

# 衛星イメージャーデータを用いたエアロゾル 光学特性導出アルゴリズムの開発

JAXA-東大G  
橋本真喜子(JAXA)  
日暮明子(NIES)  
竹中栄晶(JAXA)  
Shi Chong (JAXA)  
中島映至(JAXA)

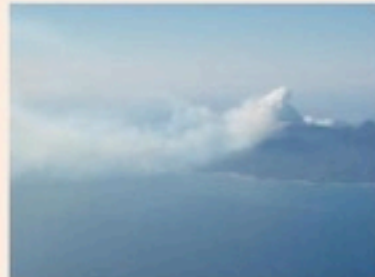
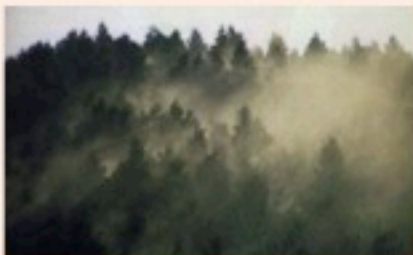
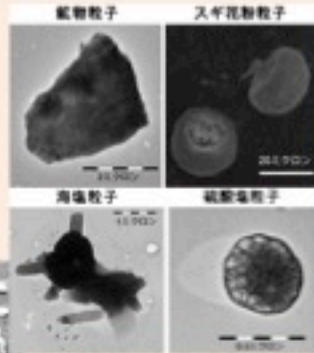
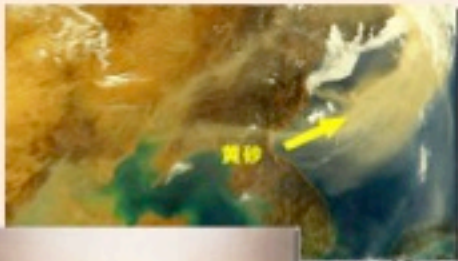
# エアロゾル粒子とは？

- 気体中に浮遊している液体あるいは個体の粒子(直径 $10^{-3}$ ~ $10\mu\text{m}$ ).  
その系→エアロゾル

## 自然起源

- 黄砂、海塩、火山噴火粒子など

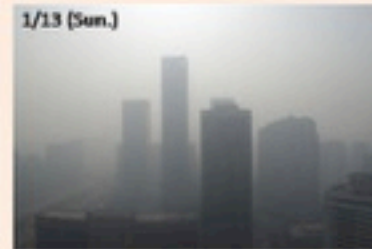
MODIS画像(2001/3/20)(環境省HP)



火山ガスを大量に含む噴煙 (三宅島 2002年1月)

## 人為起源

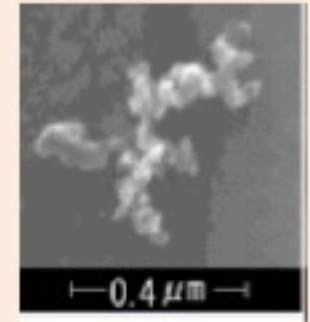
- PM2.5のような微小粒子、すすなど  
→排ガス(発電・工場・自動車など)  
→発生源:主に都市域



北京



九州大学 応用力学研究所



# 大気(気候・気象)への影響

## 直接効果

- 放射を散乱・吸収して放射収支に影響を与える→**地表に届く太陽光の減少 & 大気を温める効果**

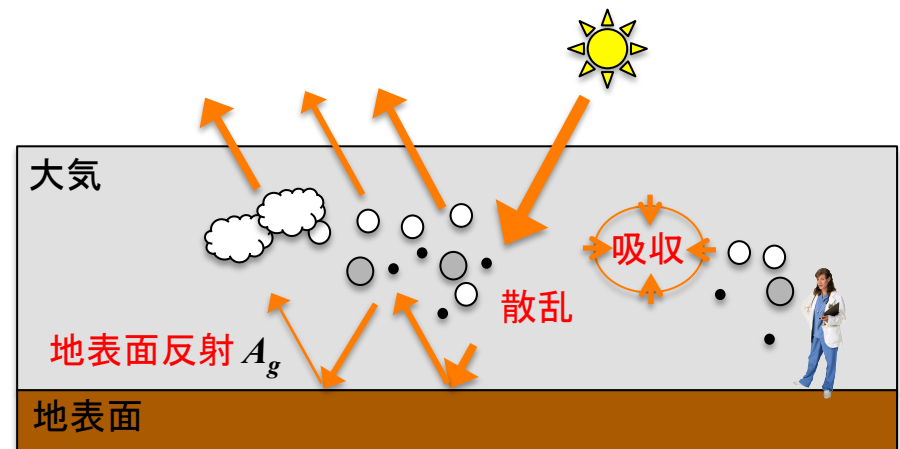
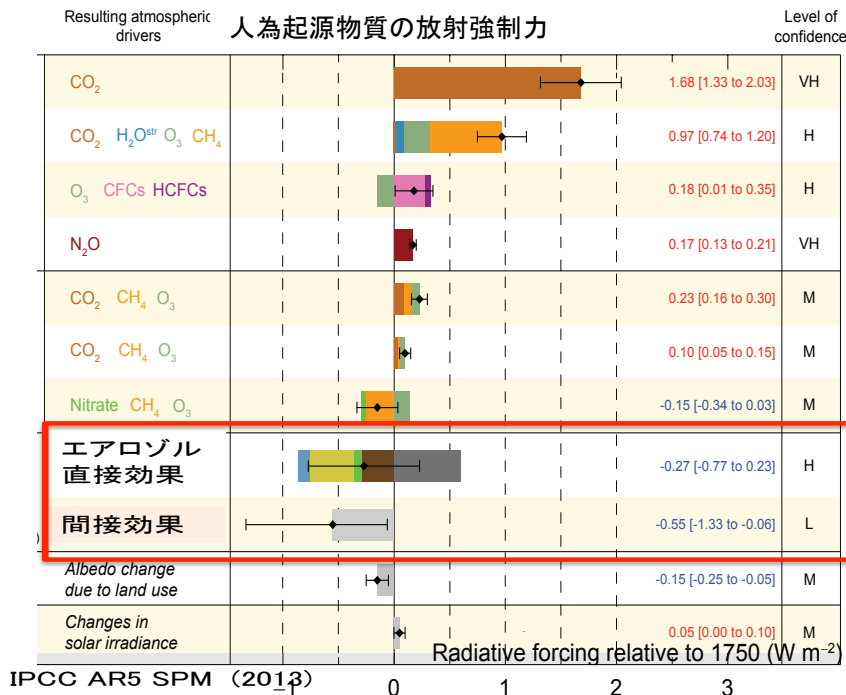
## 間接効果

