

# 衛星リモートセンシングと数値シミュレーションの同化による水災害現象の解明と予

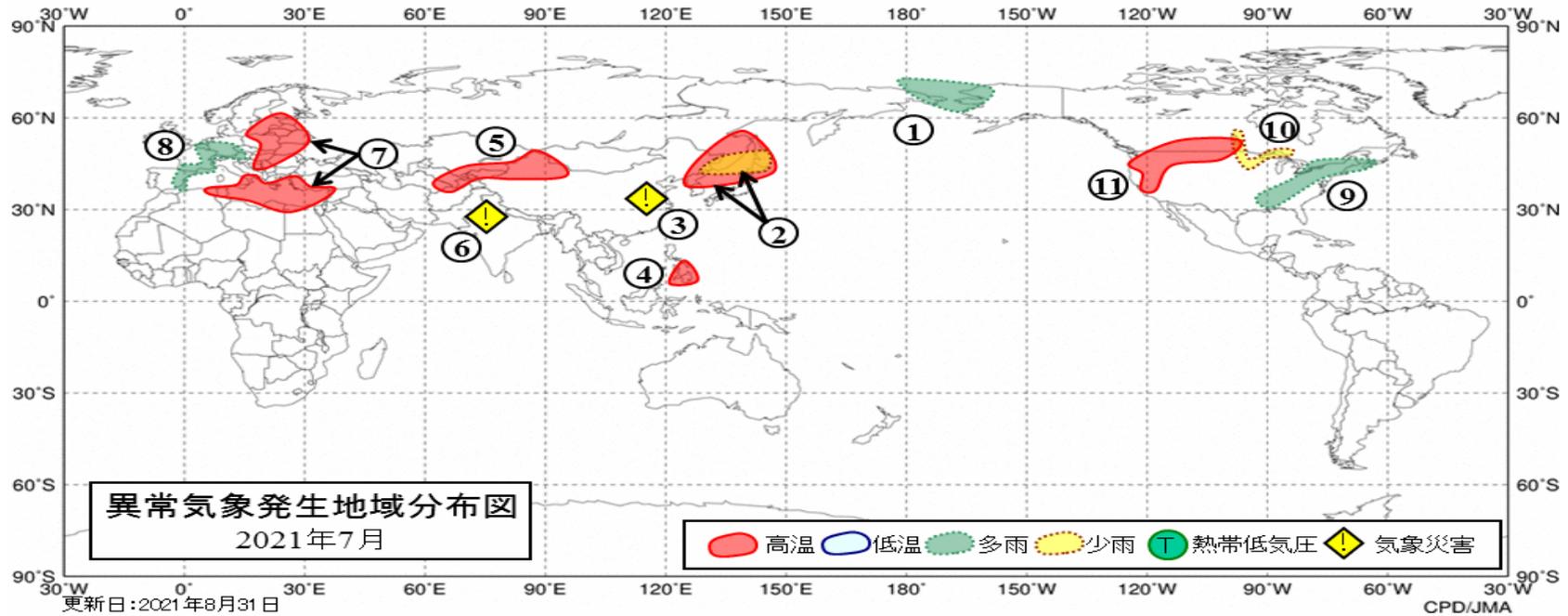
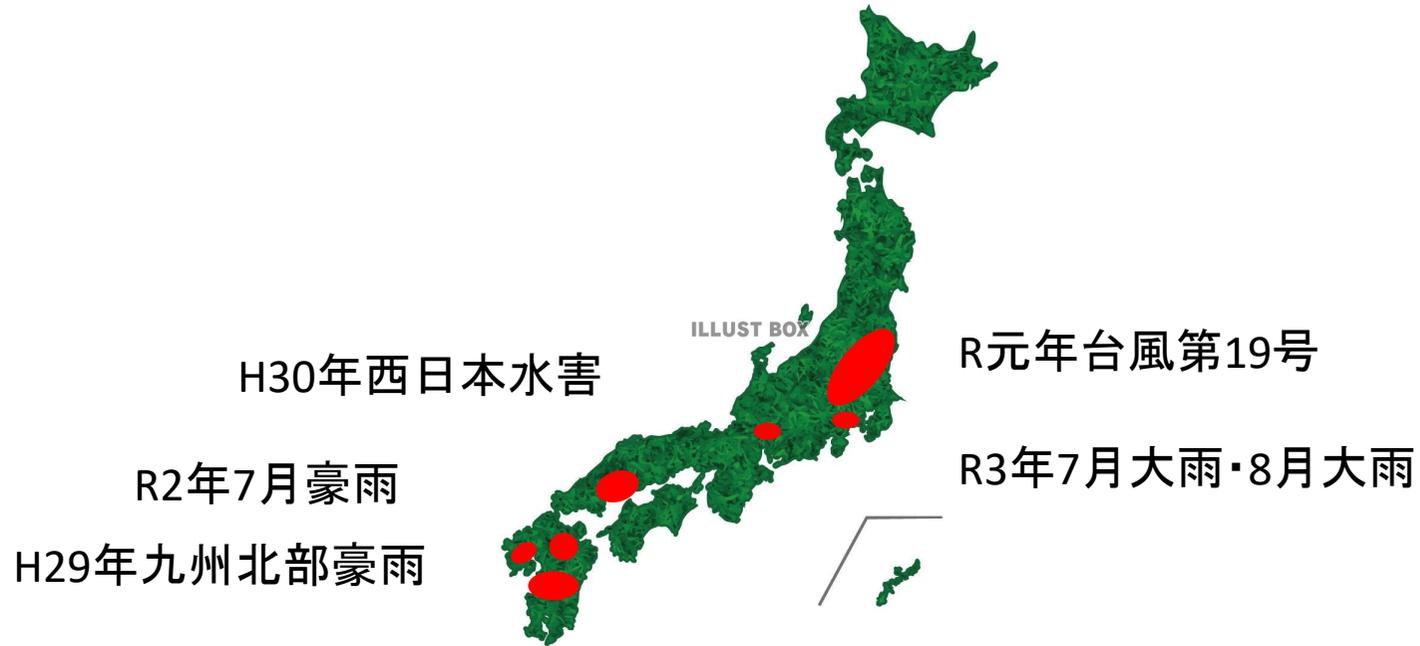
令和3年度土木研究所講演会

