

# GPSによる大気計測とデータ同化

小司 禎教・川畑拓矢・瀬古弘・斉藤和雄（気象研究所 予報研究部）

## はじめに

人工衛星を用いた位置計測（測位）システムのGPS(Global Positioning System; 全球測位システム)は、カーナビゲーションや携帯ナビゲーション機器として、私達の生活に浸透してきている。国土地理院はGEONET(GPS Earth Observation Network)と呼ぶ1,200点を超える地上GPS観測網を運用し、日本列島の地殻変動監視に活用している。

GPSはまた、優れた気象測器としても注目され、欧米や日本の気象庁等、主要な数値予報センターでの数値予報の初期値解析に利用されている。気象庁は2009年10月28日、メソ数値気象予報解析にGEONETから解析した鉛直積算水蒸気量である可降水量(Precipitable Water Vapor; PWV)の利用を開始した。

ここではGPSの位置計測及び大気計測の原理を概説し、気象研究所でのGPSによる豪雨予測の改善に向けた研究の例を紹介する。

尚、GPSは米国による衛星を用いた測位システムで、現在は同種のシステムとしてロシアのGLONASSや欧州のGALILEO計画等があり、日本も2010年9月に準天頂衛星の打ち上げに成功した。最近ではこれらを総称して全球航法衛星システム(Global Navigation Satellite Systems; GNSS)と呼ばれることが多くなってきている。これまで筆者はGPSのみを利用した大気計測の研究を行ってきたので、本稿では明確にGPS以外のシステムを指す場合を除いて、“GPS”と表記する。

## 1. GPSの概要と位置計測の原理

世界初の実用GNSSであるGPSは、米国によって1970年代に開発が始められ、1993年12月に正式運用を開始、同時に民間での利用が可能となった。高度2万kmを周回する原子時計を搭載した衛星群が発する電波が、受信機に到達するのに要した時間に電波の速度(真空中では光速)を掛けることで衛星と受信機間の距離を求める。位置が既知である複数衛星との距離から受信機の位置を知ることができる。GPS衛星は軌道傾斜角55度の6軌道面に、運用開始当初は24機、2011年6月現在は31機ほどが配置されている。時間や場所によって変動するが、日本では概ね6~12機程度のGPS衛星が、同時に観測できる。

GPS衛星からは波長19cm( $L_1$ )と24.4cm( $L_2$ )の電波が射出され、受信機は波数で表した電波の位相(単位はサイクル)をカウントする。受信機( $i$ )が計測す

るGPS衛星( $j$ )から発射される電波の位相( $\phi_i^j$ )は、以下の式で表現される:

$$\phi_i^j = \rho_i^j + N_i^j \lambda + dT_i^j - dI_i^j + c \times (\delta_i - \delta^j) + \varepsilon_i, \quad (1)$$

ここで $\rho_i^j$ はGPS衛星と受信機間距離;  $N_i^j$ は“phase ambiguity”と呼ばれる整数バイアス;  $\lambda$ は波長;  $c$ は真空中での光速;  $\varepsilon_i$ は残差で、アンテナ周辺からの反射波の干渉(multipath)やアンテナ位相中心変動などが含まれると考えられる。 $\delta_i$ ,  $\delta^j$ は各々受信機と衛星時計の誤差である。

真空中では電波は光速で直線経路を伝播するが、大気中ではその速度や経路は変化(図1)し、位置計測に誤差をもたらす。電離大気による遅れ( $dI_i^j$ )は、電離大気遅延の周波数依存性を利用し、 $L_1$ と $L_2$ 2つのGPS電波の線型結合を計測値とすることで除去する。一方、中性大気による伝播遅延( $dT_i^j$ )は、未知パラメータの一つとして、観測された電波の位相データから、観測点位置、整数バイアス、時計誤差と共に推定する。