- 凝結核や氷晶核として作用し雲粒子をつくる→**地表に届く太陽光の減少**

# 健康影響

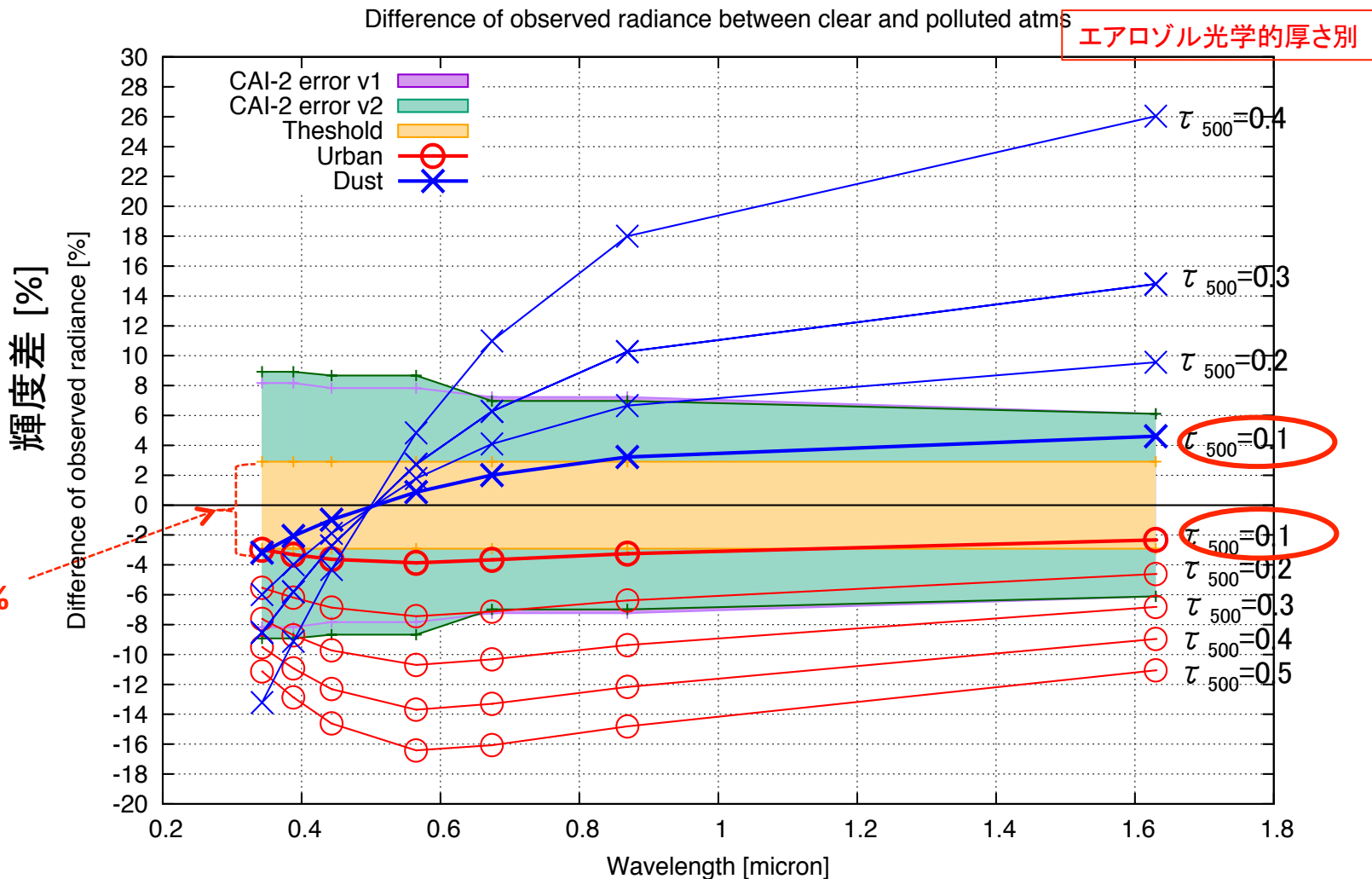
- 大気汚染物質(人為起源)  
→循環器系・呼吸器系疾患の原因  
例:喘息・慢性気管支炎
- 自然起源  
→花粉・黄砂によるアレルギー疾患  
例:鼻炎(花粉症)、喘息など
- 自然起源+人為起源  
→黄砂+大気汚染  
例:アレルギー疾患、喘息など

参考:日本環境衛生センター「PM2.5の基礎知識」等



# エアロゾルによる衛星観測放射輝度への影響

日射推定への影響: エアロゾル量を考慮しないと日射量の推定精度に影響



輝度差: (AOTあり-AOTなし)/(AOTなし)



# エアロゾルを測る “どれくらい浮いているか”

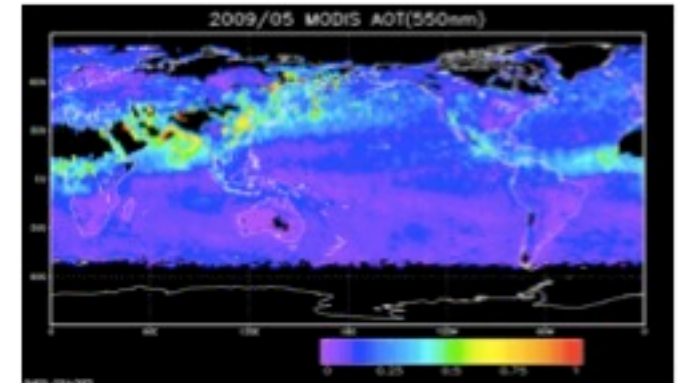
観測手法	現場観測 (航空機／採取)	衛星リモートセンシング	地上リモートセンシング
観測できる物理量等	粒径分布、濃度、光学特性 (SSA) など	濃度、光学特性 (AOT, SSA) 等	粒径分布、光学特性 (AOT, SSA, 屈折率) 等

- 衛星リモートセンシング観測は長期間連して、全球を観測することが可能
- 近年の衛星搭載多波長イメージャーデータ (衛星観測技術の発達)  
→ 高分解能 (数百m~数km)・高感度・多波長  
(Terra・Aqua/MODIS, Terra/MISR, PARASOL/POLDER, GOSAT/CA, GCOM-C/SGLI, EarthCARE/MSI, GOSAT-2/CAI-2...)
- 計算機の発達

→ 人間活動による領域的なエアロゾル特性・分布のより詳細な情報 (都市域) が得られることが期待

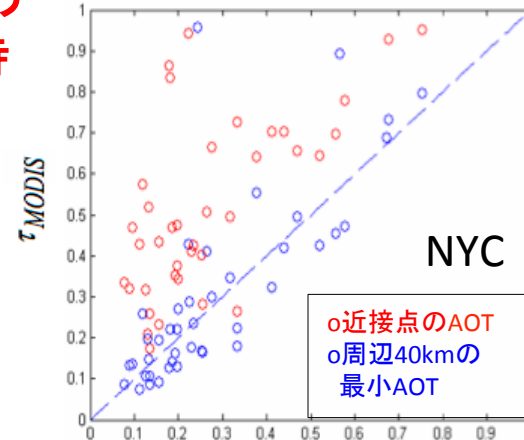
研究目的:

- 都市域等の不均質で複雑な地表面上では、衛星からのAOT, SSAの推定が困難
- 不均質面上でのエアロゾル特性の導出が可能な衛星リモートセンシング手法の開発

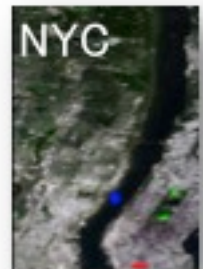


MODIS Dark Target method (<http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/>)  
Remer et al., (2005): Dark target 法

MODISとAERONET AOT比較結果



(Hernandez et al., 2007)  $\tau_{aeronet}$



$$AOT = \tau = C_{sca} + C_{abs}$$

エアロゾル光学的厚さ(エアロゾルの量)

## エアロゾル 衛星リモートセンシング

エアロゾル光学的厚さ(AOT)を全球で長期間・連続的に導出できる

$$SSA = \omega = \frac{C_{sca}}{C_{sca} + C_{abs}}$$

一次散乱アルベド(吸収特性,  $\omega=1$ : 光吸収なし,  $\omega=0$ : 全部吸収)