令和3年10月19日

国立研究開発法人土木研究所  
水災害リスク研究グループ (ICHARM) 伊藤弘之



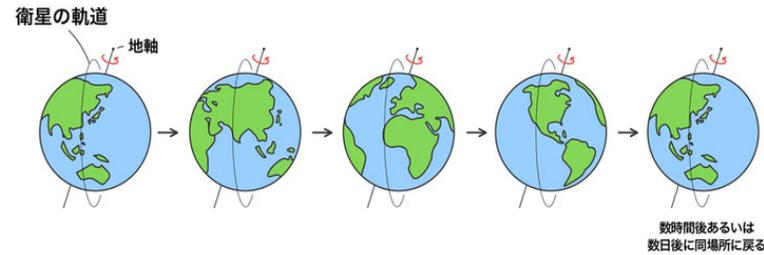
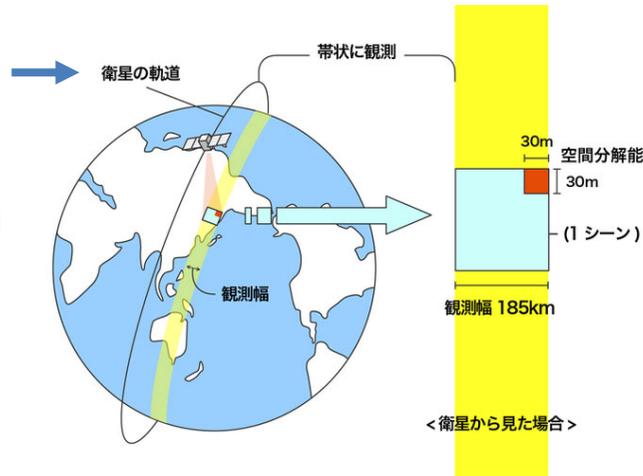
# 近年の水災害の状況



