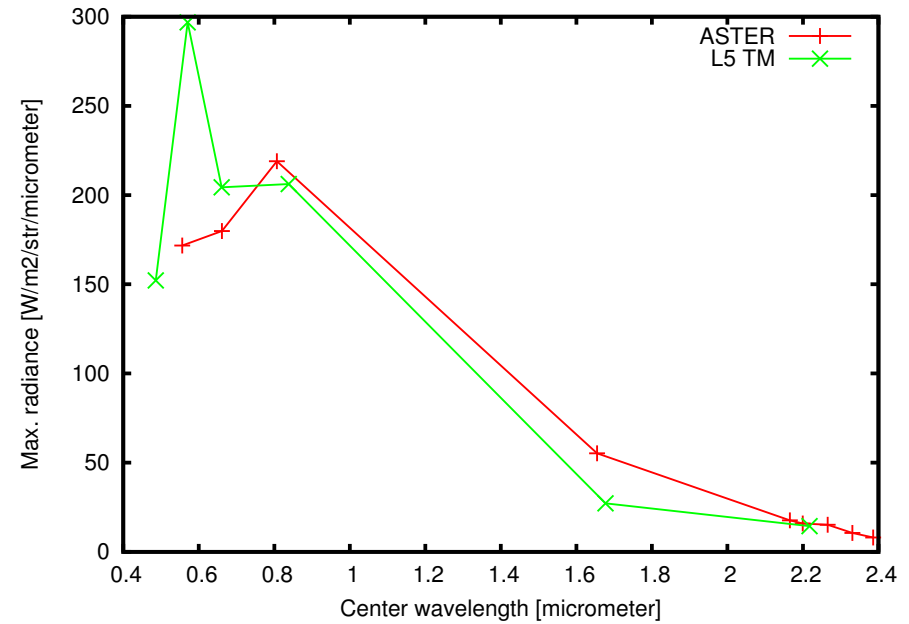
見かけの反射率 $\rho_a = \frac{\pi I}{F_0}$ (AVHRR)、または $= \frac{\pi I}{F_0 \cos(\theta_s)}$

大気補正済み反射率 $\rho = \frac{\pi(I - I_a)}{\tau(\theta) [F_r(\theta_s) \cos(\theta_s) + F_d(\theta_s)]}$ (MODIS, ASTER 地表面反射率)

ASTER, TM VNIR/SWIR帯の特性



ASTER VNIR/SWIR, L-5 TM response



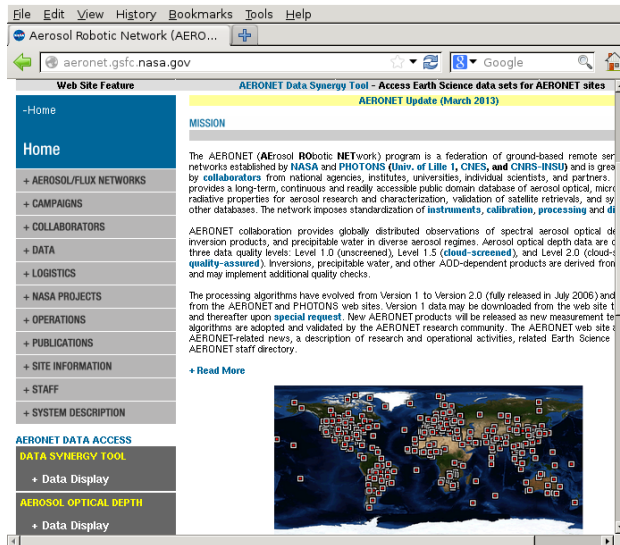
Maximum radiance

- swath: 60[km](ASTER), 180[km](TM)
- 8bit 量子化
- 空間分解能: VNIR 15[m](ASTER), 30[m](TM), SWIR 30[m]

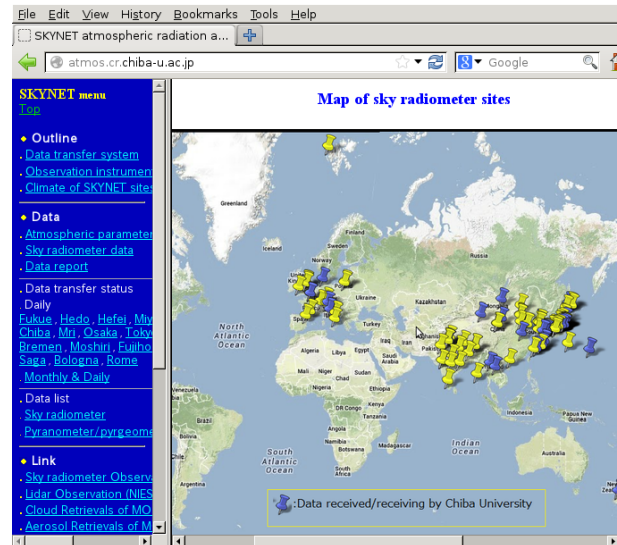
パ斯拉ジアンズや透過率はどうやって計算するか?

- 放射伝達コード: 大気状態、太陽幾何、観測幾何を入力し、輝度、透過率を計算するソフトウェア → MODTRAN, 6S, RSTAR,
- 大気状態: 気圧(大気分子量), エアロソル量, 水蒸気量(NIR, SWIR), オゾン量(G)
 - 気圧: 標高で代用可能
 - 水蒸気量: 数値予報モデル(2.5~0.5[deg.]メッシュ、6時間毎)、標準大気モデル
 - * 標準大気モデル: 熱帯、米国標準、中緯度夏冬、亜寒帯夏冬
 - オゾン量: 衛星(TOMS)データ、標準大気モデル
 - エアロソル量
 - * 地上視程(地表面付近の水平方向にどこまで見えるか)、主要測候所で1~3時間毎に計測 → 放射伝達コードへ直接入力可能
 - * エアロソル光学的厚さ
 - ・ 地表で直達日射計 etc で計測: AERONET、SKYNET
 - ・ 衛星から推定(POLDER, MISR, MODIS, CAI, SGLI)
 - ・ 数値予報モデル: SPRINTARS(黄砂予測で有名)

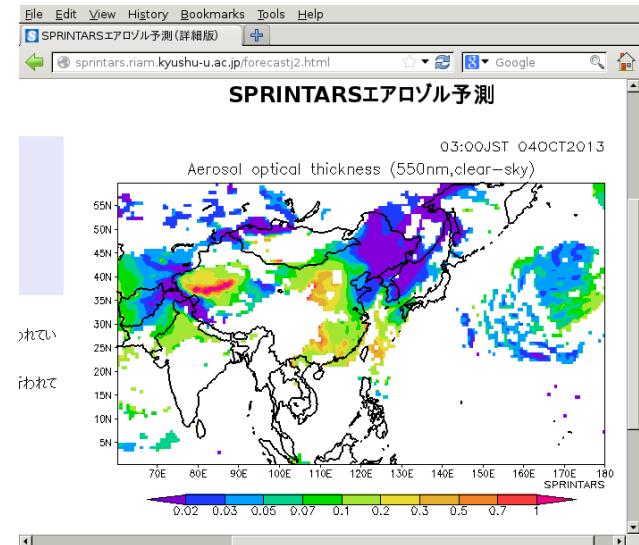
AERONET, SKYNET, SPRINTARS



AERONET



SKYNET



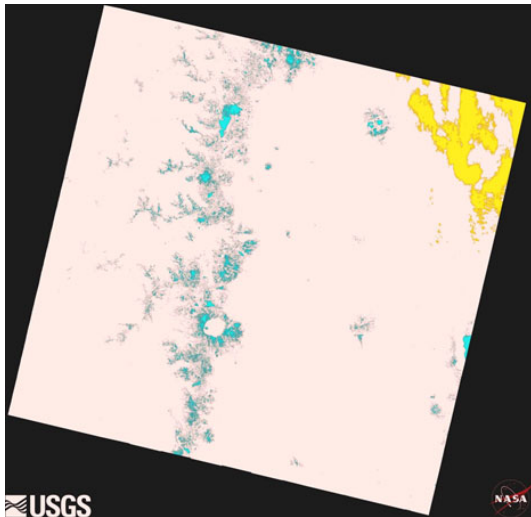
SPRINTARS

誰が大気補正するか？

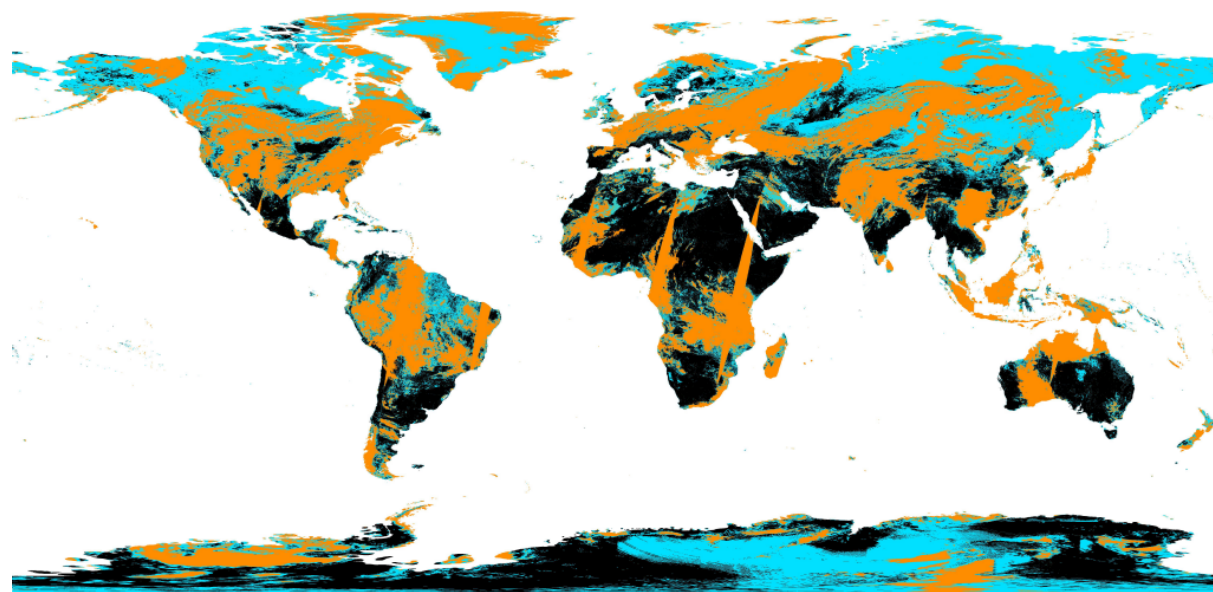
- データ提供側: TERRA, AQUA/MODIS, TERRA/ASTER, TERRA/MISR, ADEOS-II/GLI, LANDSAT8/OLI → 高次プロダクト
 - 地表面反射率プロダクトとして提供される。
 - 提供側で定期的な検証(主に地上観測)が実施される。
 - データと共に QA(Quality Assurance) 情報も (画素毎に) 提供される。
- ユーザ: LANDSAT/ETM+, TM, MSS, NOAA/AVHRR, ALOS/AVNIR
 - 大気状態(特にエアロソル量)が入手困難
 - * 気象台の視程を利用する。
 - * 一定のエアロソル量で大気補正する。
 - * みかけの反射率を利用する。 → NDVI等の指数計算
 - 同期観測による検証が不可能
 - * シミュレーションによる大気補正誤差(反射率誤差)と結果の関連付け。