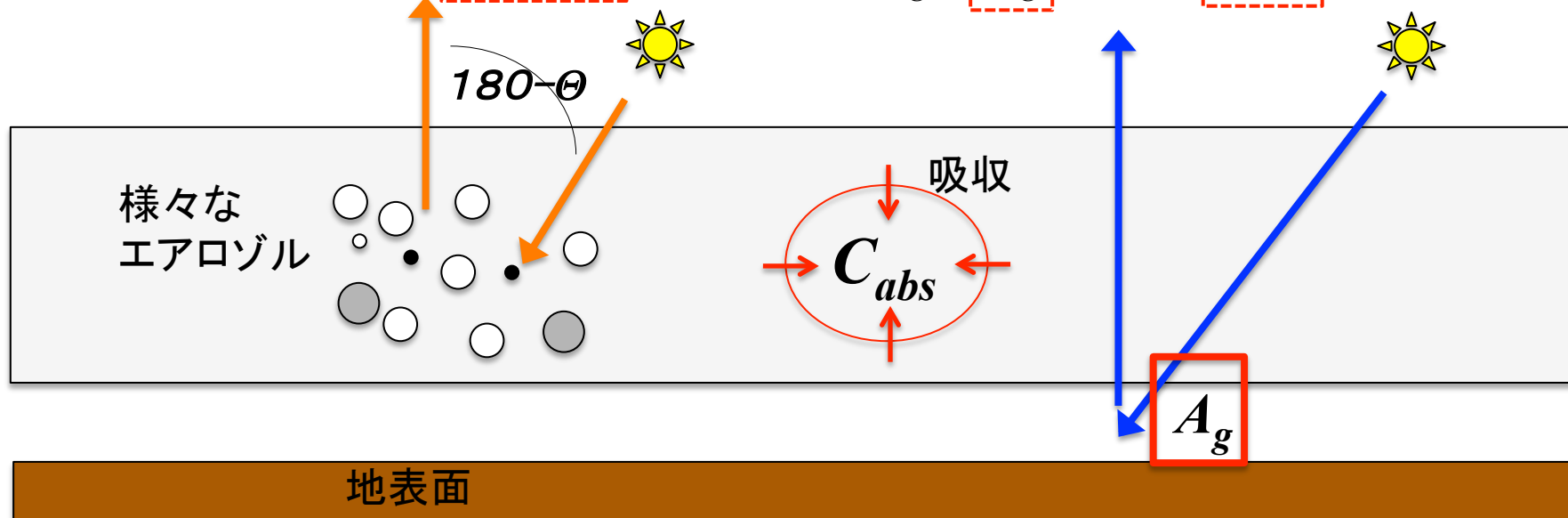


衛星

観測:  $R =$  ① 大気による散乱  $+$  ② 地表面による散乱

$$R_a \sim \pi m m_0 \cdot \omega \cdot AOT \cdot P(\Theta)$$

$$R_g \sim A_g \cdot \exp\{-AOT(m + m_0)\}$$

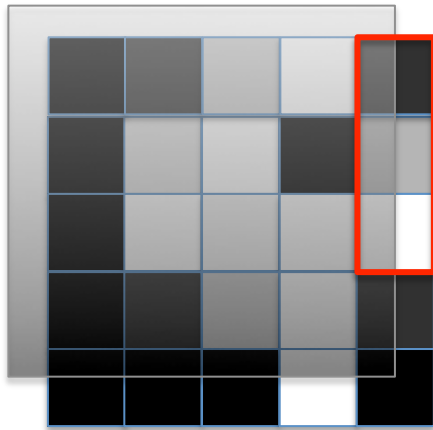


# エアロゾル特性・リトリバル手法(MWP)

## ● MWP = Multi-wavelength and multi-pixel method

Kaufman neutral method : Kaufman (1987), MWP method : Hashimoto (PhD,2014)

- Using several **wavelengths & pixels** data of satellite observation at one retrieval



$$R = R_a + R_g \approx A_g + \tau \cdot [c_1 \cdot \omega P(\Theta) - c_2 \cdot A_g]$$

=0 (Independent of AOT\*)

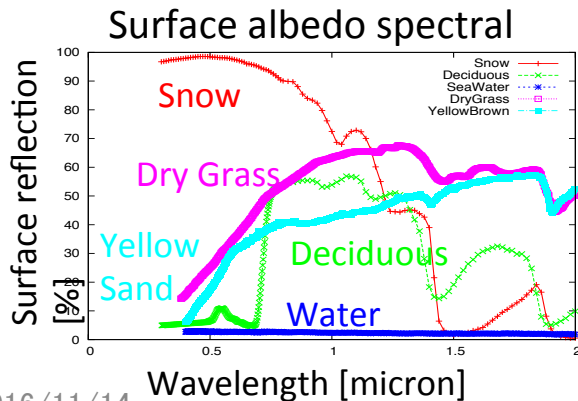
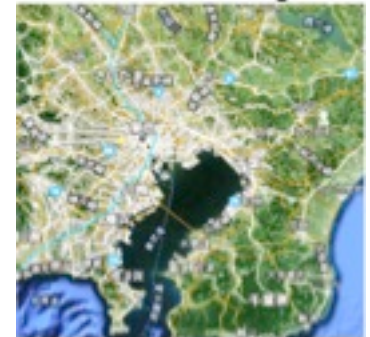
$$\rightarrow R = f(u) + e$$

(R: Reflectance,  $\tau_\lambda$ : AOT,  $\omega_\lambda$  SSA,  $P_\lambda(\Theta)$ : Phase function)

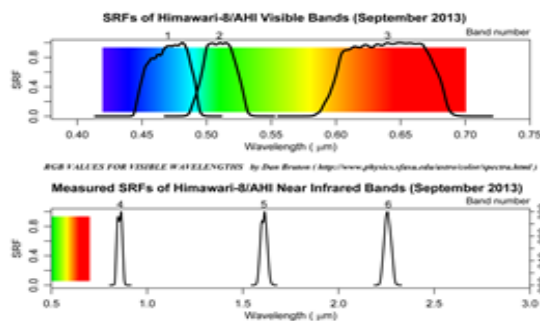
$$R = \{ \{ R \}_\lambda \}_x, \quad u = \{ \tau_{fine}, \tau_{coarse}, \omega, \{ A_g \}_\lambda \}_x$$

$$\lambda = \{ \lambda_i, i = 1, N_{Band} \}, \quad x = \{ x_i, y_j, i = 1, N_{domain}; j = 1, N_{domain} \}$$

Around Tokyo



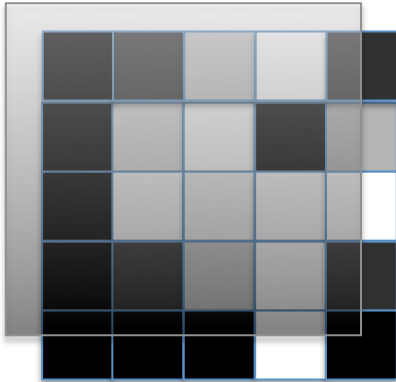
Himawari8 VIS&NIR bands



→ エアロゾルは水平方向に滑らかに分布  
 → 複数のピクセルでエアロゾル光学特性を同時に推定する(AOT, SSA,  $A_g$ ...)