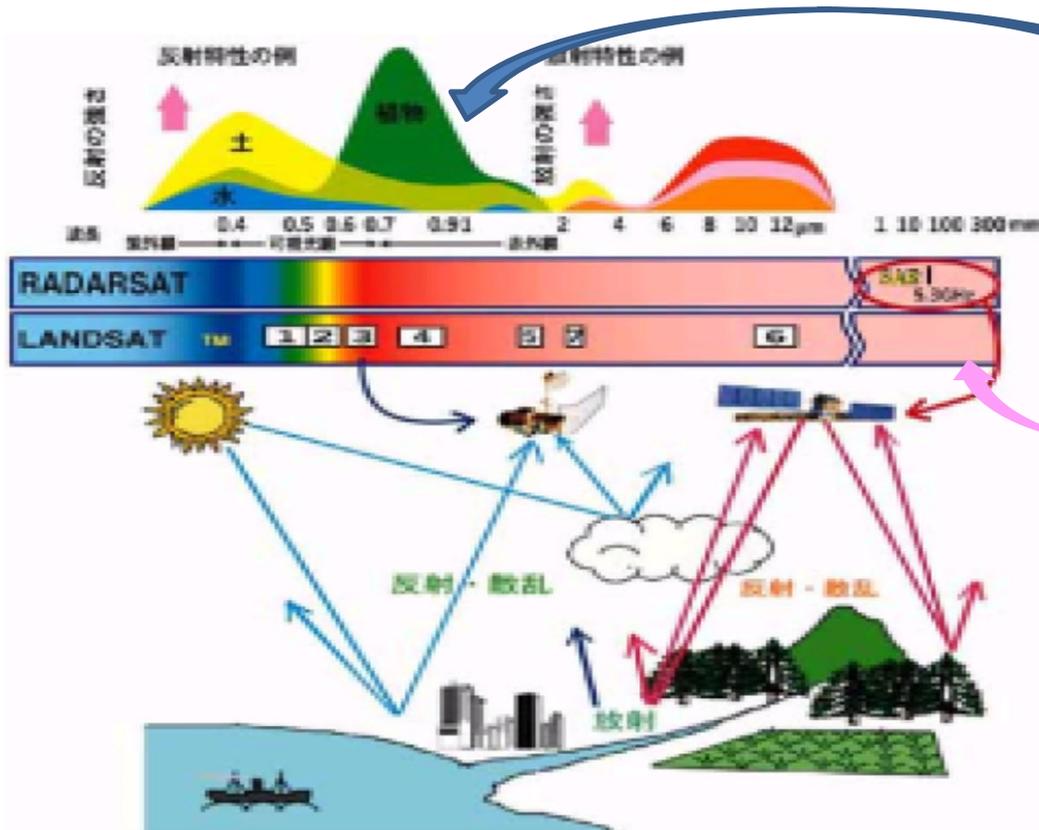
# 人工衛星による地球観測の概要



観測衛星「しずく」



1日に地球を2回転し、自転とあいまって、地球のほぼ100%をカバー  
日本国土を昼夜2回通過・観測



太陽光の領域

マイクロ波の領域  
大気・地表の水に主に応答

# マイクロ波観測の基本原理(1)

$T_f = 2kBf/\lambda^2$  放射輝度温度 マイクロ波放射量を温度に換算

$Bf$ : 黒体の周波数 $f$ の分光放射輝度( $Wm^2 \cdot sr \cdot Hz$ )

$h$ : プランク定数= $6.63 \times 10^{-34}$ (J)

$f$ : 周波数(Hz)

$k$ : ボルツマン定数= $1.38 \times 10^{-23}$ (JK/)

$$T_{se} = T_g (1 - \Gamma_p) e^{-\tau_c} + T_c (1 - \bar{\omega}_c) (1 - e^{-\tau_c}) (1 + \Gamma_p e^{-\tau_c})$$

$T_g$ : 土壌地表温度、 $T_c$ : 植生(キャノピー)温度、 $\tau_c$ : キャノピー光学的厚さ、 $\Gamma_p$ : 偏波 $p$ ごとの反射率

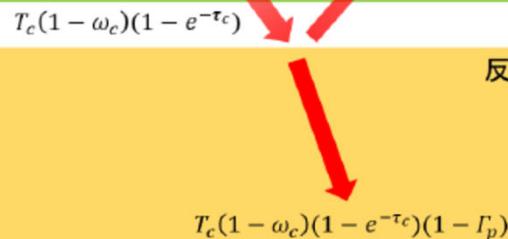
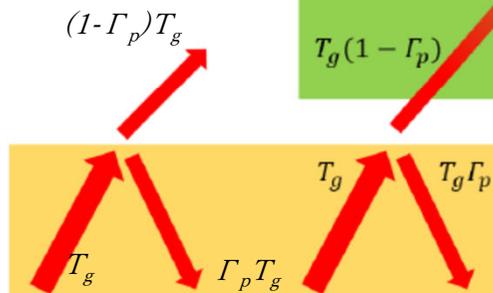
衛星で観測される  
マイクロ波

熱された地中からの  
マイクロ波放射  
がキャノピーで減衰

熱されたキャノピー  
からの放射

熱されたキャノピー  
からの放射が地表  
で反射しキャノピー  
で減衰

熱された地中からの  
マイクロ波放射



土壌層



地表から放射された  
マイクロ波を観測



太陽光は波長  
が短く大気を  
直接熱しない



太陽光は地表を熱し、  
熱された地表はマイ  
クロ波を発する

## マイクロ波観測の基本原理(2)

例) 地表の水分量を計測したい。

$$(1 - \Gamma_p) T_g \quad \Rightarrow \quad \Gamma_p = \{ QR_h + (1 - Q)R_v \}^h \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_r = \left[ 1 + (1 - \omega_s)(\varepsilon_s^\alpha - 1) + \omega^\beta \varepsilon_{fw}^\alpha - \omega \right]^{1/\alpha}$$