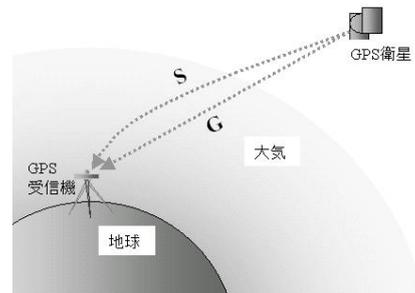


図1 GPS電波の経路の模式図。GはGPS衛星から地上の受信機までの直線経路。Sは大気により偏向し、遅延した実際の伝播経路。

受信機からはGPS衛星は様々な方向(仰角, 方位角)に位置している。未知パラメータの数を減らし、計算コストを軽くするために、GPS解析では直接には、天頂遅延量(Zenith Total Delay; ZTD), あるいはZTDと遅延量の空間一次勾配を解析する。受信機と衛星間の伝播遅延( $dT_i^j$ )は、ZTDに対して視線遅延量(Slant Total Delay; STD)と呼ばれる。ZTDにマッピング関数と呼ばれる関数(最も簡単な例としては、1を仰角の正弦で割ったもの)を適用することでSTDが推定できる。マッピング関数は場所や季節、気象状態等によって変化する量で、衛星測位の重要な研究課題である。

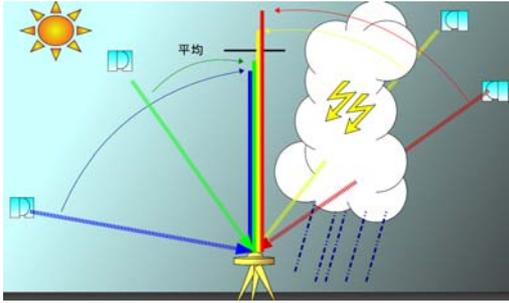


図2 GPS解析でのZTDとSTDとの関係. 図中右側では降雨もあり, 遅延量が相対的に左側より大きい. GPS解析で得られるZTDは, 受信機から各衛星方向のSTDの平均的な値という性格を有する.

## 2. GPSによる大気計測

前節で述べたようにGPS測位では, GPS衛星に搭載された原子時計による高精度の時刻情報に基づき, GPS衛星から発射された電波が受信機に到達するまでの時間を用いて衛星と受信機間の距離を計測する.

式(1)の大気による遅れ(大気遅延量;  $dT_i^l$  またはSTD)は, 電波が通過してきた経路上の屈折率を  $n$  とすると,  $(n-1)$  の積分値である. 屈折率( $n$ )は, 式(2)に示すように, 気温, 気圧, 水蒸気圧という気象要素の値によって決定される量であることから, これを利用してGPSによる大気計測が可能となる.

$$10^6[n-1]=k_1\left(\frac{P_d}{T}\right)+k_2\left(\frac{P_v}{T}\right)+k_3\left(\frac{P_v}{T^2}\right), \quad (2)$$

ここで,  $n$  は屈折率,  $P_d$ ,  $P_v$  は各々乾燥大気と水蒸気分圧,  $T$  は気温. 定数  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  は定数で, 理論や実験によって幾つかの値が提唱されている.

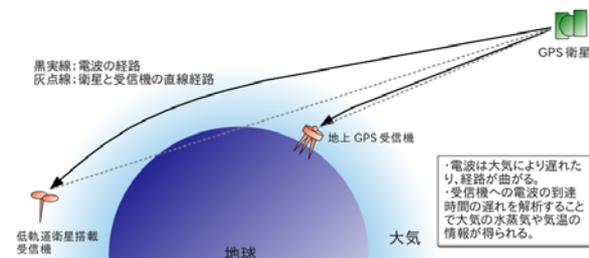


図3 GPSによる二つの大気計測手法の概念図

地上GPS受信機では電波の遅れを利用する. 掩蔽法は電波の曲がり(屈折角)から, 大気の屈折率の鉛直構造を解析する.

GPSを用いた大気計測には大気を貫く電波の角度によって, 大きく二つの手法がある(図3). 1つは,

主に地上に設置した受信機を利用するもの. もう1つは低軌道衛星に搭載した, あるいは孤立峰山頂に設置した受信機で, 大気を水平に貫いて到達する電波を利用して大気の鉛直構造を解析する手法で, 掩蔽法と呼ばれる.

### (1) 地上GPS受信機による大気計測

衛星が天頂方向の場合, 遅延量は低地で2.2~2.7m程度に達する. 天頂遅延量は, 天頂静水圧遅延(式(2)の右辺第1項)と, 天頂湿潤遅延(式(2)の右辺第2, 3項)から成り, 天頂静水圧遅延は地上気圧から推定できる. 地上気圧を用いて静水圧遅延量を求め, トータルの大気遅延量から差し引けば, 水蒸気に起因する湿潤遅延量が求められる. 天頂湿潤遅延量は, 可降水量と比例関係にあり, 比例係数はGPS点における気温を用いて推定することができる.