# エアロゾル特性・リトリバル手法 多波長多ピクセル法(MWP)の概要

- 最適化法+ 平滑化拘束条件(水平方向エアロゾル分布)



$$\longrightarrow R = f(u) + e$$

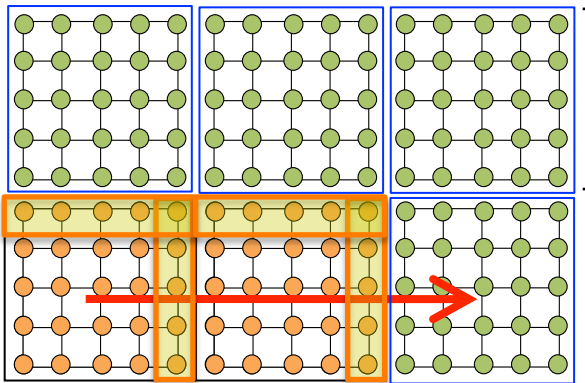
放射伝達計算を直接組み込む  
大雑把な近似計算を避けること  
でAOTとSSAの導出精度が上がる  
ことが期待(式中  $f(x)$ )

$$R = \{\{R\}_\lambda\}_x$$

$$u = \{\tau_{fine}, \tau_{coarse}, \omega, \{A_g\}_\lambda\}_x$$

$$\lambda = \{\lambda_i, i = 1, N_{Band}\} \quad \mathbf{x} = \{x_i, y_j, i = 1, N_{domain}; j = 1, N_{domain}\}$$

5x5 pixels (=sub-domain)  
scanning with smoothing  
constraint



Cost function ( $\phi$ ): Optimal method: Bayes' theorem

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_{MAP} + \phi_{PT} \\ &= [R - f(u)]^T S_e^{-1} [R - f(u)] + (u - u_a)^T S_a^{-1} (u - u_a) + \sum_k \gamma \cdot (A_k + D_k u)^2 \end{aligned}$$

↓  $\nabla \phi = 0$ , Gauss-Newton method etc..

$$\begin{aligned} u_{k+1} &= u_k + [(K_k^T S_e^{-1} K_k + S_a^{-1}) + \sum_k \gamma_k H_k]^{-1} \\ &\quad \times [K_k^T S_e^{-1} (R - f(u)) - S_a^{-1} (u - u_a) - \sum_k \gamma_k (H_k u + D_k^T u_b)] \end{aligned}$$

# GOSAT TANSO-CAI (JAXA/NIES/MOE)

## □ GOSAT(温室効果ガス観測技術衛星, Greenhouse gases Observing SATellite)

- 約100分で地球を一周
- 3日間で同じ軌道に戻る

## □ 搭載センサ:

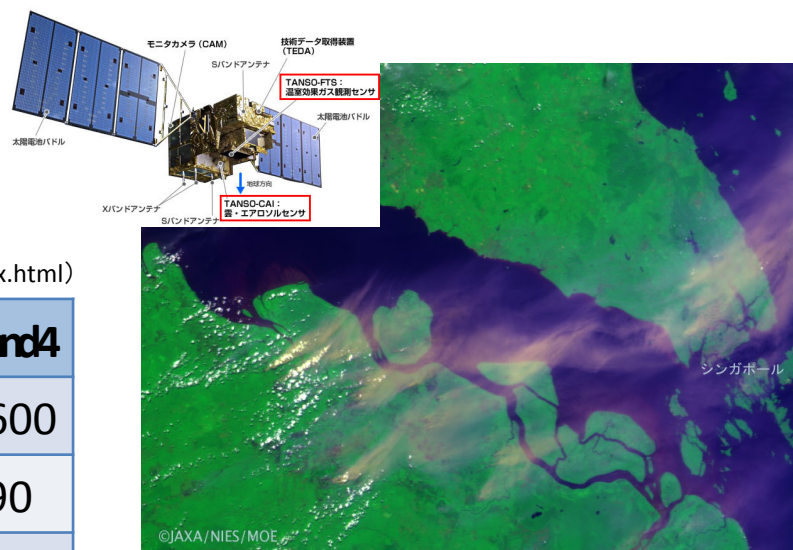
- TANSO-FTS (温室効果ガス観測センサ)  
フーリエ分光器による遠赤外線スペクトル観測
- **TANSO-CAI (雲・エアロゾルセンサ)**  
大気と地表面の状態を昼間に画像として観測

## 雲・エアロゾルセンサ(CAI)の仕様 (<http://www.gosat.nies.go.jp/index.html>)

	Band1	Band2	Band3	Band4
中心波長[nm]	380	674	870	1600
バンド幅[nm]	20	20	20	90
観測幅[km]	1000	1000	1000	750
衛星直下空間分解能[km]	0.5	0.5	0.5	1.5

## GOSATの観測軌道 (<http://www.gosat.nies.go.jp/index.html>)

軌道の種類	太陽同期準回帰軌道
軌道高度	666 km
軌道傾斜角	98.05度
降交点通過地方太陽時	13時±15分
打ち上げ	2009年1月23日



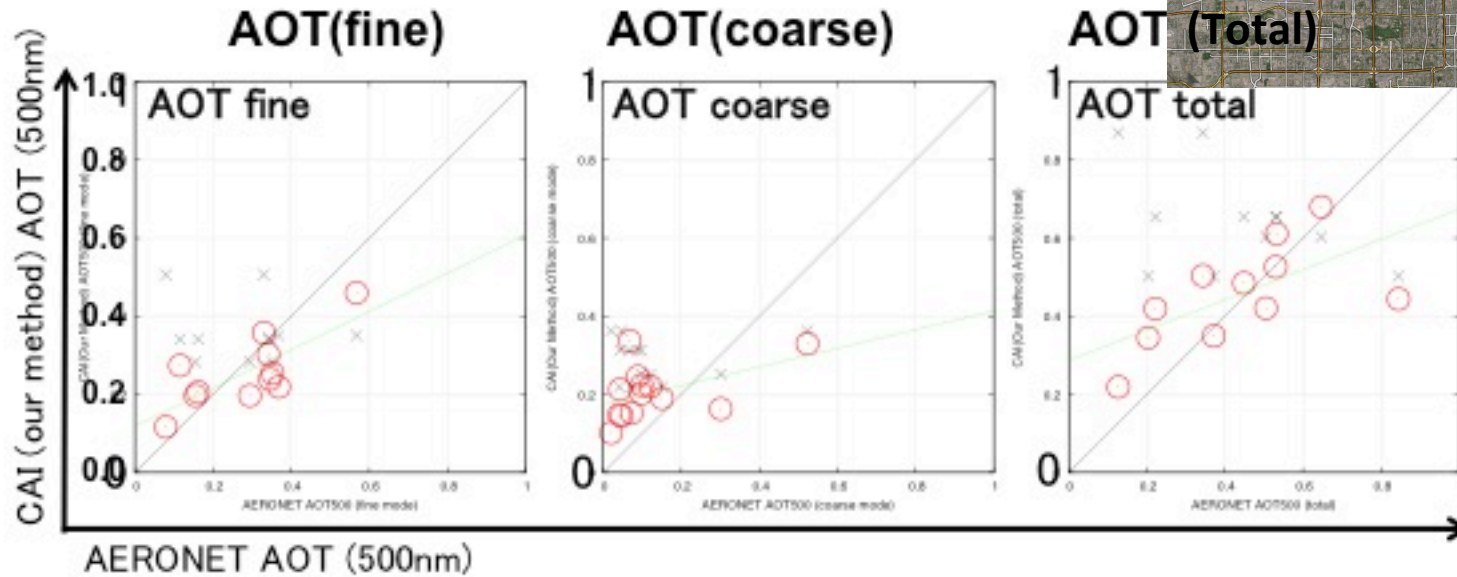
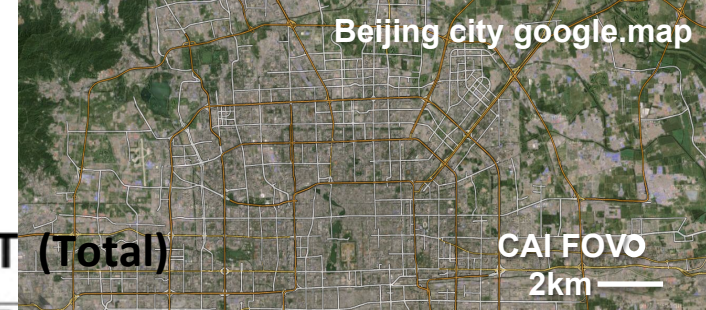
森林火災の煙(380nm)によって雲と区別がつく