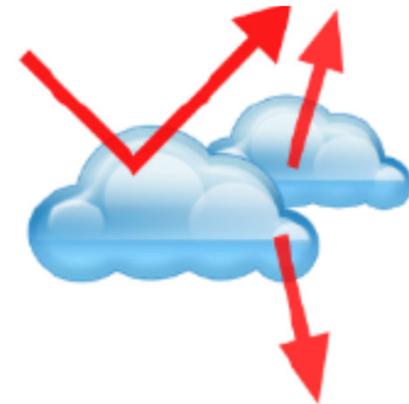
Q-hモデル

$$R_h = \left| \frac{\cos\theta - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta}} \right| \quad R_v = \left| \frac{\varepsilon_r \cos\theta - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta}}{\varepsilon_r \cos\theta + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta}} \right|^2$$

$\omega$ : 体積土壌水分

Q: 地表面粗度と波長による係数

より一般化して、地表・大気中の状態に応じたマイクロ波放射モデル(RTM)を使用



$$R_p^e = R_p \exp[-(2k\sigma \cos\theta)^2] S(\theta, \theta_j) + \frac{1}{4\pi \cos\theta} \times \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sigma_{pp}(\theta, \theta_j, \phi_j) S(\theta, \theta_j) + \sigma_{pq}(\theta, \theta_j, \phi_j) S(\theta, \theta_j) \sin\theta_j d\theta_j d\phi_j$$

# データ同化による観測と解析の融合

数値シミュレーション結果  
不確実性 $\sigma_c$

データ同化  
不確実性 $\sigma_a$

観測結果  
不確実性 $\sigma_o$



- ・モデルパラメータの修正
- ・初期値の改善 等

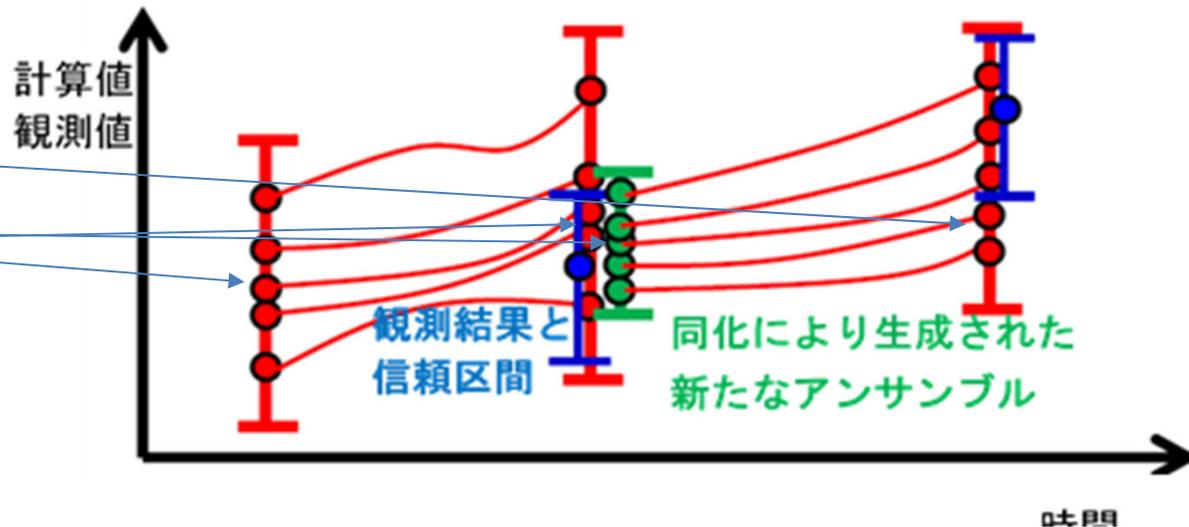
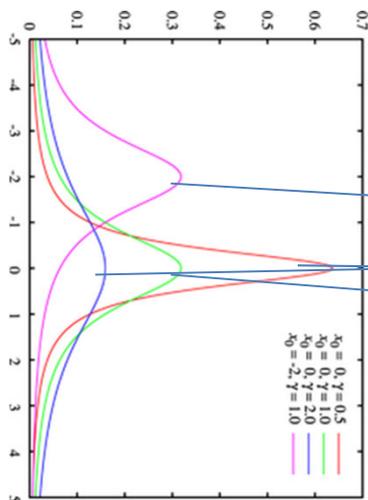
$$\sigma_a < \sigma_c$$