QA(Quality Assurance) 情報

- 画素毎、シーン毎の品質情報
- シーン毎: 雲量
- 画素毎: 雲フラグ、品質フラグ



L8 OLI 白: 雲、黄: 上層雲、
青: 雪氷



MODIS/LST 黒: 良品質、空色: 劣品質、橙: 雲

ASTER 地表面反射率プロダクトの改良

ASTER 標準プロダクト: 1994年規定

- 1A: raw
 - 1B: 放射量補正、幾何補正済み衛星観測輝度
 - * 2A03: 相対地表面反射率(無相関ストレッチ)
 - * 2B05: 絶対地表面反射率(大気補正済み、地形効果補正なし)
エアロソル: MODIS/MISR、大気プロファイル: MODIS
 - ∴
 - 3A01: 相対DEM + 放射量補正済み衛星観測輝度(オルソ投影)

絶対反射率プロダクトの問題点

- 地形効果補正がない
- QA (Quality Assurance) 情報が poor

標準プロダクトの改訂: **AIST ASTER** 処理サーバ

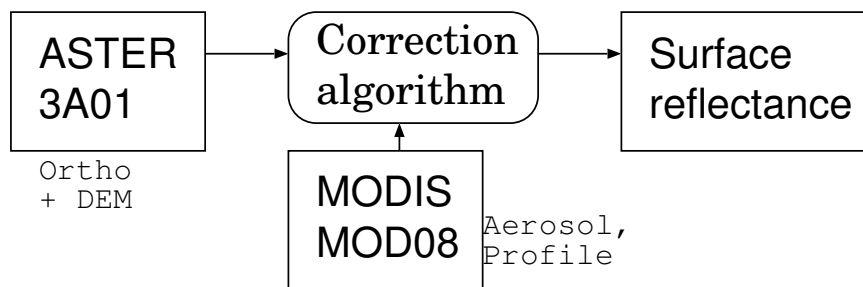
標準プロダクトの問題点を解消するため設置

- 東アジア地域衛星 DEM DB
- GEOGRID ASTER データ処理サーバ

↓
3A01 (相対DEM + Ortho sat. radiance) を入力とした ASTER VNIR/SWIR の大気・
地形効果補正アルゴリズムの実装 (森山)

大気・地形効果補正アルゴリズム

- 入力:
 - ASTER Level 3A01(相対DEM+オルソ投影した衛星観測輝度)
 - MODIS 大気プロダクト (MOD08_D3: 1[deg]メッシュ)の大気プロファイル、エアロソル光学的厚さ
- 出力:
 - 地表面分光反射率
- 仮定:
 - 大気プロファイル、エアロソル光学的厚さはASTERシーン内で一定



シーン内の最高/最低標高で放射パラメータをMODTRANで計算し、各画素の標高で内挿して大気補正

大気・地形効果補正アルゴリズム (続)

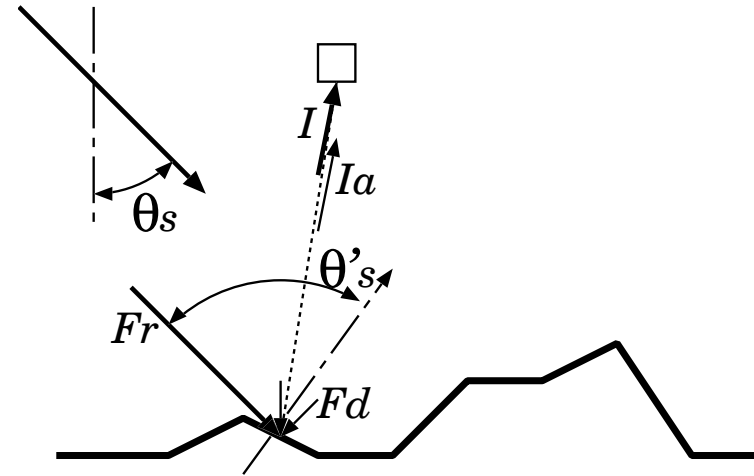
- DEM から各画素での直達放射入射角:
 θ'_s を計算 → 地形効果補正

$$I_s = \begin{cases} [F_r(\theta_s) \cos \theta'_s + F_d(\theta_s)] \frac{\rho}{\pi}, & (\cos \theta'_s > 0) \\ F_d(\theta_s) \frac{\rho}{\pi}, & (\cos \theta'_s \leq 0) \end{cases}$$

$$I = \tau(\theta) I_s + I_a(\theta_s, \theta, \phi_r)$$

$$F_r(\theta_s) = F_0 \tau(\theta_s)$$

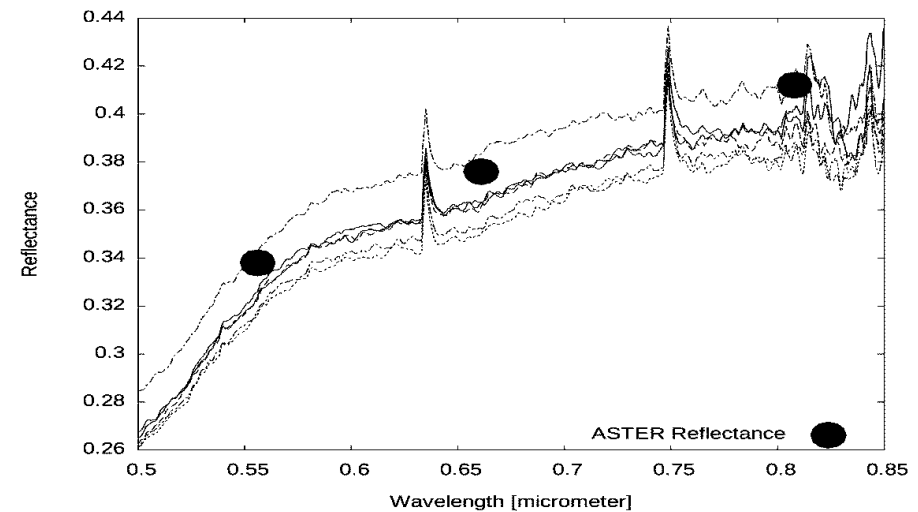
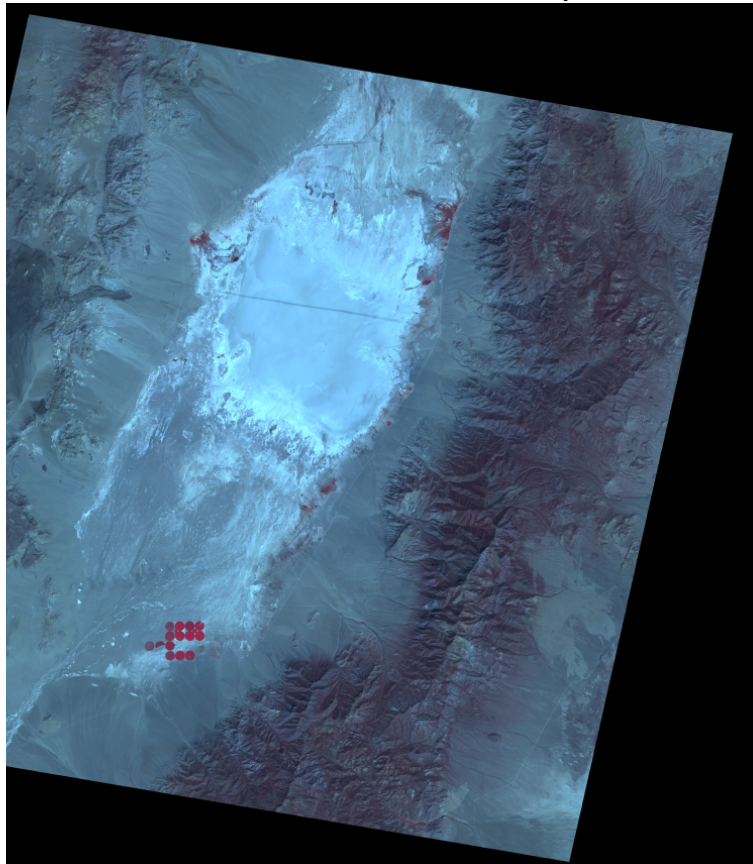
$$\rho = \begin{cases} \frac{\pi[I - I_a(\theta_s, \theta, \phi_r)]}{\tau(0)[F_r(\theta_s) \cos \theta'_s + F_d(\theta_s)]} & (\cos \theta'_s > 0) \\ \frac{\pi[I - I_a(\theta_s, \theta, \phi_r)]}{F_d(\theta_s) \tau(0)}, & (\cos \theta'_s \leq 0) \end{cases}$$



- 仮定
 - 地形効果は、直達放射の反射でのみ生じる
(拡散放射は斜面傾度によらず一定)
 - 地表はランバート反射面

大気補正処理例

2008/09/21 Railroad valley playa, NV、 $0.55[\mu\text{m}]$ のエアロソル光学的厚さ: 0.083 (AERONET Skyradiometer より)



