地学雑誌　Journal of Geography（Chigaku Zasshi）　128（1）31–47 2019　doi:10.5026/jgeography.128.31

暖候期の中部山岳における総観規模擾乱に応じた降水分布と衛星降水量の比較

上野健一[*]　三戸航[**]　金井隆治[***]
上治雄介[***]　井波明宏[***]　鈴木啓助[****]
小林元[*****]　玉川一郎[******]
山本宗尚[*******]　重尚一[*******]

Distribution of Precipitation Depending on Synoptic Scale Disturbances with Satellite Estimate Comparisons in the Japanese Alps Area during Warm Seasons

Kenichi UENO[*], Wataru MITO[**], Ryuji KANAI[***],
Yusuke UEJI[***], Akihiro INAMI[***], Keisuke SUZUKI[****],
Hajime KOBAYASHI[*****], Ichiro TAMAGAWA[******],
Munehisa K. YAMAMOTO[*******] and Shoichi SHIGE[*******]

［Received 13 February, 2018; Accepted 11 July, 2018］

Abstract

Gauge-based hourly precipitation data during the 2015–2016 warm seasons in central Japan observed with the Japan Meteorological Agency AMeDAS network and the Japanese Alps Inter-University Cooperation Project（JALPS）mountain observation network are archived. Gauge data are compared to satellite precipitation data（GSMaP_MVK and GPM/DPR）produced by Japan Aerospace Exploration Agency. The distributions of precipitation measured in gauges depend on synoptic scale disturbances showing areas of regional increases/decreases affected by large mountain ranges without year-to-year variability, except for a composite of typhoon cases. Differences in precipitation amounts are less than 2 mm/d depending on satellite product version or timing of passive microwave observations. Larger precipitation amounts of GSMaP_MVK estimated at more than 2 mm/d are distributed over inner mountain areas and northern coastal areas along the Sea of Japan, and larger amounts of gauge-measured precipitation are distributed in central Gifu and Shizuoka Prefectures. The underestimate of local sporadic heavy

[*] 筑波大学生命環境系
[**] 筑波大学生命環境科学研究科
[***] 筑波大学山岳科学センター
[****] 信州大学理学部
[*****] 信州大学農学部
[******] 岐阜大学流域圏科学研究センター
[*******] 京都大学大学院理学研究科
[*] Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, 305-8572, Japan
[**] Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, 305-8572, Japan
[***] Mountain Science Center, University of Tsukuba, Tsukuba, 305-8577, Japan
[****] Faculty of Science, Shinshu University, Matsumoto, 390-8621 Japan
[*****] Faculty of Agriculture, Shinshu University, Kamiina, 399-4598, Japan
[******] River Basin Research Center, Gifu University, Gifu, 501-1193, Japan
[*******] Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto, 606-8502, Japan

precipitation in mountainous areas obtained from GSMaP_MVK data was expected depending on shallow convections. Further strategies are discussed for conducting case studies to reveal the causes of discrepancies between gauge-measured and satellite-indicated precipitation.

Key words：satellite precipitation, GSMaP_MVK, Japanese Alps region, satellite data validation, synoptic scale disturbances
キーワード：衛星降水量，GSMaP，中部山岳域，衛星データ検証，総観規模擾乱

I. はじめに

日本の山岳域における降水量および降水形態は，複雑地形とアジアモンスーン域で卓越するさまざまな擾乱（温帯低気圧，台風，梅雨前線，冬季季節風による雪雲など）の影響を受け，世界でも有数の多様な分布と極端な変動を示す（小倉, 2015）。降水量変動は，森林や積雪域の分布変化を介して陸面状態の長期変化に重要な役割を果たし，下流域への水資源供給または災害発生にも影響を及ぼす。卓越する気象擾乱ごとに降水量の分布特性を把握し，変動幅が大きな地域を特定することは，山岳域での天候変動を評価するための重要な課題となっている。