評価関数(J) : シミュレーションと観測  
の乖離の尺度

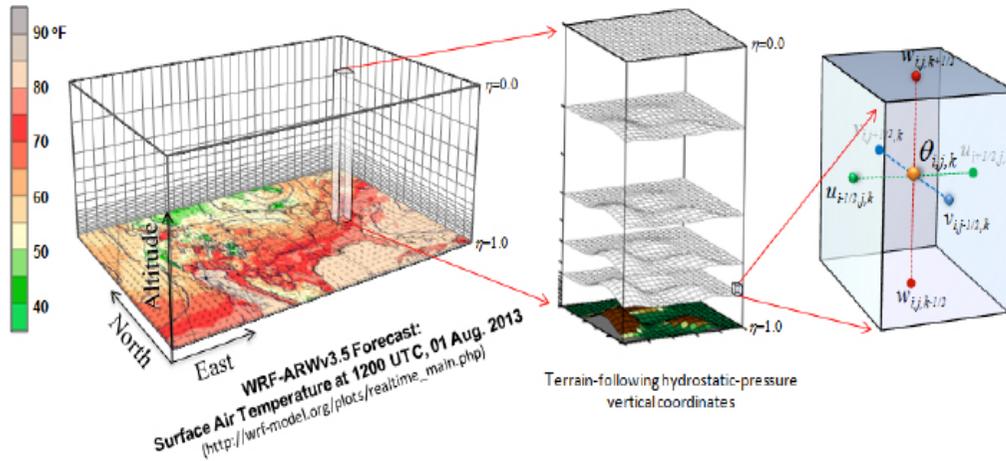


最小化

$$J(x) = \frac{1}{2} (x - x^b)^T B^{-1} (x - x^b) + \frac{1}{2} (H(x) - y^o)^T R^{-1} (H(x) - y^o)$$



# 大気・陸面における気象・水循環のモデル



$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot V u - \frac{\partial p \phi_\eta}{\partial x} + \frac{\partial p \phi_x}{\partial \eta} = F_X$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + \nabla \cdot V = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \nabla \cdot V v - \frac{\partial p \phi_\eta}{\partial y} + \frac{\partial p \phi_y}{\partial \eta} = F_Y$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{V \cdot \nabla \phi - gW}{\mu} = 0$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \nabla \cdot V w - g \left( \frac{\partial p}{\partial x} - \mu \right) = F_W$$

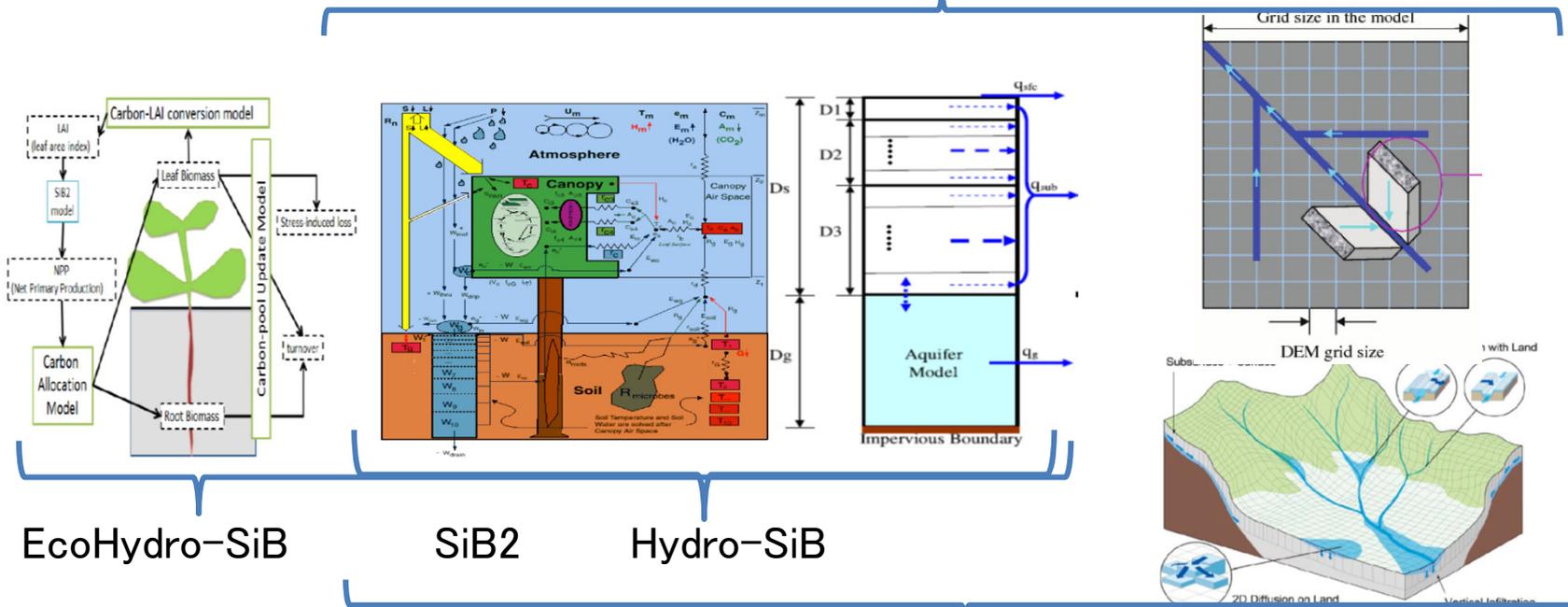
$$\frac{\partial \phi}{\partial \eta} = -\frac{\mu}{\rho}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \nabla \cdot V \theta = F_\theta$$