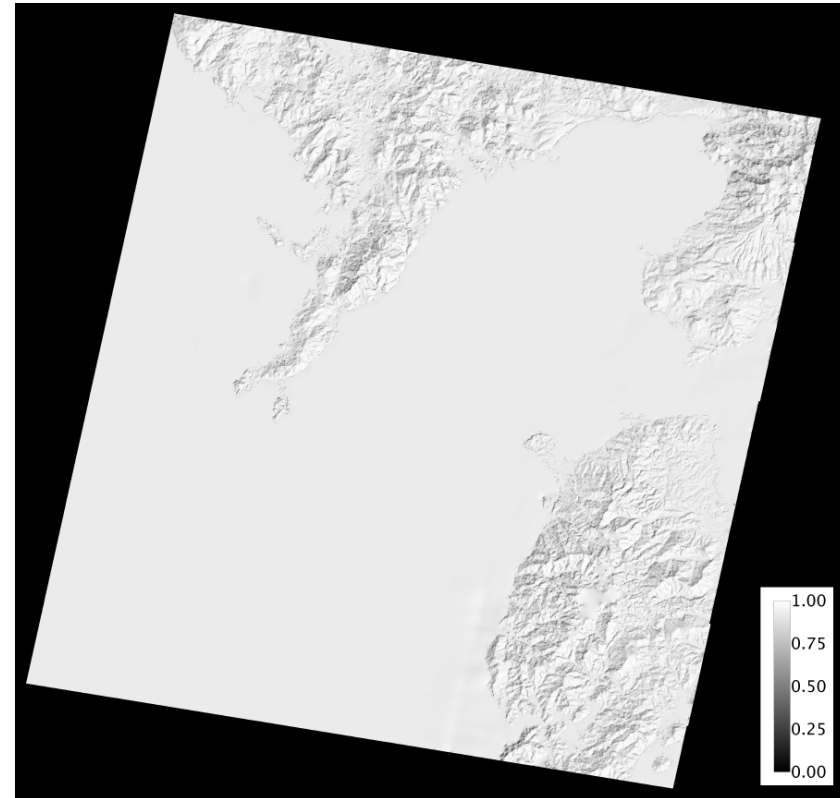
→エアロソル光学的厚さを正しく見積れば、大気補正結果は良好

大気補正処理例 長崎

2003/05/03、太陽天頂角: $22.6[^\circ]$ 、方位角: $135.0[^\circ]$ 、AOT1: 0.207、最低/最高標高:
0/1400[m]