(Original data provided by JAXA/NIES/MOE)

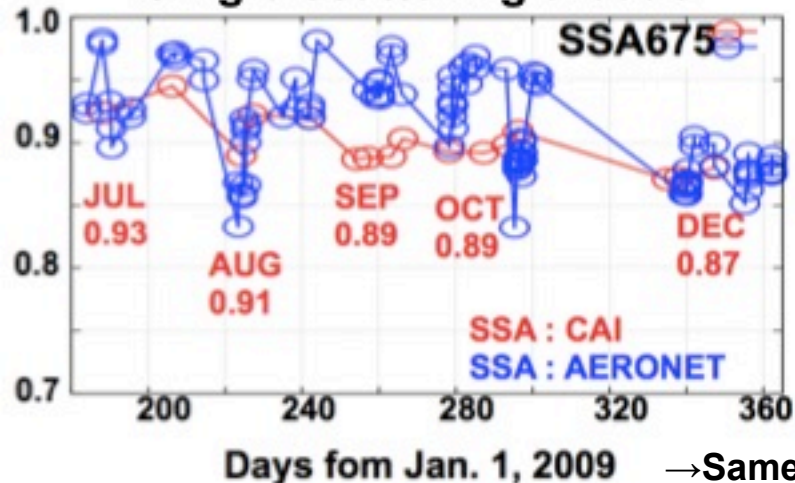


# Beijing (Jul. ~ Dec. 2009)

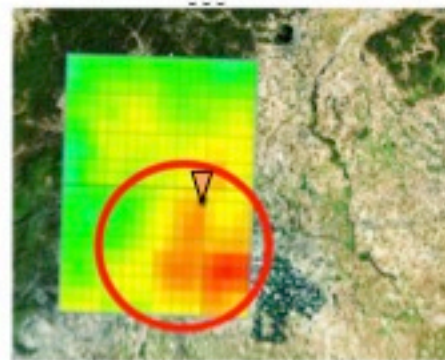
Retrieval from GOSAT/CAI 4 bands



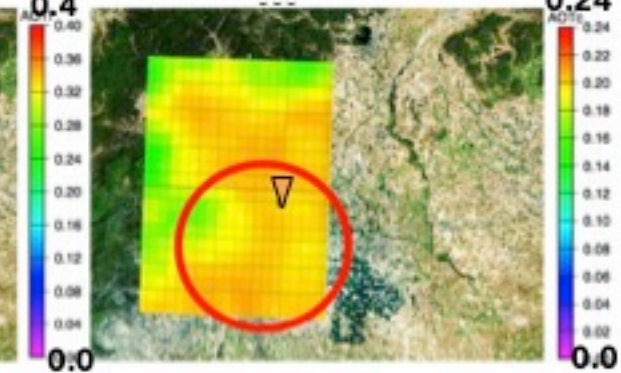
## Single scattering albedo



## AOT fine mode



## AOT coarse mode



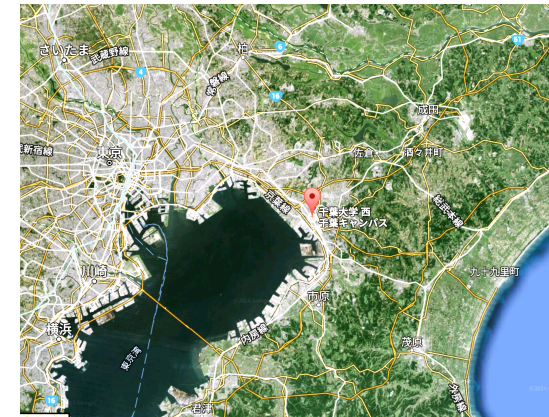
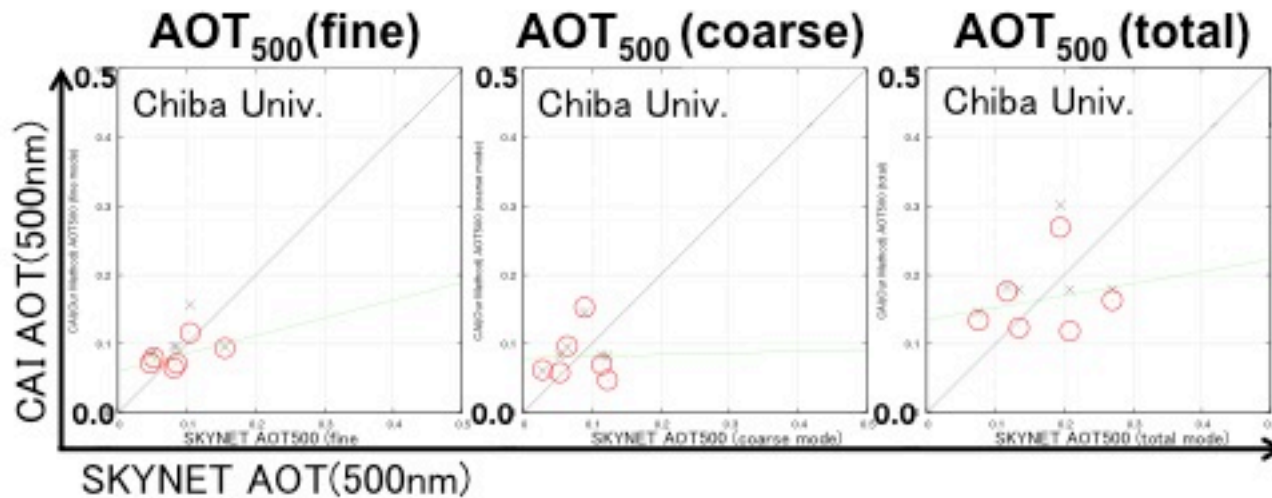
→ Same trend is retrieved with (Song et al., 2013)

Hashimoto et al. (Submitted)