$$p = p_0 \left( \frac{\rho R_d \theta}{p_0} \right)^{c_p/c_v}$$

WRF モデル

## WEB-DHM



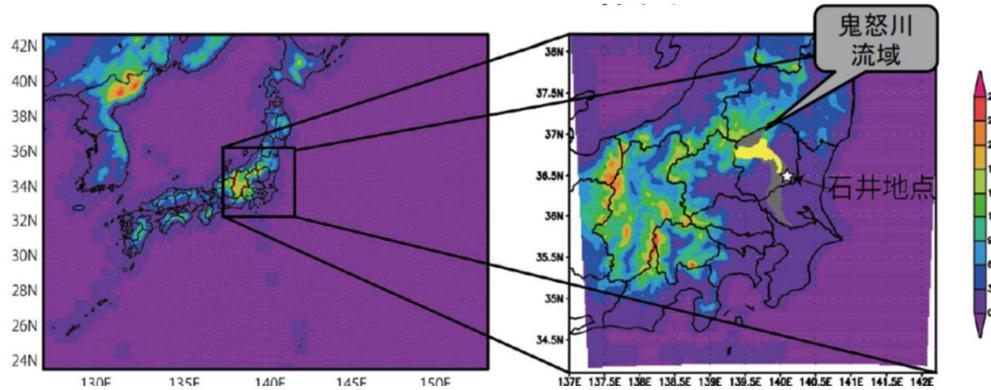
EcoHydro-SiB

SiB2

Hydro-SiB

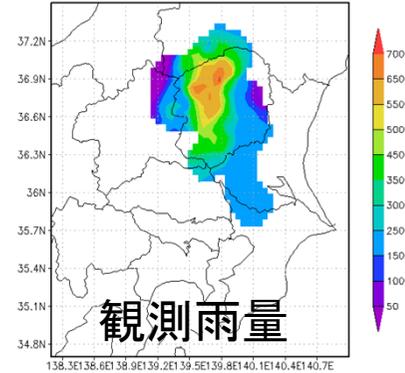
## WEB-RR1

# WRF-LETKFによる降雨予測

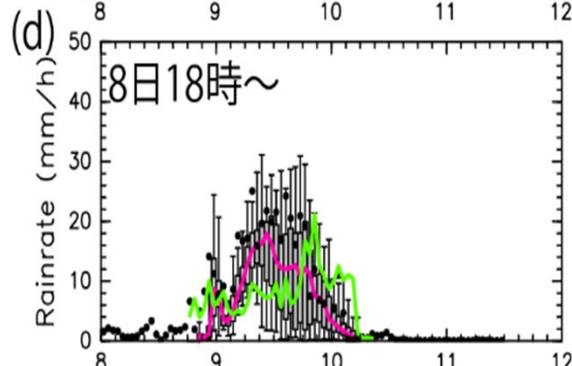
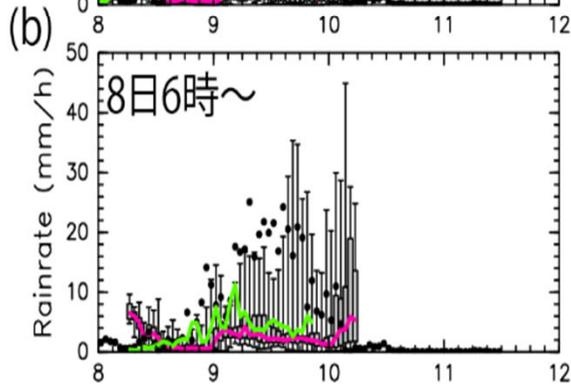
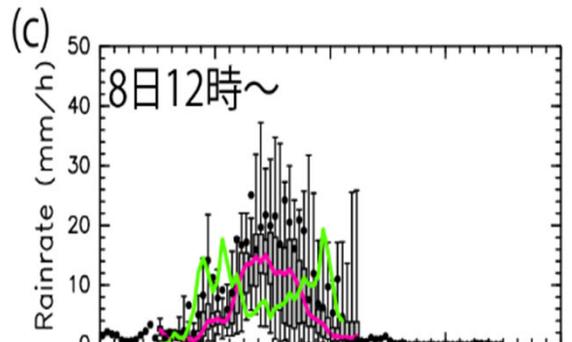
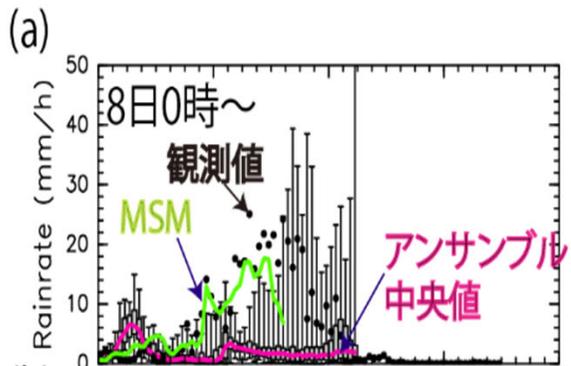