ところで, 式(1)で見ると, 観測された電波の位相には大気の情報以外にも種々の誤差が含まれている. 特に時刻情報を基本とするGPSシステムでは, リアルタイム解析においては衛星に搭載された原子時計の誤差が不明で, GPSを水蒸気センサーとして数値予報に利用する場合の課題であった. Shoji(2009)は, 地上受信局の原子時計を用いた準リアルタイム解析を提案したが, その手法を適用したGEONETから得られるPWVは, 高層ゾンデ観測と高い一致度を有することが確認された(図4).

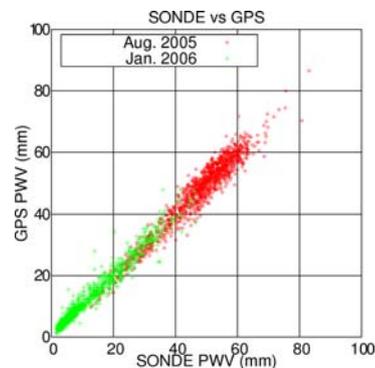


図4 日本国内の高層ゾンデ20観測点とその近傍のGPS観測点の準リアルタイム解析で得られた可降水量の比較. (Shoji 2009)

### (2) GPS掩蔽法

GPS掩蔽観測では, 高度500~800km程度の低軌道を周回する衛星に搭載したGPS受信機が観測した大気を水平方向に貫いてきたGPS電波の遅延量を利用する. 遅延量の時間変化から大気屈折率が同一高度では空間方向に変化しない(水平一様)という仮定を課すことで屈折率の鉛直分布, さらには気温と湿度の鉛直分布を解析することができる.

GPS 掩蔽データの特質として、(1)全地球規模で空間的に偏りの無い観測が行われる、(2)鉛直方向の解像度が高い(数 10m)、(3)水平方向の解像度は対流圏下層で数百 km、といった点が挙げられる。

大気鉛直構造観測の代表的な手法として、気球に連結した気象センサーで観測を行う高層ゾンデ観測がある。これは世界中に約 1000 点ほどの観測点があるが、そのほとんどは陸上に分布しており、空間的な偏りが大きい(図 5 上)。基本的に毎日 1~4 回、決められた時刻(日本時間の9時と21時など)に観測を実施している。

米国と台湾が共同で運営する FORMOSAT-3/COSMIC、欧州気象衛星開発機構(EUMETSAT)の MetOp、ドイツの GRACE などにより、現在では 1 日に 2000~3000 もの大気プロファイルが GPS 掩蔽法により観測されている(図 5 下)。ラジオゾンデ観測のみでは難しい海洋や極域等の水蒸気分布の客観解析精度を向上させ、数値予報精度を改善させるものとして、GPS 掩蔽観測に期待が寄せられている。

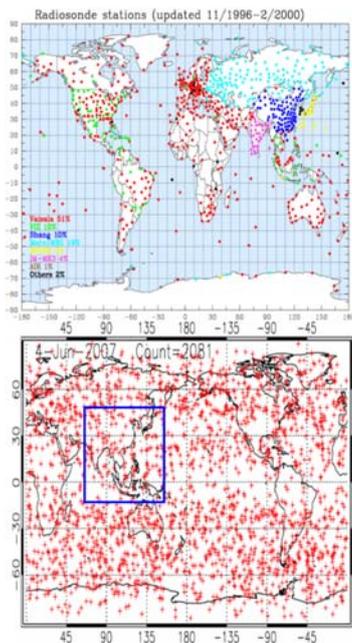


図 5 (上) 高層ゾンデ観測点、(下) COSMIC による掩蔽観測点分布(2007/7/4)

上記の低軌道衛星を用いた掩蔽観測のほかに、日本では富士山頂や航空機に GPS 受信機を取り付けた掩蔽観測実験がおこなわれ、それぞれ世界ではじめて対流圏で行われた GPS 掩蔽観測による大気プロファイルの解析に成功している(Aoyama et al., 2004; 吉原他, 2006)。

### 3. GPS による大気計測の特徴

GPS の、他のリモートセンシングに対する特徴として、(1)全天候下、(2)高精度、高時間分解能で解析が可能という点が挙げられる。近年では、衛星に搭載されたマイクロ波放射計等のリモートセンシング技術による全地球規模での水蒸気観測が行われているが、陸上や降水域で精度が劣化するため、現状では海上で晴天域の観測のみ数値予報の初期値解析に利用されている。