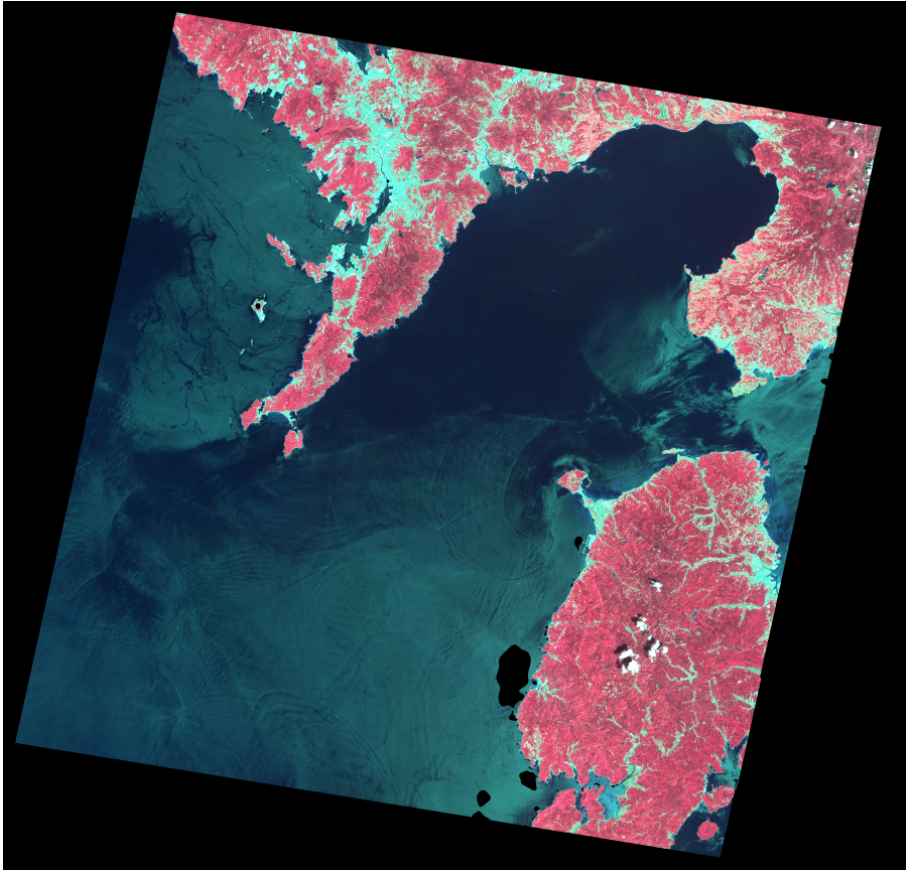


False color composite

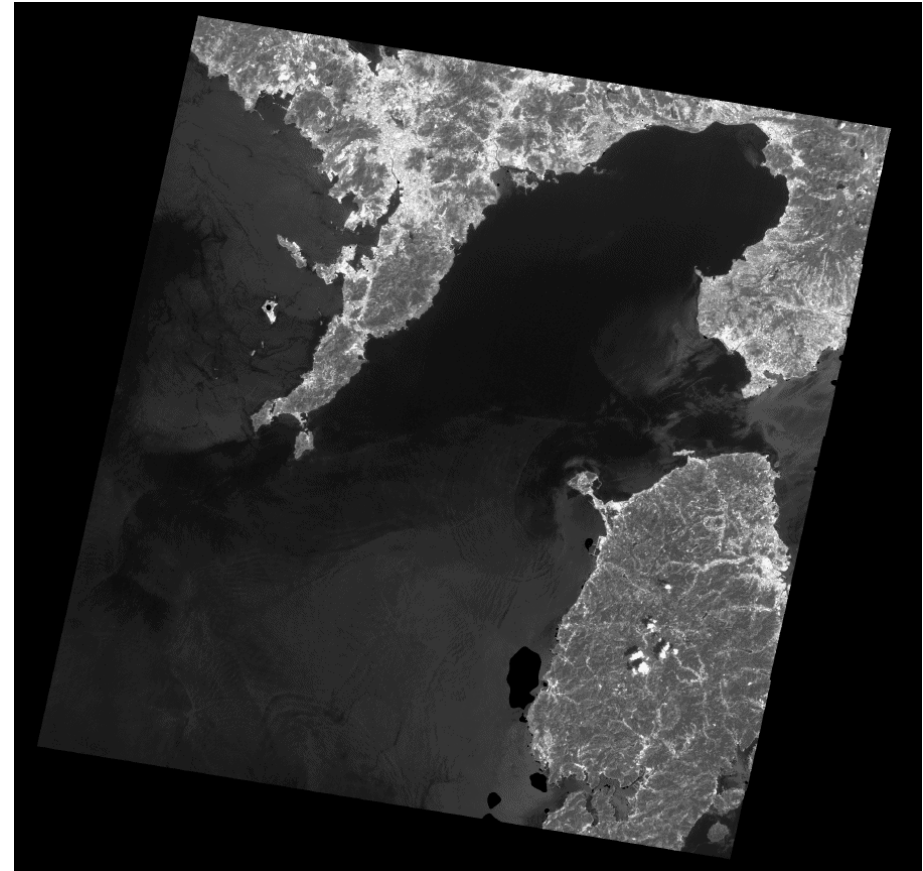


Cosine of incident angle

大気補正処理例 長崎



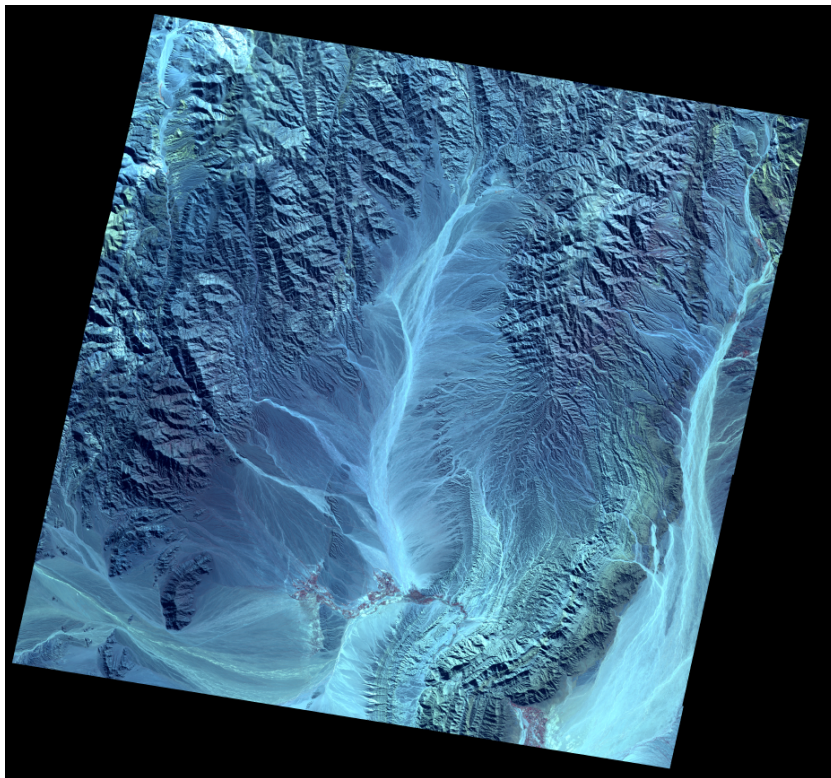
Reflectance false color composite



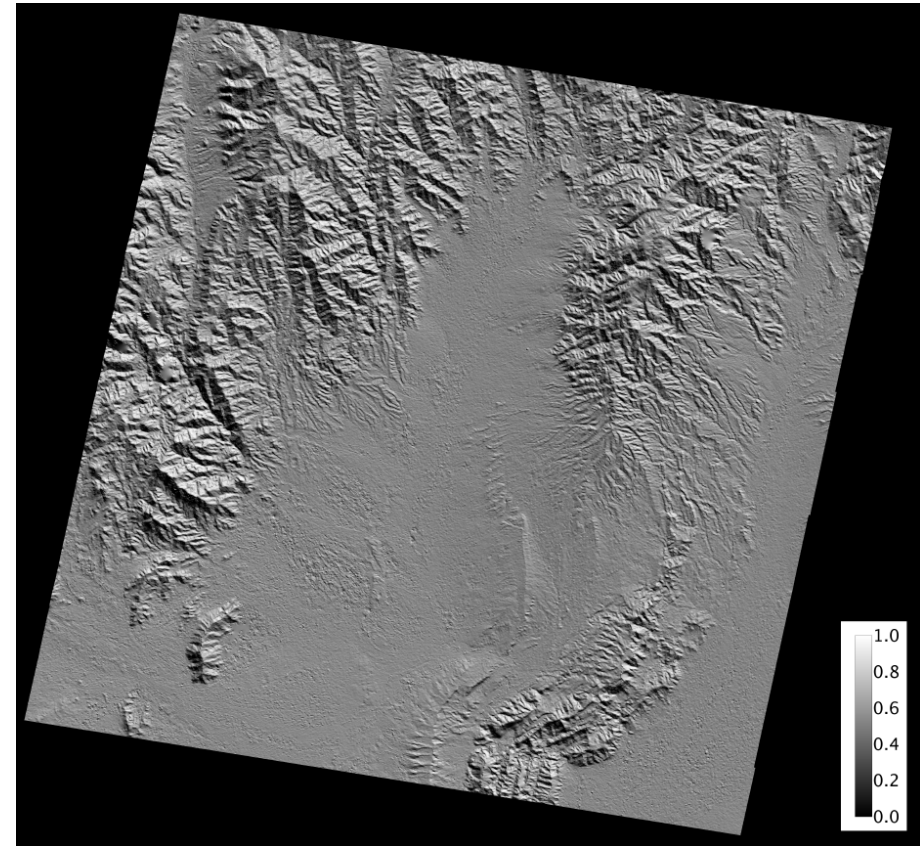
ASTER ch. 7 reflectance

大気補正処理例 アルゼンチン北部

2004/06/30、太陽天頂角: $57.7[^\circ]$ 、方位角: $29.3[^\circ]$ 、AOT1: 0.128、最低/最高標高:
1425/4640[m]

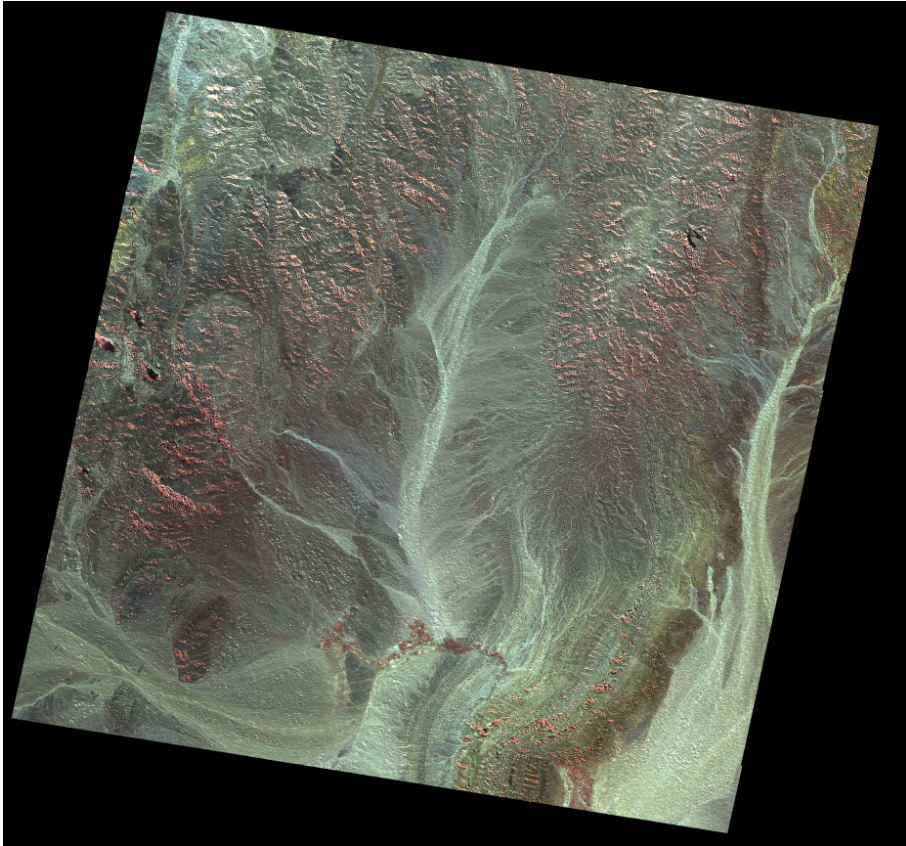


False color composite

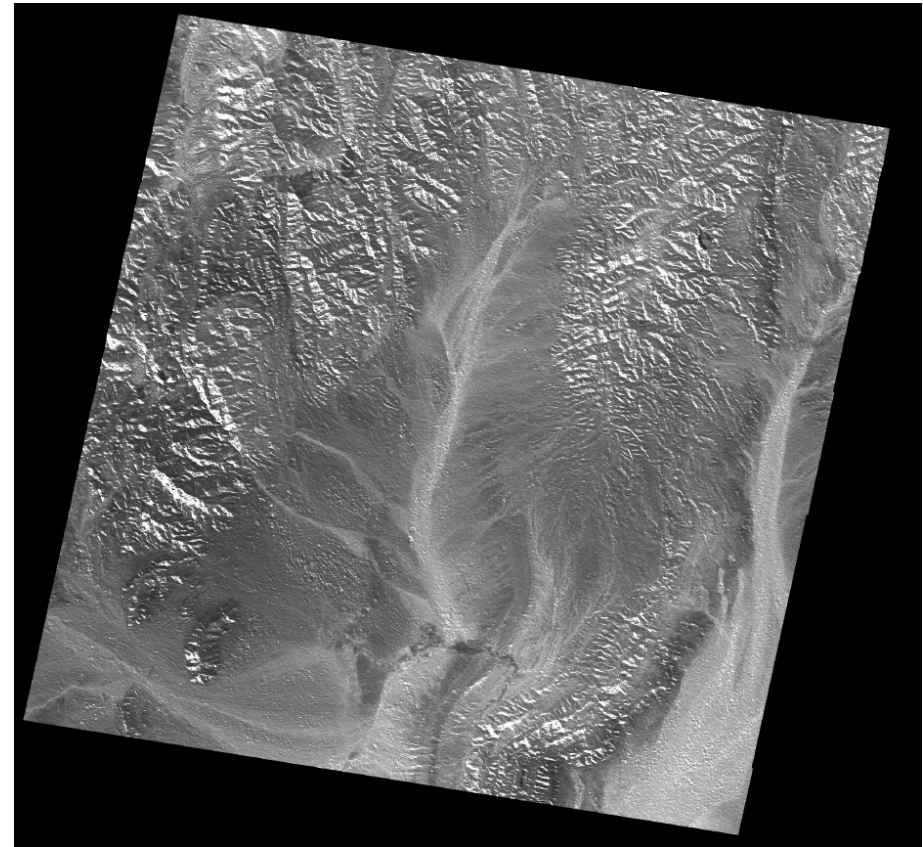


Cosine of incident angle

大気補正処理例 アルゼンチン北部



Reflectance false color composite

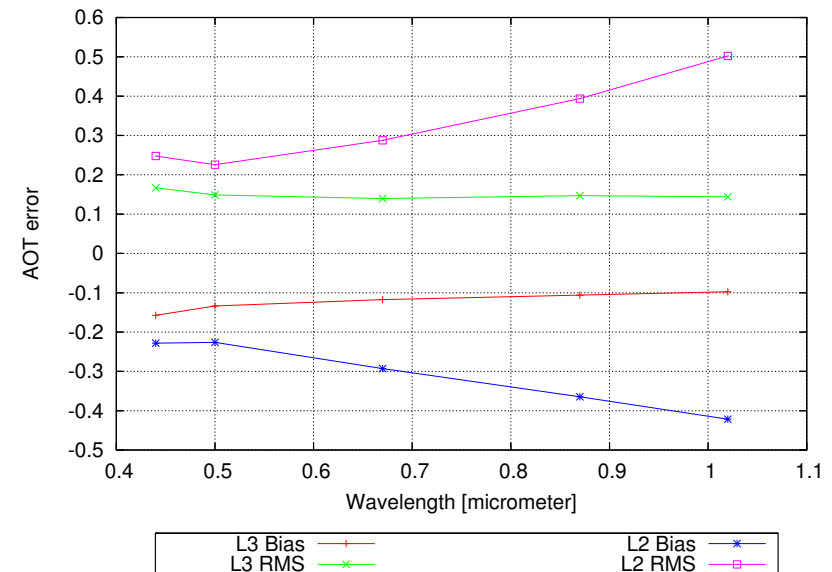


ASTER ch. 7 Reflectance

大気・地形効果補正の誤差要因：大気パラメータ誤差

- MODIS 陸域エアロソル光学的厚さ：
 - 0.47, 0.55, 0.66[μm]でのエアロソル光学的厚さ
 - 可視域、短波長赤外域での地表面反射率の比が、ほぼ一定となる土地被覆が多く存在するという経験的な仮定に基づく
 - 10[km]メッシュのLevel 2プロダクトと、Level 2プロダクトをQA情報で重みつき平均した1[deg.]メッシュのLevel 3プロダクト

AERONET データとの比較 (21×12点)



- MODIS エアロソル光学的厚さは精度が不十分
- 画素単位の大気パラメータ起因のQAは意味を持つのか？

大気・地形効果補正の誤差要因：量子化誤差

- AD変換された衛星観測輝度を整数として記録
- 1LSBに相当する輝度変化より小さいものは再現不可：量子化誤差
- 地形・大気効果補正式：分子 < 分母 → 量子化誤差の増幅