## 総雨量の空間分布

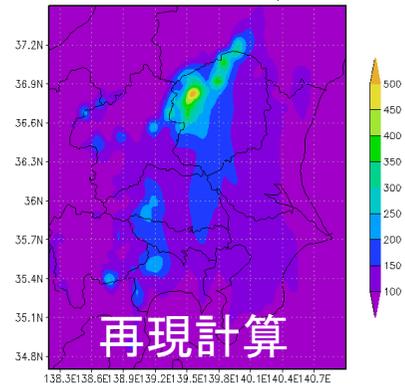
Raingauge (8-10Sep.2015)



雨域や雨量強度の再現が不十分



Rainfall 15z08-03z10Sep EM



# 雲水分布の同化

大気モデル  
の計算



陸面モデル  
の計算



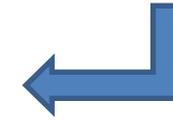
陸面マイクロ波  
放射計算



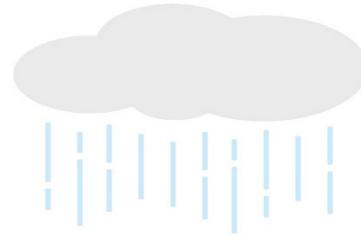
大気マイクロ波放射  
計算(RTM)



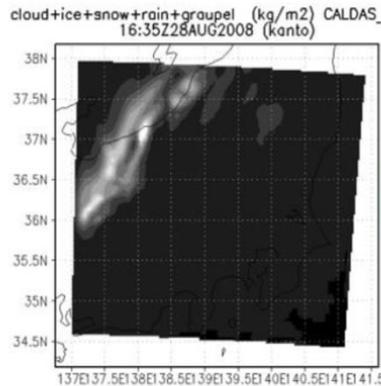
衛星観測データ同化



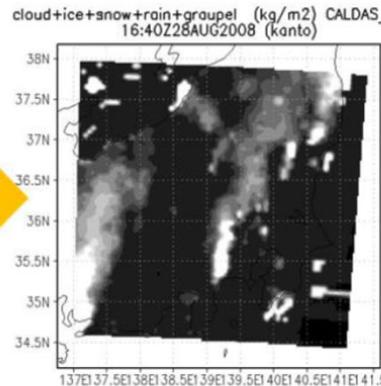
大気中の水分布量  
の精度向上



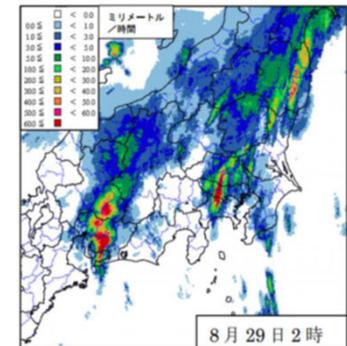
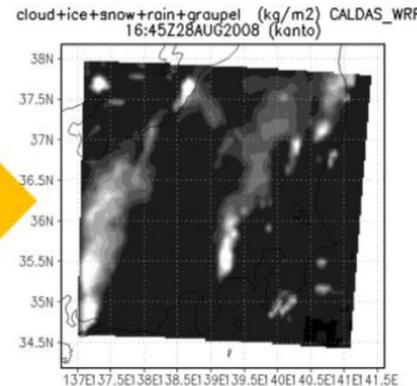
同化直前