山岳域の降水量分布は雨量計や気象レーダーにより把握される場合が多いが，両者が観測する物理量は異なる（上野, 2001）。水蒸気の凝結高度は擾乱や雲システムによりさまざまで，生成された降水粒子は蒸発・併合しつつ落下し，さらに地上風速の強弱で再配分される。地上風速は地形起伏や雨量計近傍の障害物の影響を強く受ける。その結果，雨量計そのものが計測する降水現象の時空間代表性も刻々と変化し，とくに固体降水の場合は捕捉率の低下が深刻な問題となる（中井・横山, 2009）。したがって，ある程度時間積算をしないと空間的に代表的な降水量を得ることはできない。複数の雨量計を数 km 間隔で分布させることで，小流域スケールでの分布傾向や降水強度の短時間変動を把握することができる。山田ほか（1995）は山岳斜面の降雨特性に標高依存性があることを夕張岳，御在所，尾鷲での雨量計観測から明らかにしている。しかし，多くが森林・急斜面で構成される日本の山岳域では，主要な河川やダム管理域を除いて，現実的に雨量計による観測網には多数の空白域が存在する。

気象レーダーによる観測は，これらの空白域を埋める利点をもち，不均一な降水強度の面的情報をリアルタイムで把握することで，防災情報にも活用されている。レーダーの計測技術の発展は目覚ましく，近年整備されたマルチパラメータレーダーにより，降水量強度の推定精度が向上している（佐藤, 2007）。レーダーアメダス解析雨量はレーダー観測値を雨量計の値で補正して空間的に均一な降水量データを提供するとともに，ナウキャストとして天気予報に活用されている。一方で，地上配備型の気象レーダーでは，レーダービームに対する山影や遠方での降雨減衰により観測誤差が大きくなり（新保, 2001），山間部での降水量分布がどれだけ正確に観測されているかは未解明の点が多い。

海上も含む全球規模の降水量変動を衛星から推定する試みは，1980 年代から開始されている。静止衛星に搭載された近赤外による降水指標や簡易的な一次元降水モデルを組み合わせた月降水量推定に始まり（Arkin and Meisner, 1987; Adler and Negri, 1988），その後，マイクロ波放射計搭載衛星による直接的な水文量の観測時代に入り，さまざまなアルゴリズムの比較検証が始まる（Ebert and Manton, 1998）。1998 年に打ち上げられた熱帯降雨観測衛星（Tropical Rainfall Measuring Mission; TRMM, Kumerrrow *et al*., 1998）にははじめて降雨レーダー（Precipitation Radar; PR）が搭載され，熱帯海洋上の降水量の年々変動や，亜熱帯の海岸や大山脈に沿った著しい降

水量の日変化の存在が明らかとなった（例えば，Hirose and Nakamura, 2005）。降雨レーダーは直下の水文量を太陽非同期で測定するため，日変化が顕著で地上降水レーダーではとらえることが困難な複雑地形上の降水量変動を，どれだけ正確に把握しているかに注目が集まっている。降雨レーダーによる能動型観測値はマイクロ波放射による受動型観測値の検証に利用され，さらに静止衛星近赤外画像から得られる雲移動ベクトルを組み合わせることで時間スケールの衛星降水量の推定アルゴリズムが構築された（Joyce *et al*., 2004）。2014 年には TRMM 後継機となる二周波降水レーダー（Dual-frequency Precipitation Radar; DPR）を搭載した Global Precipitation Mission（GPM）主衛星が，日本を含む高緯度観測を開始した。DPR は Ku 帯（13.6 GHz）に加えて Ka 帯（35.5 GHz）のレーダーを搭載し，弱い雨や雪の検出精度向上に期待がかかっている。宇宙航空研究開発機構（JAXA）では，GPM 計画（Hou *et al*., 2014）の一環として，複数のマイクロ波搭載衛星および静止気象衛星のデータを利用して，全球規模で準リアルタイムの時間降水量データ（Global Satellite Mapping of Precipitation, GSMaP）の提供を開始している（Kubota *et al*., 2007）。同データにより，列島近傍を通過する総観規模擾乱に伴う地上レーダー観測網のみではとらえることができない海洋上も含む雨域の移動を把握することができ，従来の雲域に雨域の情報も付加した天候変化を全球規模で把握することができる[1)]。