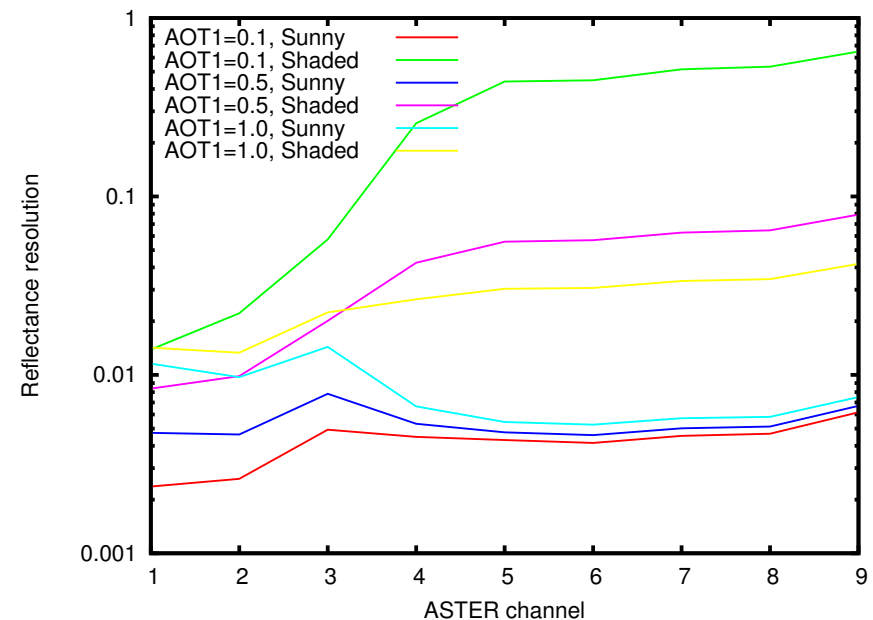
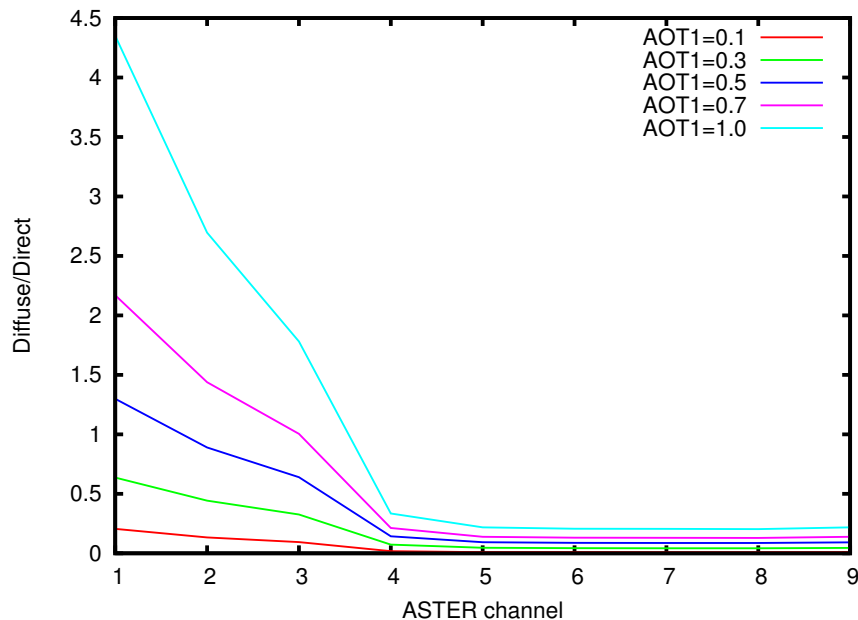
$$\rho = \begin{cases} \frac{\pi[I - I_a(\theta_s, \theta, \phi_r)]}{\tau(0)[F_r(\theta_s) \cos \theta'_s + F_d(\theta_s)]} & (\cos \theta'_s > 0) \\ \frac{\pi[I - I_a(\theta_s, \theta, \phi_r)]}{F_d(\theta_s)\tau(0)}, & (\cos \theta'_s \leq 0) \end{cases}$$

- 観測輝度 1LSB 変動に対する地表面反射率変動 = 反射率分解能: $\Delta\rho$

$$\Delta\rho = \begin{cases} \frac{\pi a}{\tau(0)[F_r(\theta_s) \cos \theta'_s + F_d(\theta_s)]} & (\cos \theta'_s > 0) \\ \frac{\pi a}{F_d(\theta_s)\tau(0)}, & (\cos \theta'_s \leq 0) \end{cases}, a : \text{gain}(I = a \cdot DN)$$

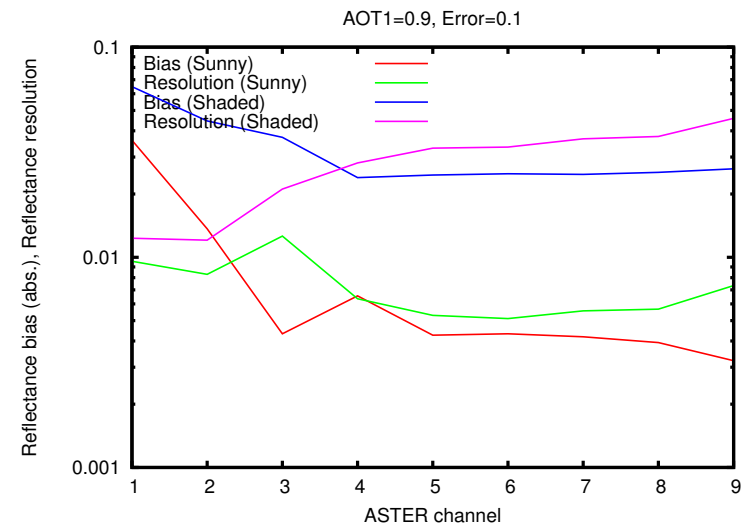
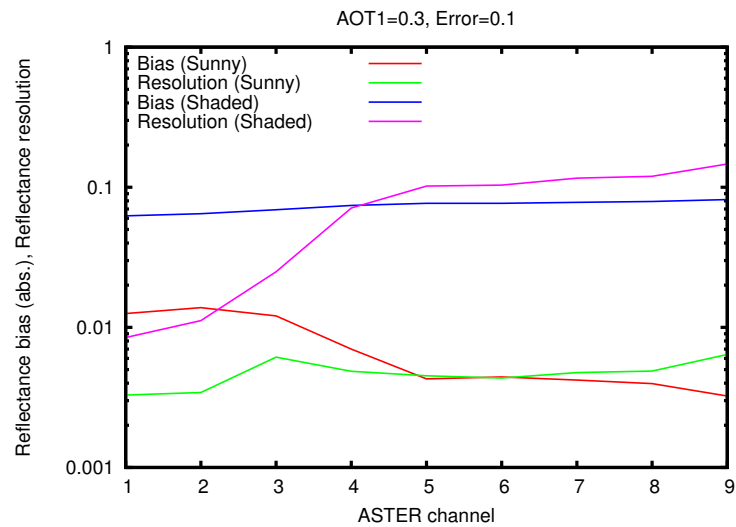
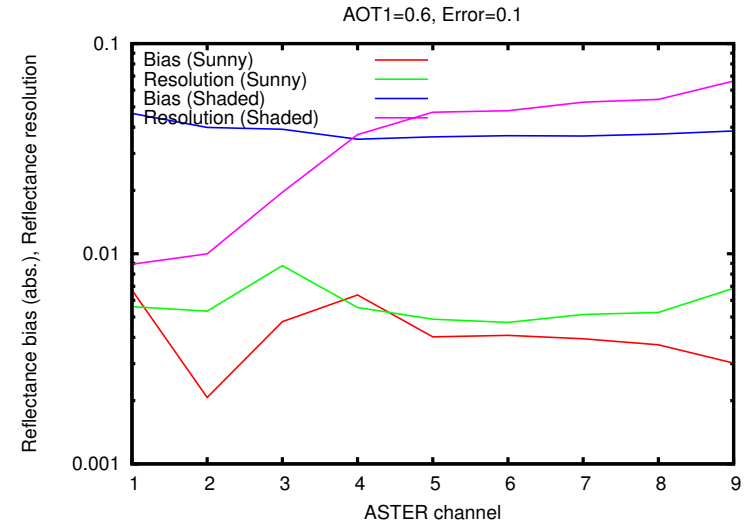
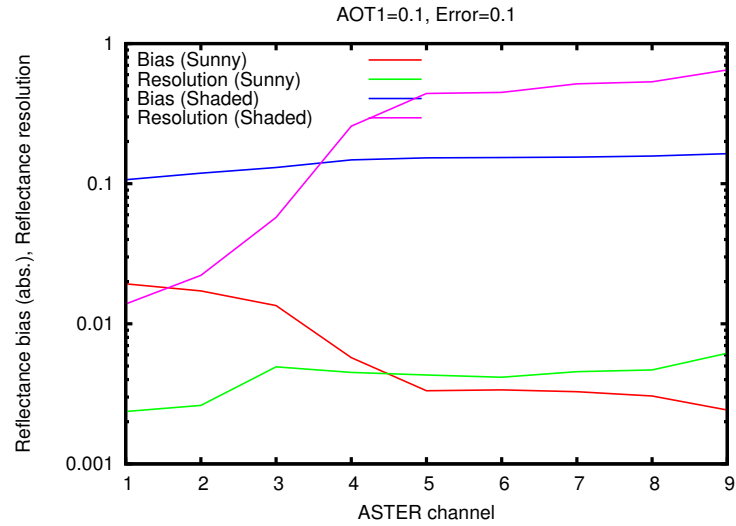
反射率分解能へ影響を与えるもの：直達拡散照度比