GPSでは電波の強度ではなく位相をカウントするという単純な原理で、しかも原子時計による高精度な時刻情報を用いるため、年月が経つことにより解析で得られる水蒸気情報の精度が変化しない。さらに日本では GEONET(図6)により、(3)空間的にも微細な水蒸気変動を解析できるという優位性がある。

### 4. GPS を用いた豪雨予測改善に関する研究

#### (1) 数値予報とデータ同化について

数値予報は、風や気温、水蒸気など大気の状態を格子点での数値で表現し、物理法則に基づいてその時間変化をコンピュータで計算し、将来の状態を予測するものである。初期時刻における正確な大気の状態を解析することは、数値予報の精度にとって極めて重要である。大気状態の解析は、観測データに基づいて、ベースとなる第一推定値を修正することによって行われ、この過程をデータ同化と呼ぶ。

現在数値予報で主流となっているデータ同化手法として変分法があり、観測値や第一推定値からのずれを最小にするような場を解析値として求める手法で、数値モデルで予報される変数以外の観測データも同化できる利点を持っている。

変分法によるデータ同化の実用化により、様々なリモートセンシングデータが初期場の解析精度向上に寄与してきているが、依然数値予報の格子点密度に対し、観測データは非常に少ない。梅雨期の豪雨では大気下層の水蒸気がメソ対流系の形成に重要な役割を果たしており、海に囲まれた日本では海洋上の水蒸気解析の重要さが指摘されている(例えば Kato and Aranami 2005)。GPS は従来得られなかった、高時間・空間分解能の水蒸気変動を、数値予報初期値解析に利用することを可能にした。

以下では、GPSを初期値解析に用いることで豪雨予測を改善させた研究例から、2つを紹介する。

#### (2) 2008 年 7 月 28 日、北陸・近畿豪雨への地上 GPS データ同化実験

2008 年 7 月 27~29 日、下層暖湿流と上空寒気の影響により大気の状態が不安定となった。28 日に

は北陸や近畿地方で大雨となり、兵庫県の都賀川で急速な増水による災害が発生した。Shoji et al. (2009)は、この事例について、図 6 に示すような国内外の GPS 観測点から得られた PWV を同化する実験を行った。

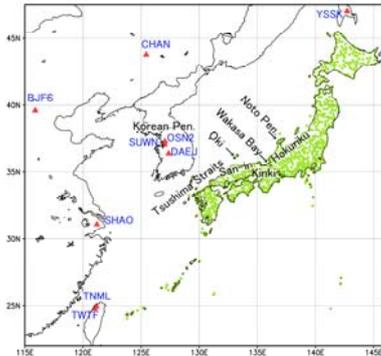


図 6 実験に用いた国土地理院 GPS 観測網(●)と、国外 GPS 観測点(▲)。(Shoji et al. 2009)

データ同化には当時の気象庁現業で利用されていたメソ 4 次元変分法データ同化システム(メソ 4D-Var)を用い、7 月 28 日 09 時の数値予報初期値を作成するため、7 月 27 日 03 時(日本標準時)から始めて 3 時間の同化ウィンドウを 10 回連続して実施した。GPS PWV を用いない実験(以下 CNTL 実験)と、CNTL で同化した観測データに加え、国内の GPS を同化した実験(以下 GEONET 実験)、さらに国外の GPS も同化した実験(GEONET+IGS 実験)の 3 通りの実験を行った。CNTL 実験で同化したデータは、通常の観測データ(地上気象官署、船舶、ブイ、ゾンデ、航空機による観測、および、静止衛星による大気追跡風、NOAA 衛星の TOVS サウンドからリトリブした気温)の他に、解析雨量、ウィンドプロファイラーによる高層風、衛星搭載マイクロ波散乱計による海上風、衛星搭載マイクロ波放射計による海上の PWV と雨量強度、ドップラーレーダーの動径風などである。

図 7 に解析された数値予報初期値における PWV の比較を示す。GPS PWV を同化することにより、山陰沖で東西に水蒸気を増加させ、その北側で減少させている。山陰沖に東西に伸びる水蒸気の集中帯が、より南の海岸線に沿う形で、量も増やして解析されている。また、若狭湾から山陰沖で北風成分が強化され、陸地に向かって下層の水蒸気が供給され易い場を解析している。国外 GPS を同化した場合と、国内 GPS のみを同化した場合の可降水量を比較すると、朝鮮半島 GPS 点を起点として修正量が風下に伝搬している。こうした伝搬は 2009 年 7 月 21 日の山口