衛星降水量を使って土砂災害の潜在性を全球的に分析する試みも開始されるなど（Hong *et al*., 2006），山岳域での衛星降水量活用に対する期待は高い。一方で，山岳域では衛星降水量と地点降水量に不一致や過小評価がみられることも指摘されている（Bookhagen and Burbank, 2006; Dinku *et al*., 2008）。Yamamoto *et al*.（2011）はネパールヒマラヤでの地点降水量と衛星降水量との比較から，同域の日変化を伴う降水量の再現性が一つの課題ととりあげている。日本でも Kubota *et al*.（2009）が，紀伊山地や四国山地といった南岸に沿う大山脈周辺で GSMaP_MVK（Motion Vector with Kalman filter）データとレーダーアメダス雨量の間に大きな不一致（過小評価）が生じていることを示している。Shige *et al*.（2013）は下層の強制上昇による地形性降水の増加を考慮した降水量の補正手法を提案し，Yamamoto and Shige（2015）により近年の GSMaP_MVK プロダクトに反映されている。擾乱に対する地形の影響は一概に強制上昇だけではなく（Houze, 2012），どのようなタイプの地形性降水で衛星降水量が過小・過大評価を引き起こすかに関して，今後の研究の進展が期待されている。一方，GSMaP_MVK データを全球で公開されている NOAA Climate Precipitation Center（CPC）日降水量データ（Xie, 2010）で補正する GSMaP_Gauge データも作成された（Ushio *et al*., 2013）。Takido *et al*.（2016）は同データが GSMaP_MVK データに比べて地上降水量の再現がよい一方，高標高域では降水頻度に差があることを利根川流域において示している。大陸規模でみた GSMaP データの季節性や他の衛星推定プロダクトとの比較も進められている（Tian *et al*., 2010; Satgé *et al*., 2017）。海外の遠隔地で GSMaP データがどの程度有用かを明らかにするためにも，地上データが充実し，多様な降水擾乱やそれに対する地形の影響が卓越する国内山岳域で比較研究を行う意味は大きい。

中部山岳地域の環境変動の解明から環境資源再生を目指す大学間連携事業（通称 JALPS）が筑波大学・信州大学・岐阜大学の連合で 2010–2014 年に実施された。この事業は 4 つの研究グループから構成され，気候変動解析グループでは中部山岳域の天候変動に関する古気候復元・極端気象の発生・ダウンスケーリングによる将来予測に関する多くの成果が生み出された。同時に，複数大学が管轄する山岳域の気象観測地点のデータを収集し，プロジェクト内で共有して比較解析を開始する JALPS 気象データアーカイブ・プロジェクトが始動した（上野ほか, 2013）。本研究では，2015–2016 年の暖候期（5–10 月）に中部山岳域で気象庁アメダスおよび JALPS 観測網にて観測された降水量分布が総観規模擾乱ごとにどのよう

表 1　図 1 に示された対象エリアごとの JALPS 降水量観測地点リスト.

Table 1　List of JALPS precipitation observation sites with location areas shown in Fig. 1.

エリア	地点名	標高（m）	経度	緯度
1	志賀高原センター	1620	138.49536	36.71097
1	根子岳山頂臨時開設サイト	2207	138.39517	36.54913
1	根子岳中腹臨時開設サイト	1750	138.37760	36.54232
1	筑波大学菅平高原実験センターサイト	1320	138.34722	36.52361
2	燕岳	2634	137.71517	36.39917
2	槍ヶ岳	3079	137.64556	36.34019
2	上高地ステーション	1530	137.66828	36.25350
2	岐阜大学流域圏科学研究センター	1342	137.42233	36.14248
2	乗鞍高原ステーション	1450	137.62981	36.12219
2	乗鞍・富士見岳	2763	137.55756	36.12050
2	乗鞍休暇村	1590	137.61261	36.11325
3	八ヶ岳演習総合気象	1400	138.45694	35.95806
3	八ヶ岳演習林内総合気象	1500	138.46972	35.94389
3	川上演習林総合気象	1500	138.49972	35.91944
4	手良沢山ステーション	990	138.04722	35.88750
4	西駒ステーション	2672	137.83181	35.80661
4	中央アルプス千畳敷	2630	137.81403	35.77767
5	切通し	1128	138.22528	35.34111
5	井川演習林総合気象 I	1175	138.22667	35.33167