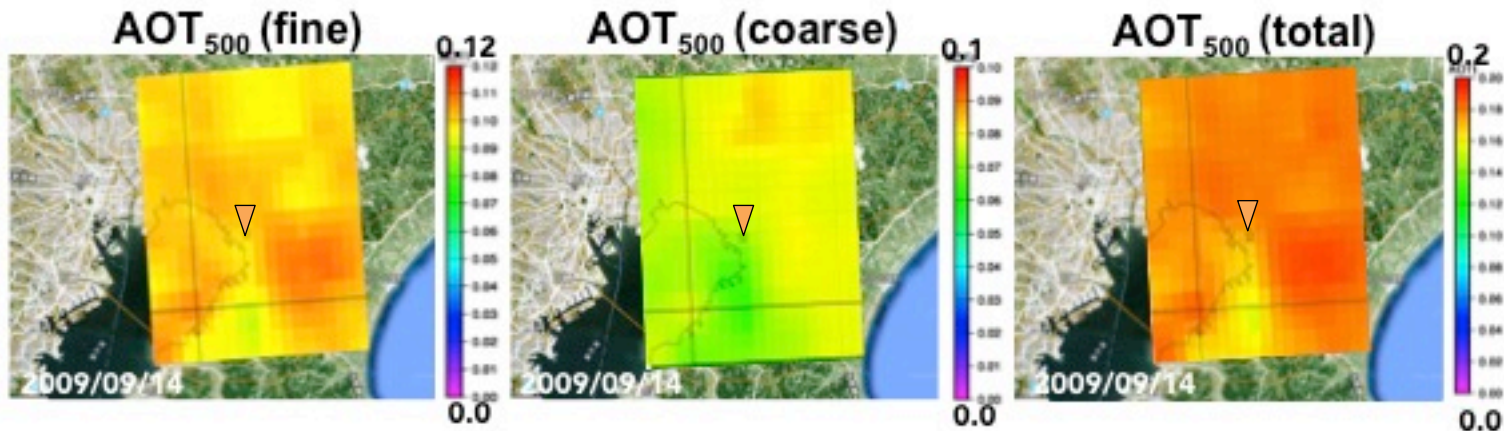
# GOSAT/TANSO-CAI Aerosol Retrieval

## Chiba University (Jul. ~ Dec. 2009)

### Retrieval from GOSAT/CAI 4 bands



Around Chiba University site of SKYNET, including several surface types.



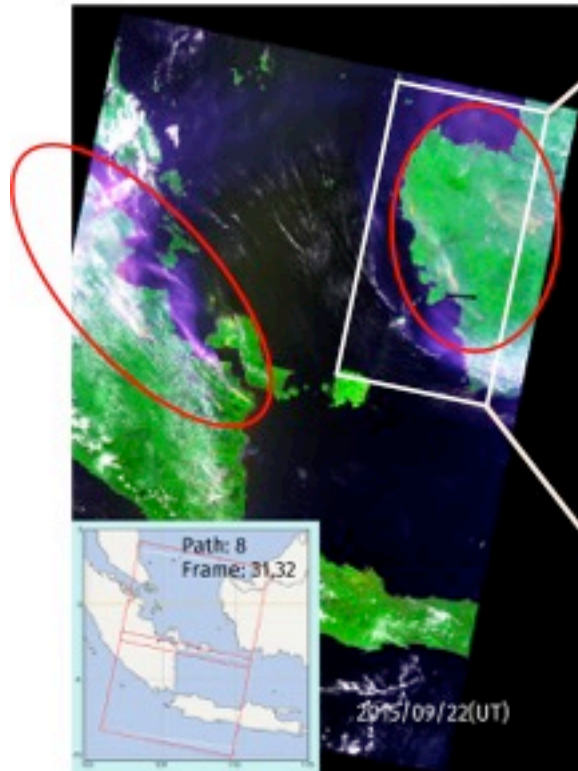
- Smooth distribution of aerosol properties
- Simultaneous retrieval over land and water region.