計算条件：水平面においてUS標準大気、太陽天頂角 45° で、ASTER ch. 1のエアロソール光学的厚さ(AOT1)を0.1–1.0まで変動



→ 拡散日射の小さい場合 (SWIR帯、清浄大気) は、日陰の反射率推定が困難

大気補正誤差と反射率分解能の比較: $\Delta AOT1 = +0.1$



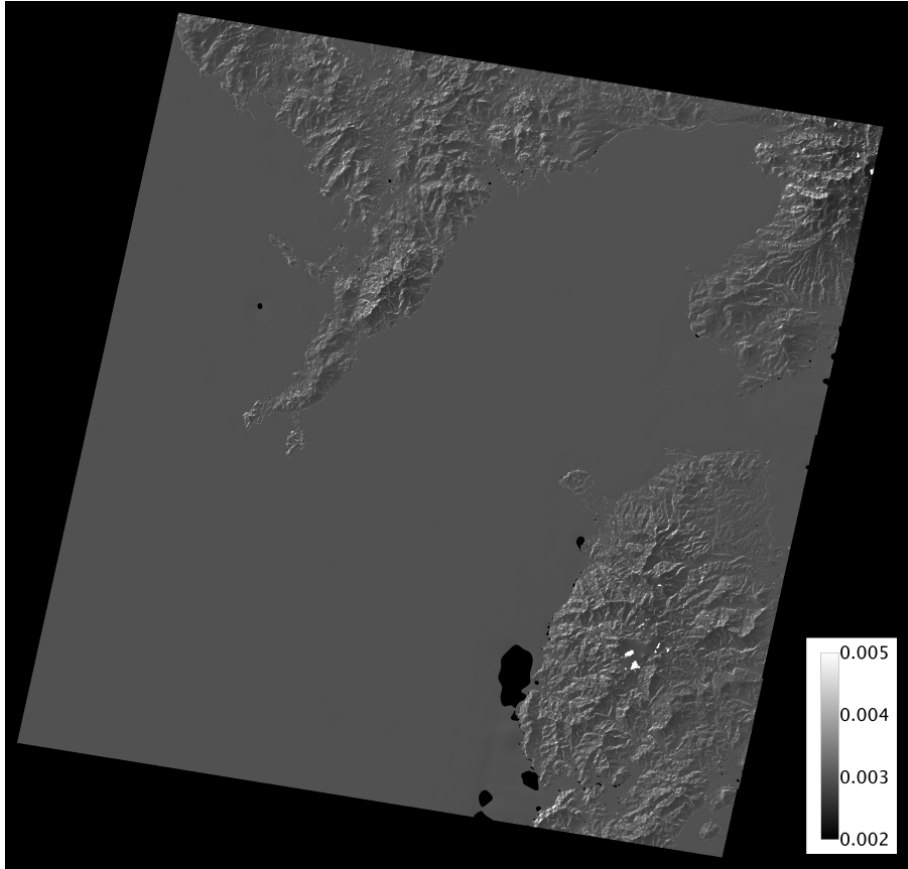
新しいQA情報

- MODISエアロソル光学的厚さ (AOT) が若干精度不足
- 地表起伏による拡散直達照度の変動による反射率分解能変動が大気起因誤差よりも大きい

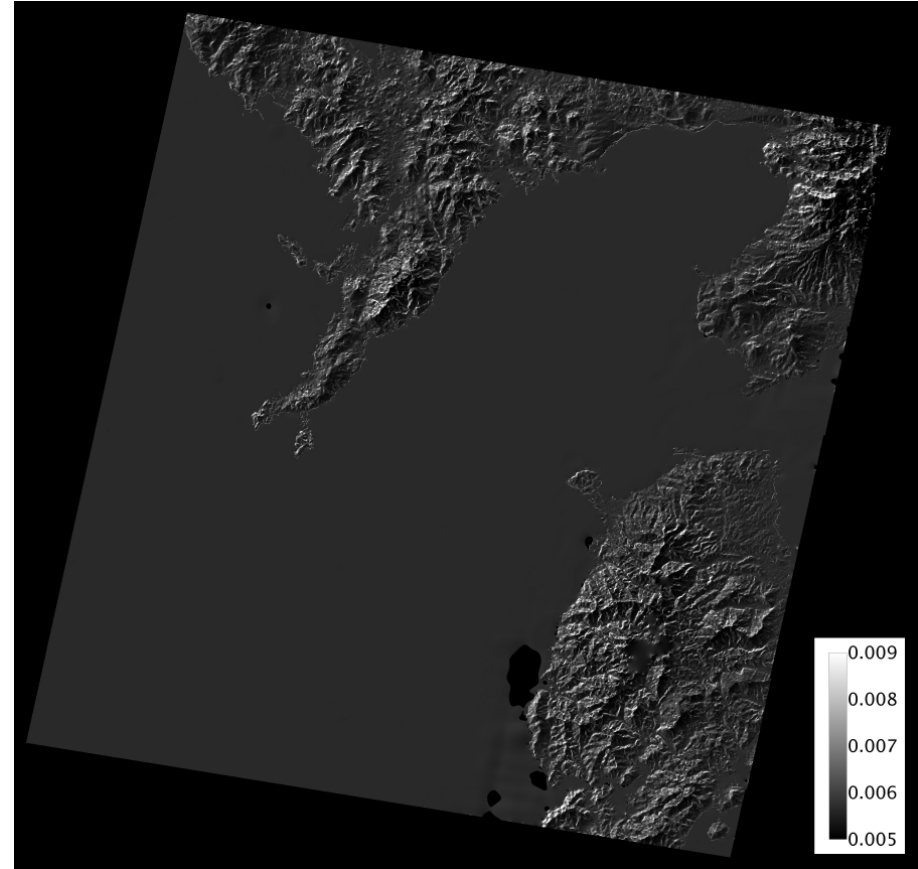


- シーン単位 QA: 平面での反射率分解能 (日射面、日陰面)
- 画素単位 QA: 当該画素での反射率分解能

反射率分解能例 長崎

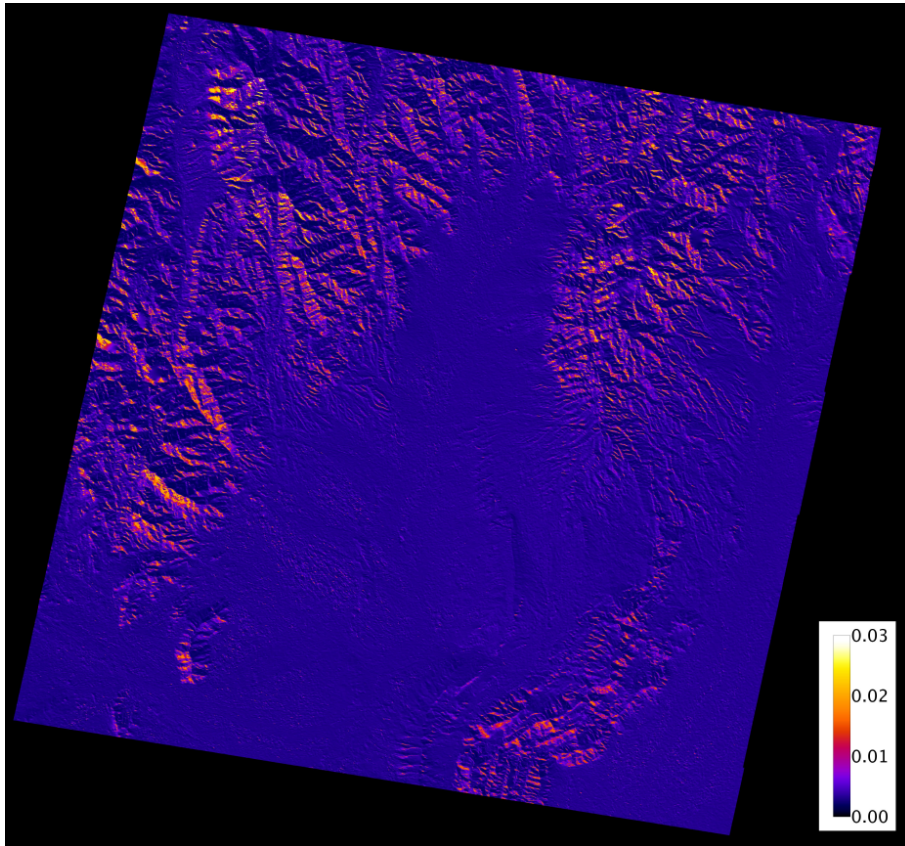


ASTER ch. 1

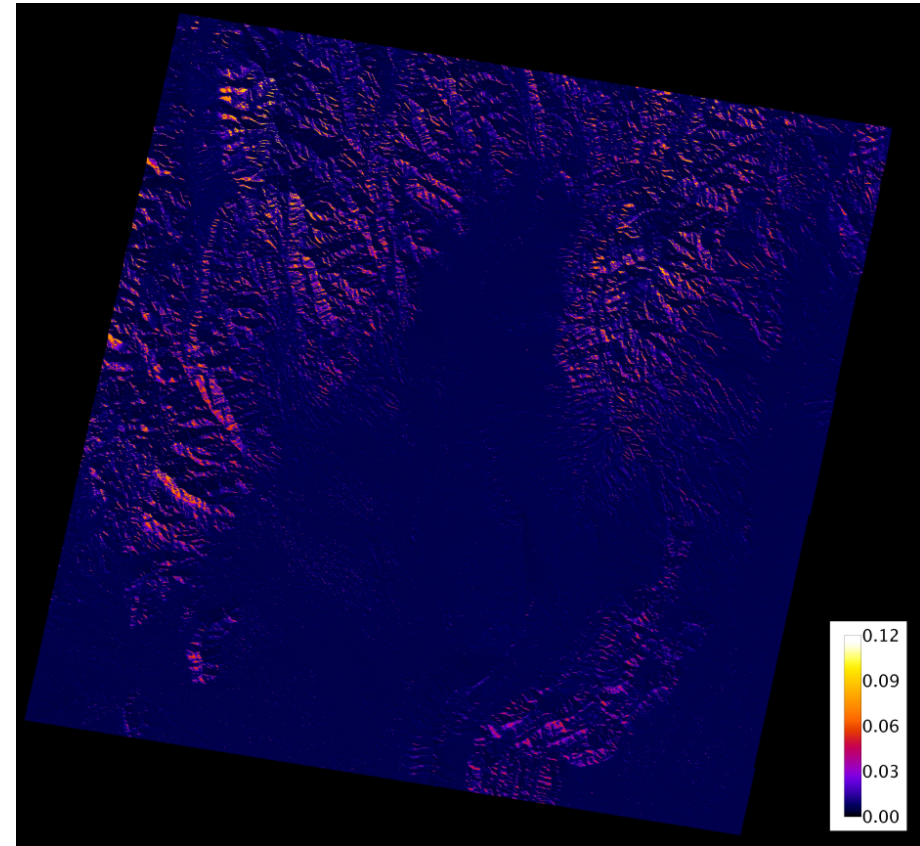


ASTER ch. 3

反射率分解能例 アルゼンチン北部

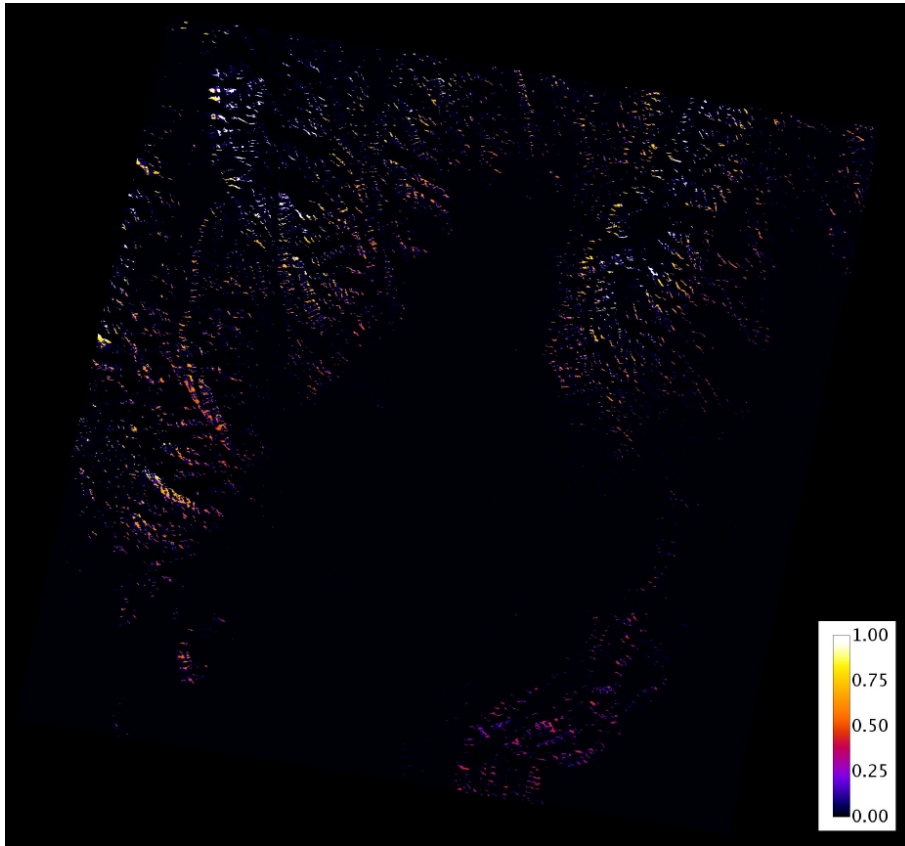


ASTER ch. 1

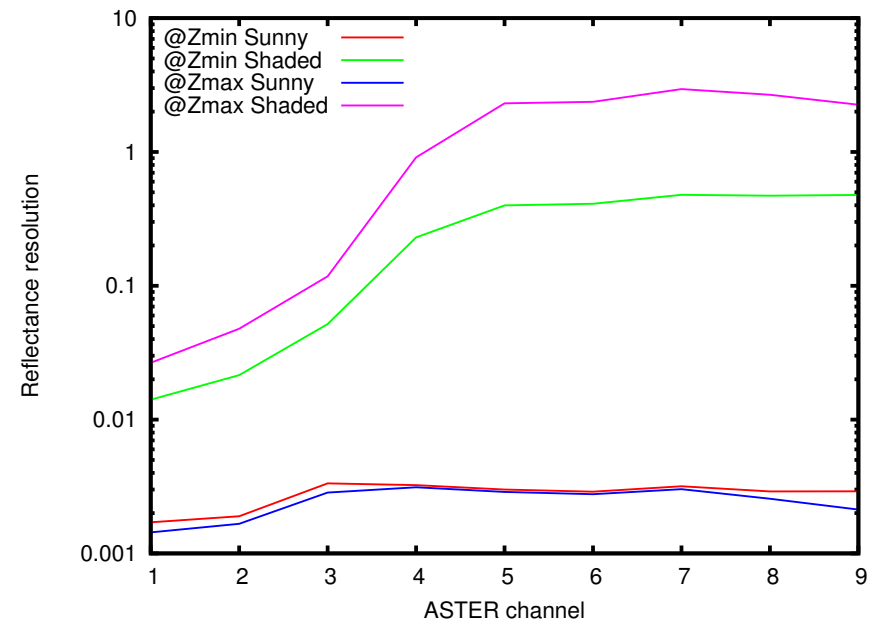


ASTER ch. 3

反射率分解能例 アルゼンチン北部



ASTER ch. 7



Reflectance resolution

新しいASTER地表面反射率を入手するには？

AIST/GEOGRIDに共同研究申請してください。

The screenshot shows the GEO Grid website interface. At the top, there's a navigation bar with 'HOME', 'GEO Gridとは', and 'お問い合わせ'. Below that is a 'NEWS' section with a 'NEWS履歴' button. The main content area displays several news items:

- Mar. 29, 2013**: GEO Gridデータ (ASTERデータ、PALSARデータ)の利用について。この度、GEO Grid連携会議、データ利用連携調整WGにおいて、研究目的を利用とした研究利用申請の申し込みを見直します。今後は財団法人宇宙システム開発利用推進機構(JSS)若しくは産総研メンバーが共同研究者として参画する研究利用申請について審議を行います。なお、現ユーザにつきましてはプロポーザルの有効期限まで、ただし、有効期限が2014年3月末以降の場合は、来年2014年の3月末まで、検索システムの利用を可能とします。一部ユーザにつきましては、プロポーザルの期限が2014年3月以降の方もおられますが、何分ご了承願います。また、産総研にアーカイブしていないPALSARデータについて今後発注ができなくなりました。現在、産総研で未アーカイブのデータについては順次JSSより転送を行っておりますので、ご了承ください。ご不明の点がありましたら [geogrid_yo-ml at ais1.go.jp](mailto:geogrid_yo-ml@ais1.go.jp) までお問い合わせください。
- Nov. 22-24, 2012**: 豪州西オーストラリア州において、HISUI(衛星ハイパーマルチスペクトルセンサ)の代替校正を模擬した実験を、豪州連邦科学産業研究機構(CSIRO)と共同で実施しました。2013年2月14日にABC(The Australian Broadcasting Commission's) テレビ放映予定です。
- Oct. 29, 2012**: 科学誌「Nature Geoscience」に「[Compositional evidence for an impact origin of the Moon's Procellarum basin](#)」著者 中村良介,石原吉明 他が掲載されました。
- Oct. 25, 2012**: GEO Grid成果報告会2012は盛況の裡に終了いたしました。

On the right side, there's a 'PICK UP' section listing various symposiums and reports:

- GEO Grid成果報告会2012**: アジェンダ