豪雨の GPS データ同化実験でも見られ(小司ほか、2009)、風上の水蒸気情報の重要性が確認されている。

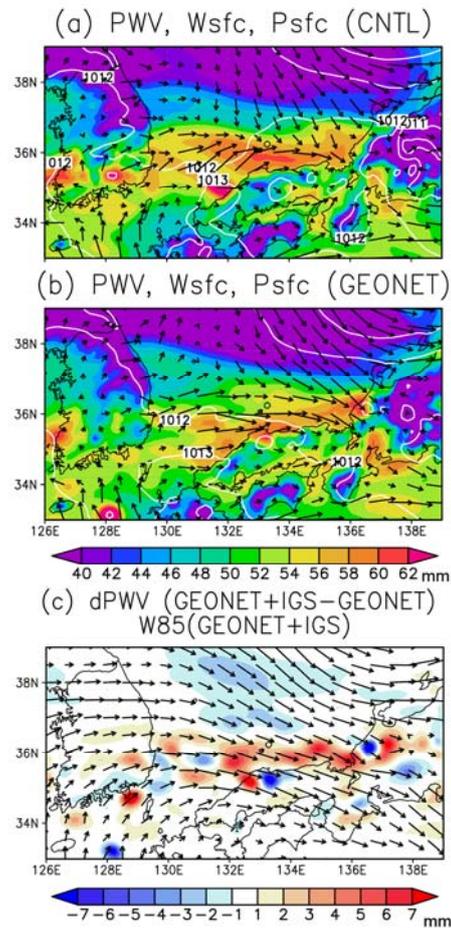


図 7 GPS 同化による解析場の PWV の違い。2008 年 7 月 28 日 09JST. (a)GPS 同化無、(b)国内 GPS を同化、(c)国外 GPS も同化した場合と、国内 GPS のみを同化した場合の PWV の差。矢印は (a) (b) が地上風、(c) は 850hPa。(Shoji et al. 2009)

データ同化により作成された初期場と、気象庁全球モデル(GSM)から作成した境界値を用い、格子間隔 10km の NHM で 18 時間予報を行った。GPS を同化することにより、15 時までの石川県～兵庫県にかけての強い降水が表現された。国外の GPS を用いると、より降水が強化された(図省略)。

近年、アンサンブルカルマンフィルタと呼ばれる同化手法の研究が精力的に行われている。Seko et al. (2011)は、この豪雨の事例について 20km 解像度のアンサンブルカルマンフィルタで GPS 可降水量を同化し、5km アンサンブル予報メンバーの中で表現の良かったものを抽出し、さらに 1.6km の雲解像モデ

ルによるダウンスケール実験を行った結果. 兵庫県南部に東西に延びるライン状の強雨の再現に成功している.

### (3) 那覇ガープ川豪雨に関する同化・予報実験

GPS 解析では衛星方向の視線遅延量(STD)を天頂方向に投影し, 推定パラメータを減らして解析していることを1節で述べた. 解析された ZTD にマッピング関数を適用し, さらに GPS 解析の残差を加えることで, 各衛星方向の STD を計算することができる. Shoji et al. (2004)は, STD には ZTD よりも細かなスケールの大気現象の情報が含まれていることを示唆している.

2009年8月19日14時頃, 沖縄県那覇市に直径数 km の小さな積乱雲が発生し, 市内を流れるガープ川で橋工事を行っていた作業員 5 名が流され, 4 名が亡くなる事故が発生した. この積乱雲は, 沖縄本島から南海上に伸びる長さ 100km, 幅 20-30km の線状降水帯の一部であった. 事故をもたらした積乱雲を, 直接予報することはもちろんのこと, それをもたらした線状降水帯も現在の数値予報システムで, 場所と時間を特定して予報することは難しい. 川畑ほか(2011)は, この線状降水帯を対象に, STD のデータ同化実験を水平解像度 2km の非静力学 4 次元変分法を用いて行い, PWV の同化よりもさらに大きな改善を得ることに成功した(図 8).

## 5. おわりに

気象庁, 気象研究所で取り組まれてきた GPS の解析や豪雨予報実験について紹介した.