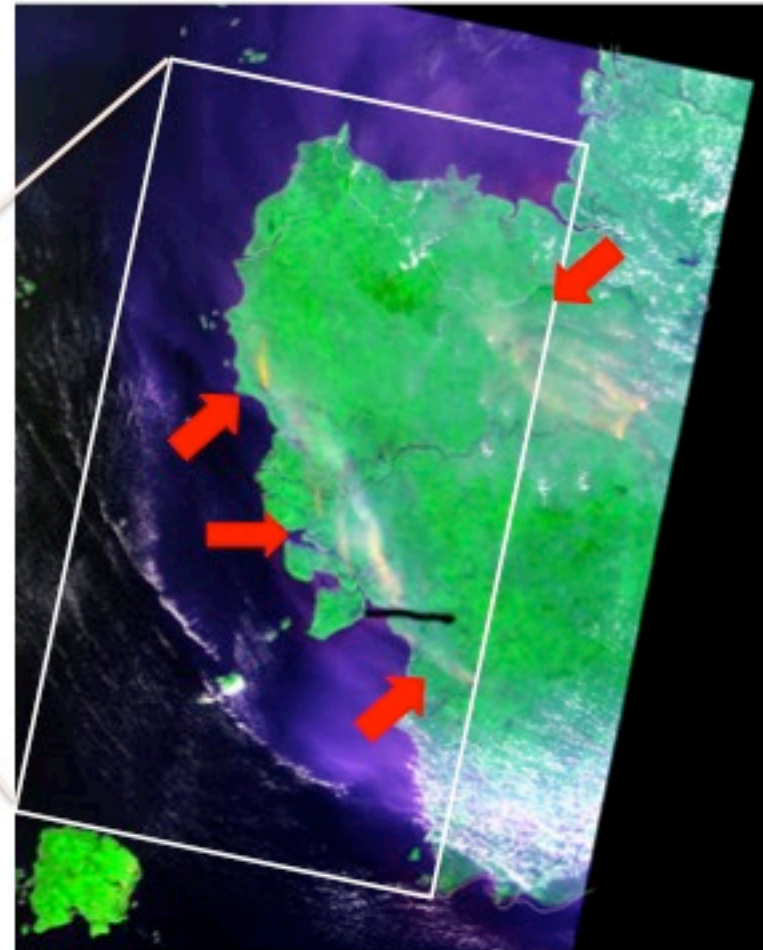
# Wild fire in Indonesia in 2015

エアロゾル吸収の強い380nmを使うことで森林火災の煙を雲と識別できる

RGB composite image. Smoke from forest fires

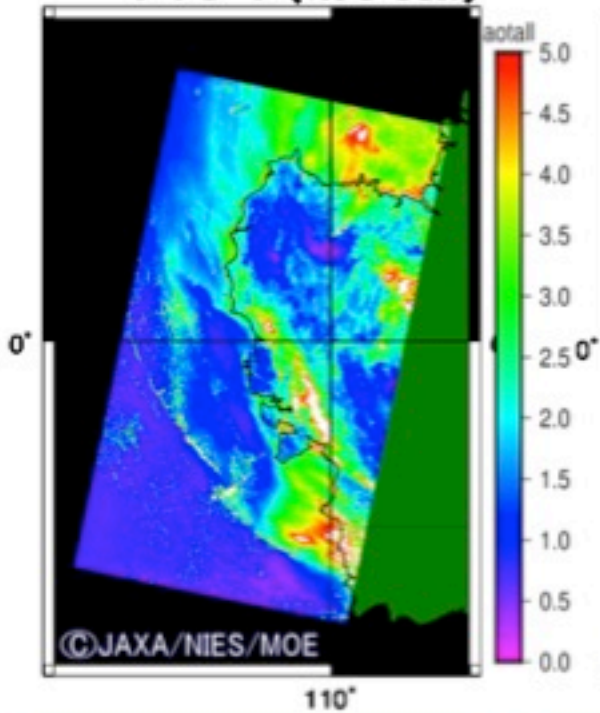


September 22<sup>nd</sup>, 2015

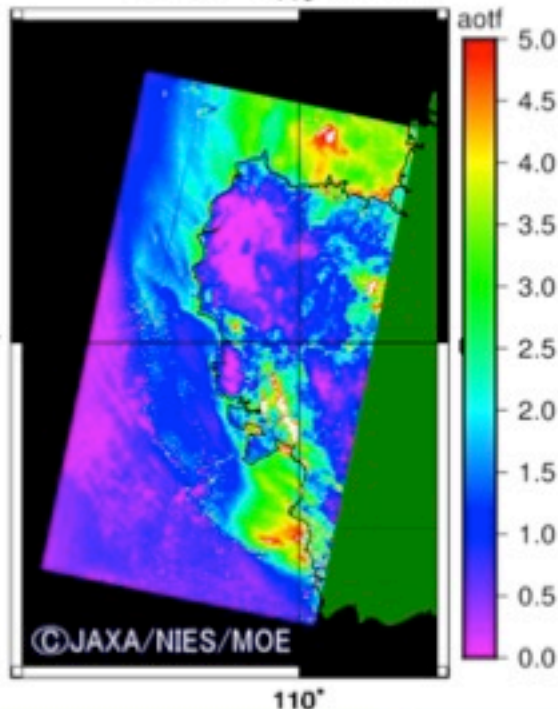


(Original data provided by JAXA/NIES/MOE)

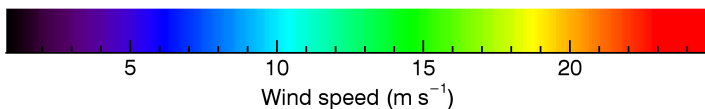
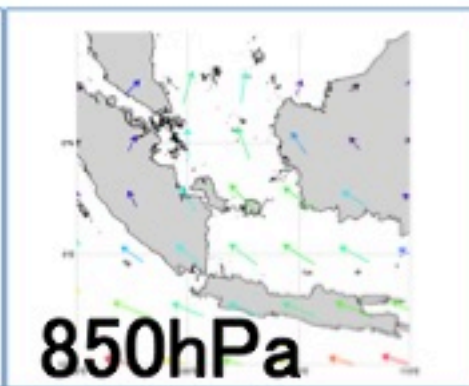
# AOT<sub>10</sub>(Total)



# AOT<sub>110</sub>(fine)

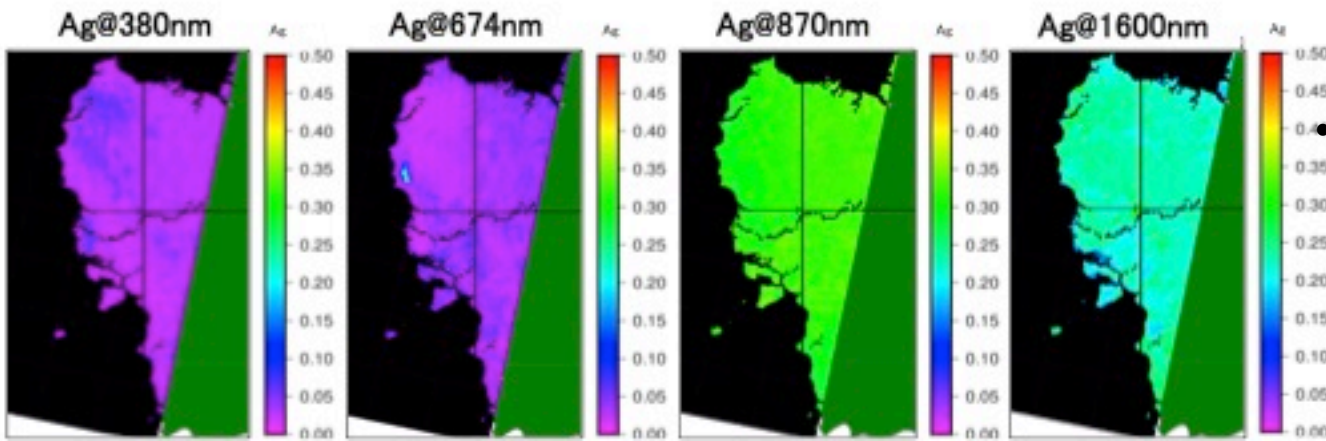
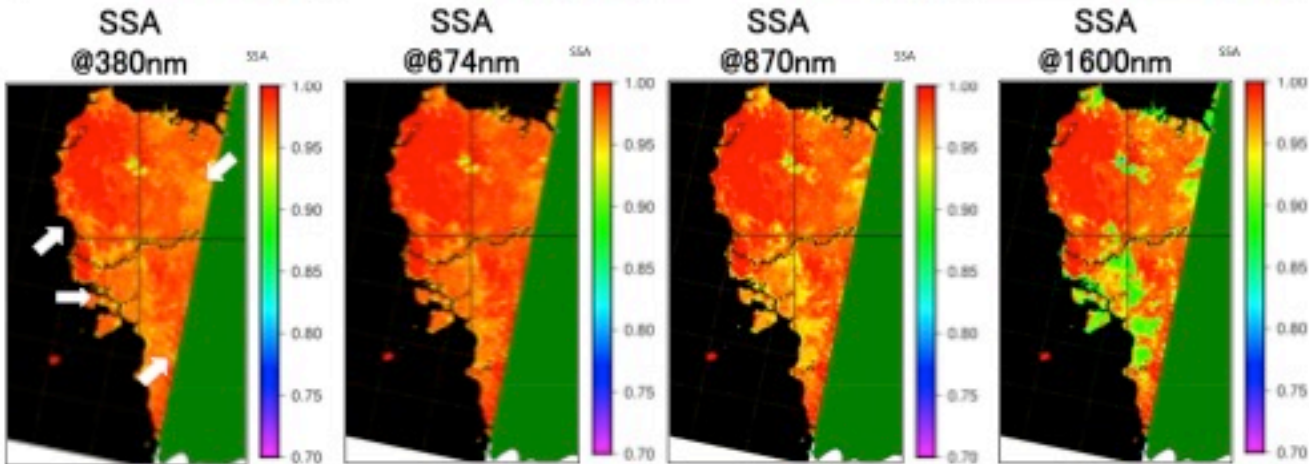
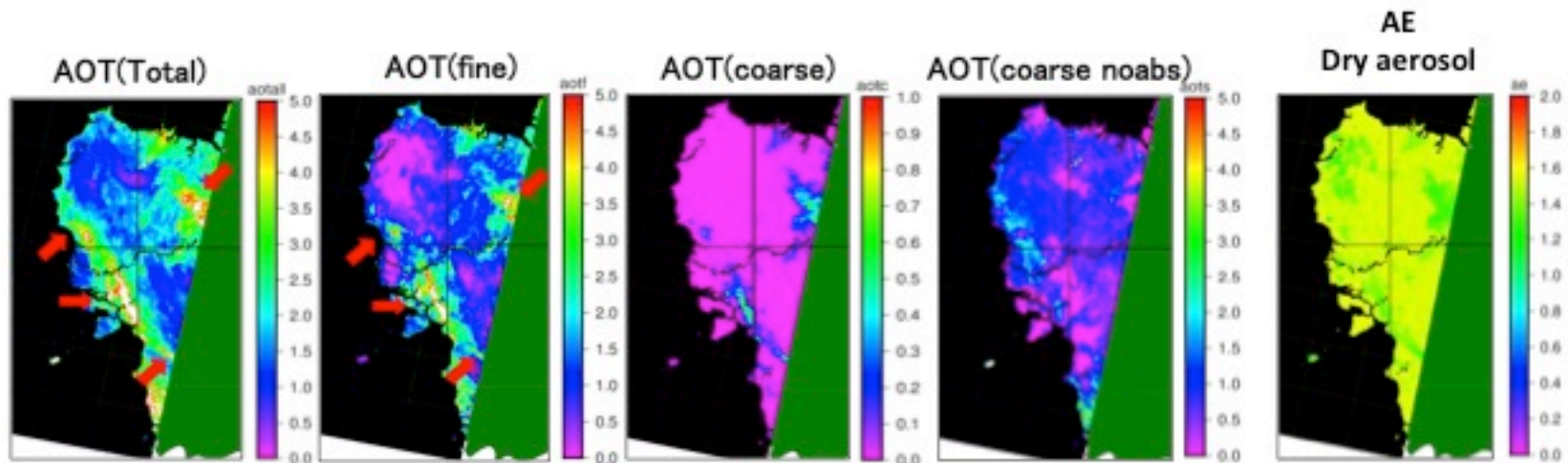