- GEO Grid成果報告会2011**: アジェンダ, ポスター-1, ポスター-2, ポスター - 一覧, プレゼンテーション
- GEO Grid成果報告会2010**: アジェンダ, プレゼンテーション1, プレゼンテーション2
- GEO Grid成果報告会2008**: アジェンダ, プレゼンテーション - 一覧, プレゼンテーション1, プレゼンテーション2, プレゼンテーション3, プレゼンテーション4.1, プレゼンテーション4.2, プレゼンテーション5

At the bottom right, there's a '関連リンク' (Related Links) section.

相対反射率

絶対値は合っていないが、波長方向の変動特性が実際の地表面反射率と合っている

相対反射率の意義

1. 明るさの情報を排除して、スペクトル情報の強調: 太陽幾何変動、地形効果の抑制
2. 大気効果の変動を抑制

推定手法

1. 無相関ストレッチ
2. Log residual
3. 正規化反射率: 大気データ無しでも大気効果抑制効果あり

正規化反射率の定義

- 衛星観測輝度: $I_i = \tau_i(\theta)[F_{ri} \cos \theta_s + F_{di}] \frac{\rho_i}{\pi} + I_{ai}$
 - 透過率: τ 、パ斯拉ジアンズ: I_a 、地表面反射率: ρ
 - 観測角: θ 、太陽天頂角: θ_s
 - 拡散日射: F_d 、直達日射: $F_{ri} = \tau_i(\theta_s)F_{0i}$ 、地球外太陽照度: F_0
- TOA 反射率: $\rho'_i = \frac{\pi I_i}{F_{0i}} = a_i \rho_i + b_i$
 - $a_i = \tau_i(\theta)[\tau_i(\theta_s) \cos \theta_s + \frac{F_{di}}{F_{0i}}]$, $b_i = \frac{\pi I_{ai}}{F_{0i}}$
- 正規化反射率: $r_i = \frac{\rho'_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho'_i}$

正規化反射率の地形効果、大気効果抑制

- 仮定1: 加法性因子(拡散日射、パ斯拉ジアンズ)が無視できる

$$\text{正規化反射率: } r_i \simeq \frac{\tau_i(\theta)\tau_i(\theta_s) \cos \theta'_s \rho_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i(\theta)\tau_i(\theta_s) \cos \theta'_s \rho_i} = \frac{\tau_i(\theta)\tau_i(\theta_s) \rho_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i(\theta)\tau_i(\theta_s) \rho_i}$$

⇒ 地形効果抑制

- 仮定2: $\sum_{i=1}^n \tau_i(\theta)\tau_i(\theta_s) \rho_i \simeq \overline{\tau(\theta)} \overline{\tau(\theta_s)} \bar{\rho}$, $C_i = \frac{\tau_i(\theta)\tau_i(\theta_s)}{\overline{\tau(\theta)} \overline{\tau(\theta_s)}}$

⇒ $r_i = C_i \rho_i$: 大気効果抑制

- 実現に向けての問題点: 前処理をどのように構築するか?
 - 仮定1の実現が大気データ無しでは困難
 - 日陰の処理

ASTER向け前処理

- 入力: 3A01 (DEM + Ortho.)
- 大気状態: US標準大気のもとで地上視程100[km]として、光学的厚さ、パスラジアンズ、拡散日射を計算
- DEMによる日向日陰分離
- 前処理

– 日向: 加法性因子除去

$$\rho'_i \leftarrow (\rho'_i - b_i)(1 - \tau_i(\theta)\tau_i(\theta_s))\frac{F_{di}}{F_{0i}}$$

– 日陰: パスラジアンズ除去 + スペクトルコントラスト補正

$$\rho'_i \leftarrow (\rho'_i - b_i)\frac{\tau_i(\theta_s)}{F_{di}/F_{0i}}$$

どの程度抑制できるか?