GPS 掩蔽法は既に世界の高層ゾンデ観測数に匹敵する大気プロファイルを日々提供しているが, 今後も各国で衛星打ち上げが予定されており, 益々観測密度の充実が期待できる. しかし局地豪雨の予測に利用するためにはまだまだ観測数は不十分であり, さらなる掩蔽観測の充実が必要である.

地上 GPS 観測については, 船舶等移動体に設置した GPS で海洋の水蒸気を解析できれば, さらなる

予報精度の向上が期待できる. また, 人工構造物により視野の確保が難しい都市部での観測拡大が望まれる.

2010年9月に準天頂衛星「みちびき」の初号機が打ち上げられた. 地上 GPS 大気計測にとっては, これまで困難であったビル谷間などでの水蒸気解析精度の向上が予想され, 都市豪雨による災害軽減への貢献が期待できる.

衛星測位は“GPS”の時代から, 複数のシステムが利用可能なマルチ GNSS の時代へと変わりつつある. 今後も GPS, GNSS を用い, 天気予報の精度向上に向けた研究に精進したい.

## 引用文献

- Aoyama, Y., Y. Shoji, A. Mousa, T. Tsuda, and H. Nakamura, Temperature and Water Vapor Profiles Derived from Downward-Looking GPS Occultation Data, *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 433-440, 2004.
- Kato, T., and K. Aranami, Formation Factors of 2004 Niigata-Fukushima and Fukui heavy rainfalls and problems in the predictions using a cloud-resolving Model. *SOLA*, **1**, 14, doi:10.2151/sola.2005-001, 2005.
- 川畑拓矢・小司禎教・瀬古弘・斉藤和雄, 那覇ガープ川豪雨に関する同化・予報実験, 日本気象学会 2011 年度春季大会予稿集, A209, 2011.
- Seko, H., T. Miyoshi, Y. Shoji, and K. Saito, Data Assimilation Experiments of Precipitable Water Vapor using the LETKF system -An intense rainfall event over Japan 28 July 2008-. *Tellus*, **63A**, 402-412, 2011.
- Shoji, Y., H. Nakamura, T. Iwabuchi, K. Aonashi, H. Seko, K. Mishima, A. Itagaki, R. Ichikawa, and R. Ohtani, Tsukuba GPS dense net campaign observation: Improvement in GPS analysis of slant path delay by stacking one-way postfit residuals. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82(1B)**, 301-314, 2004.
- Shoji, Y., A Study of Near Real-time Water Vapor Analysis using a Nationwide Dense GPS Network of Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 1-18, 2009.
- Shoji, Y., M. Kunii, and K. Saito, Assimilation of Nationwide and Global GPS PWV Data on Heavy Rainfall in the 28 July 2008 Hokuriku and Kinki, Japan, *SOLA*, **5**, 45-48, 2009.
- 小司禎教・國井勝・斉藤和雄, 2009年7月21日山口豪雨のGPS可降水量同化実験(序報). 第11回非静力学モデルに関するワークショップ講演予稿集. F-2, 2009.
- 吉原貴之, 藤井直樹, 斎藤真二, 酒井文泰, 松永圭左, 航空機からの GPS 掩蔽観測による大気屈折率計測, *電子情報通信学会論文誌*, **J89-B**, 1233-1241, 2006.

1

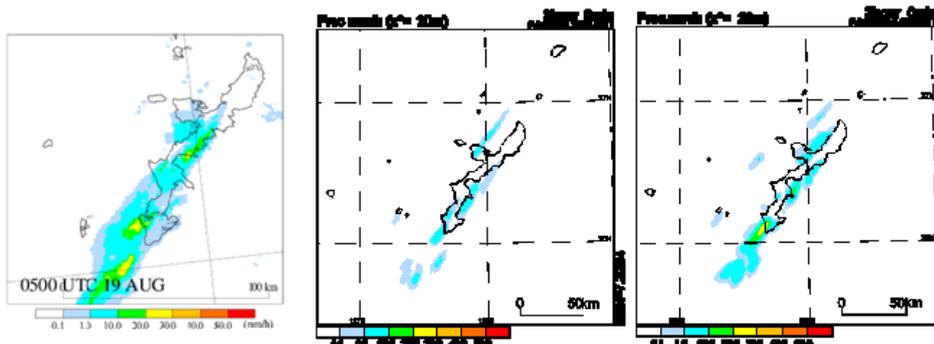


図 8 8月19日 14JSTにおける1時間降水量。(a) 解析雨量、(b)PWVを同化、(c)STD (視線遅延量)を同化 (川畑ほか 2011)