エアロゾルリターン  
バル結果(AOT)  
→ 煙部分をエアロ  
ゾル(微小粒子)と  
して導出できている  
→ 陸・海同時推定  
でエアロルの流れ  
が捉えられている



## Wind speed and direction





CAI輝度データ(L1B)  
を用いて導出したエアロゾル特性他

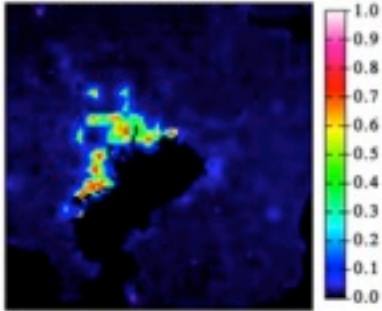
- Small particles constitute a large part of aerosol amount in this forest fire case.
- Absorption is large along with smoke line.

# MWP: Himawari-8/AHI Tokyo mega city area

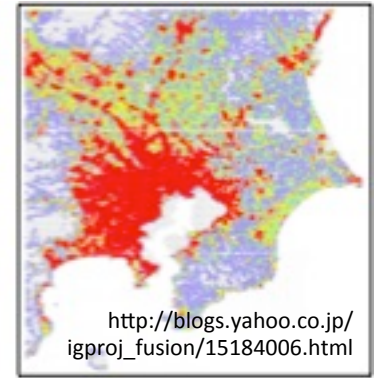
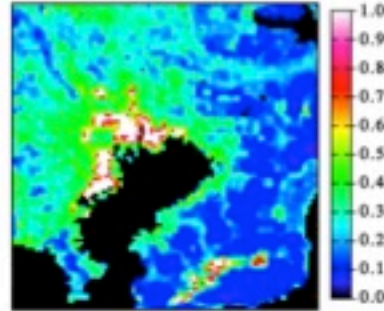
- SPRINTARS forward model results as a prior constraint (1km grid)

National census (2005)  
The number of households around Tokyo

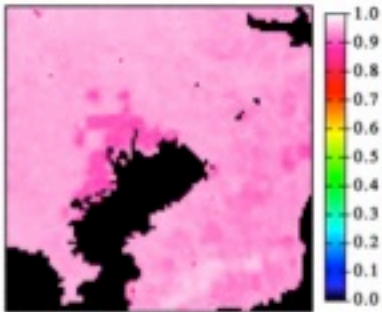
AOT coarse



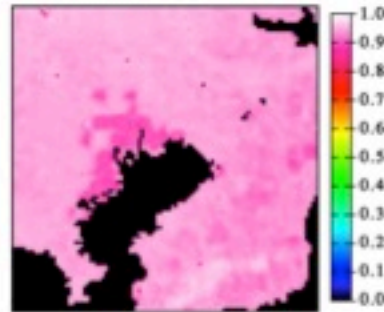
AOT fine



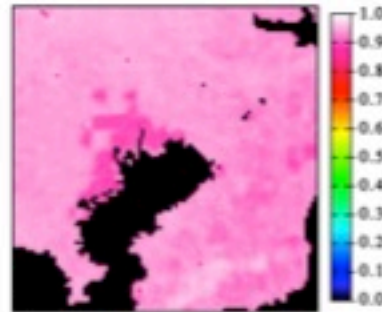
SSA 460nm



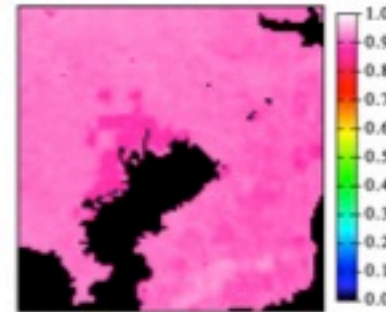
SSA 510nm



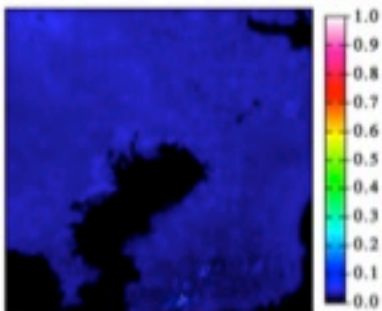
SSA 640nm



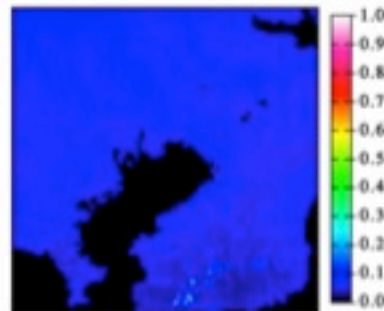
SSA 860nm



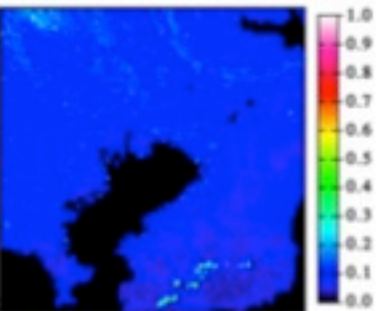
Albedo 460nm



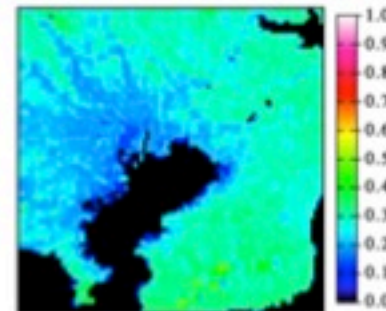
Albedo 510nm



Albedo 640nm



Albedo 860nm



*Higurashi, Hashimoto, Takenaka*

# まとめ

- 高解像度・都市域に対応した、エアロゾル衛星リモートセンシング手法の開発を行っている
- 多波長・多ピクセル法を開発
  - 単一ピクセル解析では推定が困難であった都市域でのAOT, SFの推定が可能になった(精度 $\Delta AOT = \pm 0.07$ )
    - ・ これまで同時に推定できなかった複数の地表面状態が含まれる混合領域でエアロゾルの空間分布が得られた
      - 大気汚染(人為起源)物質の排出源である都市域のエアロゾル特性の把握が期待できる
      - 大気・エアロゾル研究への貢献
- プログラムの高速化→全球解析
- ひまわり 日射データエアロゾル補正への適用
- GOSAT-2/CAI-2標準アルゴリズムとして組み込み