下記のシミュレーション条件で、MODTRAN3.7により衛星観測輝度を計算し、正規化反射率を求め、波長毎に変動係数を計算

地表面反射率: conifer

大気モデル: MODTRAN 3.7に内蔵された6種

地上視程: 5, 23 [km]

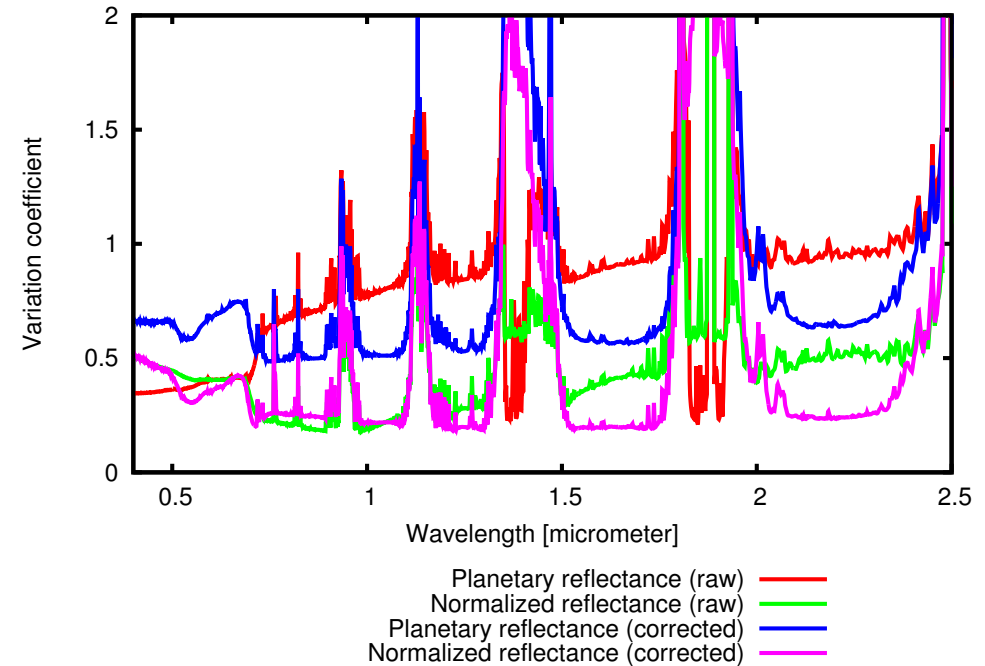
太陽天頂角: 0, 20, 40, 60, 80 [deg.]

観測天頂角: 0, 10, 20, 30, 40 [deg.]

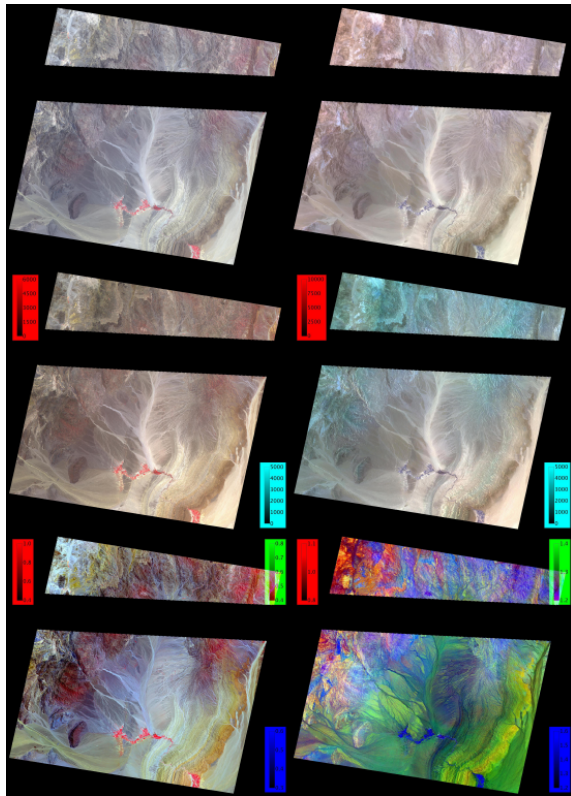
相対方位角: 0, 180 [deg.]

直達日射: 有り (日向), 無し (日陰)

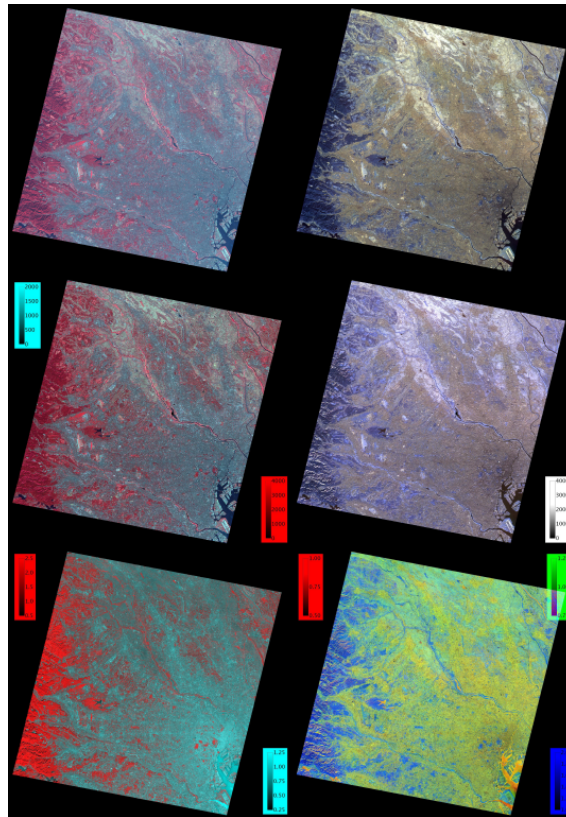
帯域: 0.4–2.5[μm], 0.001[μm] 刻



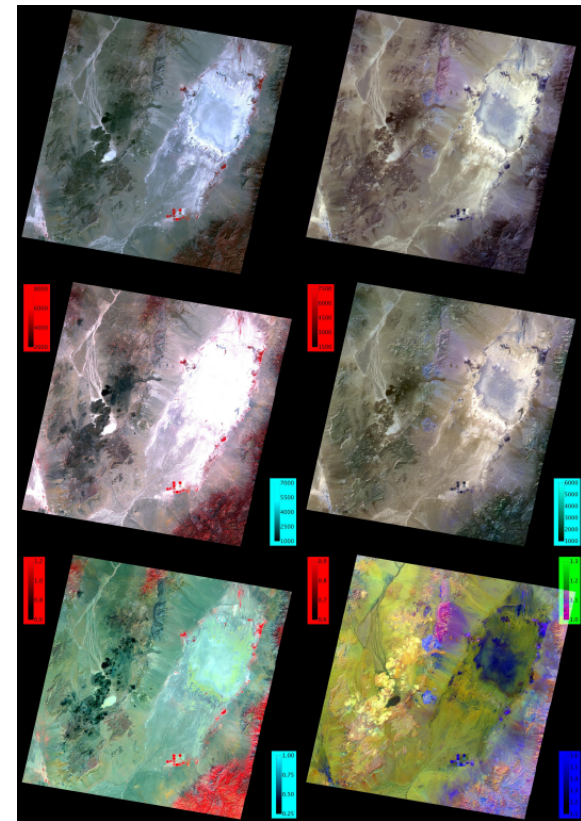
データ処理例 (基データ, 大気補正済み反射率、正規化反射率)



2000 12/28 アルゼンチン
北部



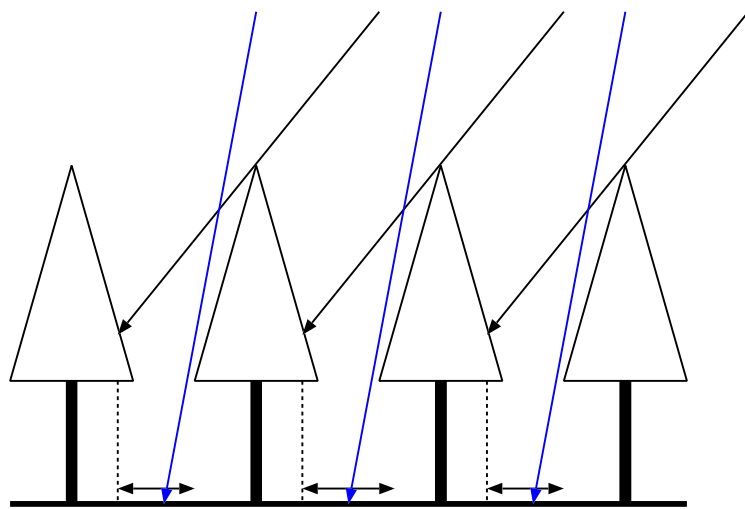
2003 11/17 関東西部



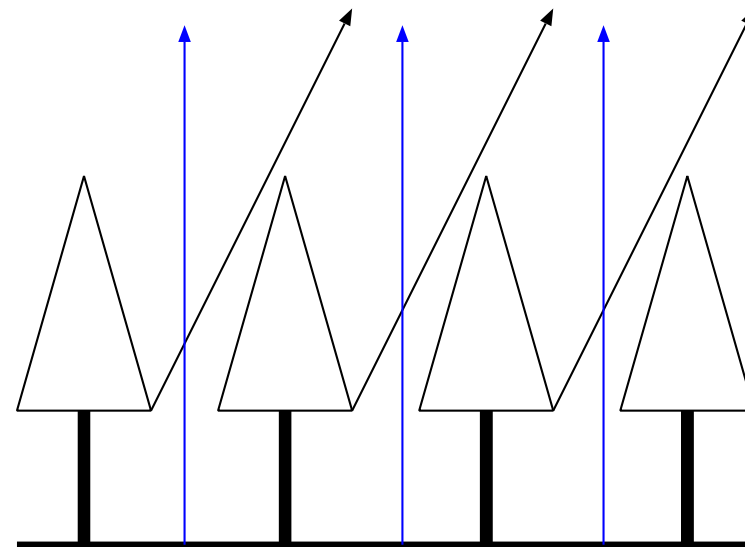
2005 8/28 Railroad valley
playa, NV

リモートセンシングにおけるBRDF: 全くの私見

- BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function: 入射角と反射角によって反射輝度が異なる場合の反射率を一般化したもの。
- CG: 光沢の表現に利用される。
- リモートセンシング: 1画素が大きい: Mixel、3次元構造
 - 入射方向によって影のでき方が異なる。
 - 観測(反射)方向によって視野内の被覆が異なる。



太陽幾何の違い



観測幾何の違い

BRDFの活用: 多方向観測

- AVHRR, MODISのオーバラップ領域で確認され、MODISでは8日コンポジットでBRDF補正済み反射率プロダクトを作成している。
- MISRは進行方向前後に9本の光学系を配置し(同一点を9方向から観測し)、パス毎にBRDF補正反射率プロダクトを作成している。
- 2015年にうち上げが予定されているGCOM-C1/SGLIでは、進行方向前後に3本の光学系を配置し、植生の垂直構造を推定するプロダクトを予定している。

評価・標準化研究会の皆様へのお願い

1. 高次プロダクトの利用推進のお手伝いをお願いいたします。(Landsat 8は高次プロダクトを作成する予定だそうです)
2. QA情報の積極活用を推進してください。
3. 地表面の絶対反射率は何に使うのでしょうか？(30年来の疑問、太陽幾何、観測幾何、大気状態に鈍感な相対反射率でいいんじゃないだろうか?)