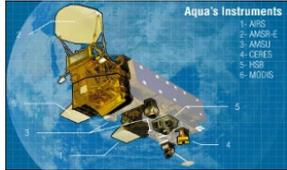


同化直後



同化5分後



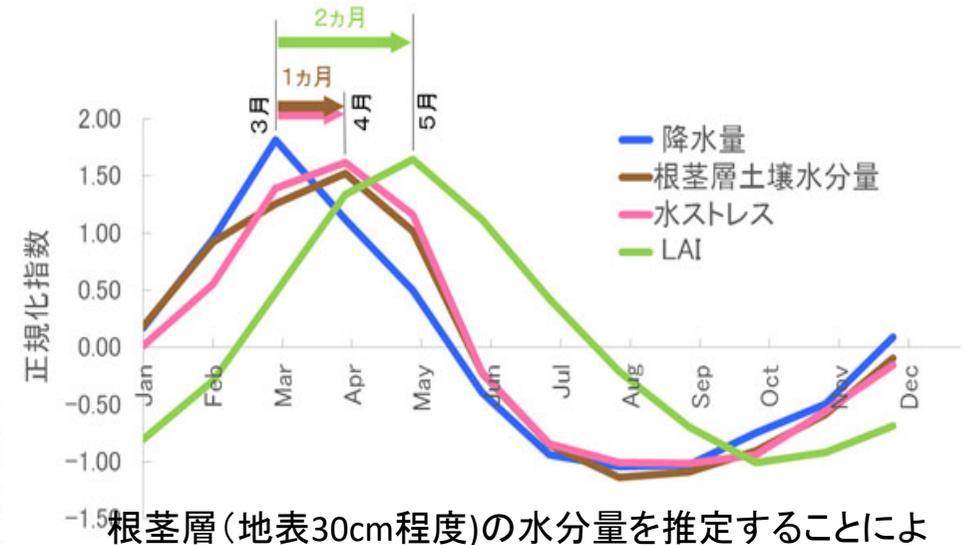
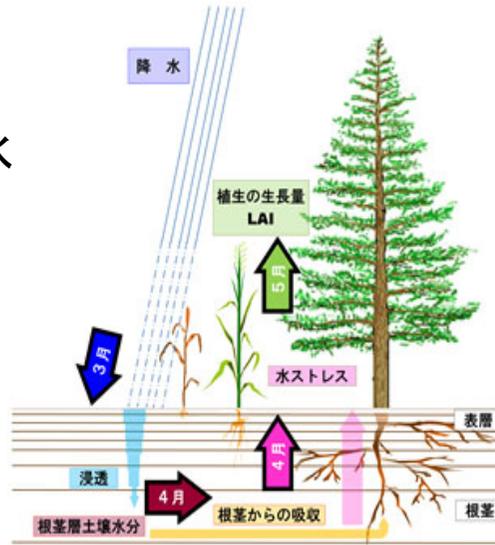


# CLVDASによる土壌水分監視

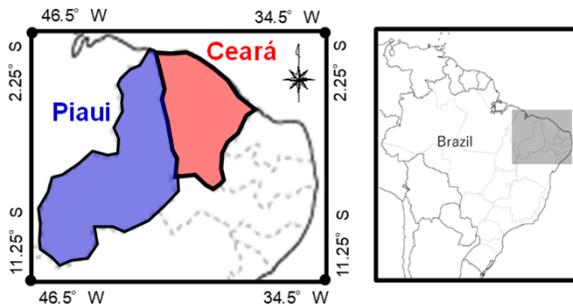
衛星による植生量(LAI)と地表水分量の観測



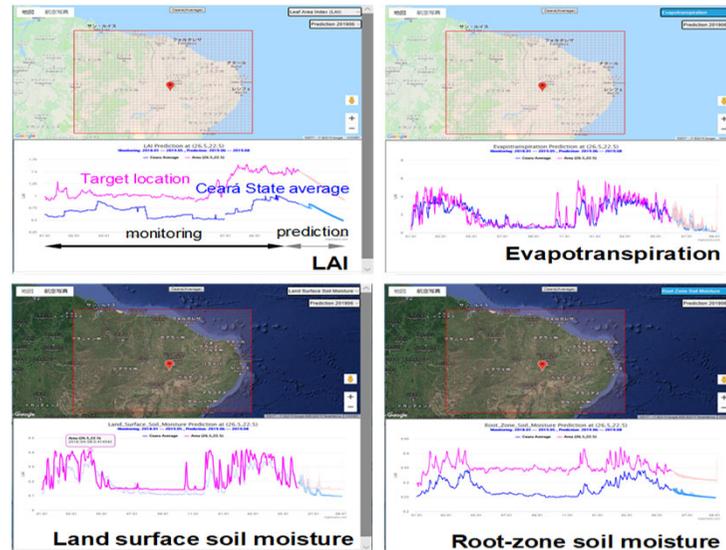
Eco-Hydro-Sibによる植生量、地表水分量、地中水分量の計算



根茎層(地表30cm程度)の水分量を推定することにより、約1か月先の植生生育量を推定。水供給方法の効率化に寄与する。



対象エリア:  
ブラジルセアラ州



ブラジル北東域25kmグリッドDIAS農業的旱魃モニタリング・季節予測システム(左上: LAI, 右上: 蒸発散量, 左下: 表層土壌水分量, 右下: 根茎層土壌水分量の監視・予測結果)

# まとめ

○衛星リモートセンシングと気象・水文に関わる数値シミュレーションとの組み合わせによる水災害予測の研究事例を紹介した。

○衛星センサーの精度向上も期待される中、衛星観測の空間解像度の高度化、シミュレーションの解像度や表現性能の向上等を図り、水災害の予測精度向上に取り組んでいく。