な分布特性があるかを明らかにする。これらを GPM/DPR, GSMaP 衛星降水量データと比較し，現段階で雨量計観測値とどの程度の差異があるかを示し，今後のデータ蓄積に伴う比較検証解析の方針に関して議論する。

II. データアーカイブと比較解析

本研究の解析対象地域は，中部山岳域を含む北緯 34.5–37.5°, 東経 136.5–139.5° とした。上野ほか（2013）は，同領域内で筑波大学・信州大学・岐阜大学が管轄する山岳気象観測データを 2006 年から収集し，統一フォーマットに編集したデータセット（JALPS 気象データアーカイブ）を構築している[2)]。本研究では，このデータアーカイブを継続し，表 1 に示した観測サイト 19 地点にて，GPM ミッション開始後の 2015 年，2016 年の降水データを収集した。このデータに観測地域内の気象庁アメダスデータ（118 地点）を加えた二年分の暖候期（4–10 月）の地点データを，地上観測降水量として使用した。JALPS の 7 地点の降水量データには，4 月および 10 月に部分的な欠測期間がある。同期間には梅雨や台風による大雨は生じにくく，地点数も少ないため，欠測値は補完していない。図 1 に解析対象領域内の地形および JALPS/AMeDAS 観測地点の分布を示す。

衛星降水量には，宇宙航空研究開発機構（JAXA）が作成し公開している GSMaP_MVK データ（Kubota *et al*., 2009; Ushio *et al*., 2009），および GPM 主衛星に搭載された DPR から見積もられた地上降水強度データ（二周波 ns プロダクト，以後 DPR データと呼ぶ）を使用した。GSMaP_MVK データでは，全球の 1 時間降水量を 0.1° 格子間隔で推定している。GSMaP_MVK は，数時間間隔でマイクロ波放射計により推定される降水強度および降水域（Aonashi *et al*., 2009）を，静止気象衛星の熱赤外バンド合成輝度温度データから算出した雲移動ベクトルによって移動させ時間値データを作成している。移動ベ

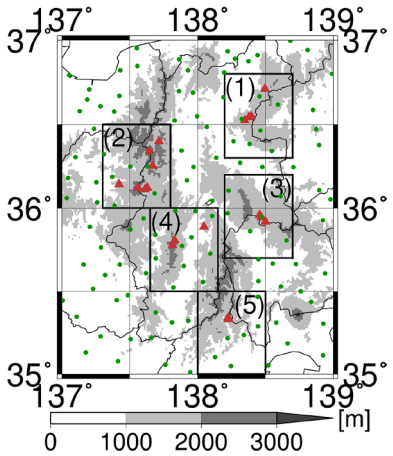

図 1　対象地域の地形．アメダス観測地点は緑，JALPS 観測地点は赤のマーカで示す．地形は国土交通省が提供する国土数値情報[3] の標高データを用いて描いている．標高は白黒（単位は m）で，1–5 の黒枠は JALPS 観測地点を含むエリア番号を示す．

Fig. 1　Topography of target areas, based on National Land Numerical Information by the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism via the Internet, with AMeDAS (green dots) and JALPS (red dots) precipitation observatories. Shading indicates elevation (m), and five areas (1–5) are set around JALPS observatories.

クトルによる雨域の移動計算は，マイクロ波放射計の通過後に順時間方向と逆時間方向の双方について行い（Joyce *et al*., 2004），最終的なデータは双方向による推定値の平均をとっている。さらにカルマンフィルターにて，移動ベクトルによる移動後の降水量に対して赤外輝度温度と降水量の統計的な関係（月単位，10°C ごとのノイズテーブルを用いたカルマンフィルター）から推定値を補正している（Ushio *et al*., 2009）。本研究では，東経 137° から 139°，北緯 35° から 37° の 2° × 2° の領域で，プロダクトバージョン 6，7 の 2 種類のバージョンを 0.1° 間隔で 4 月から 10 月のデータを 2015 年，2016 年の 2 年分収集した。GSMAP_MVK データはアルゴリズムの変更によりバージョンが変更されるため，まず，バージョン変更に伴う降水分布の変化を把握した。アルゴリズムバージョンが V6（プロダクトバージョン 03）から 2017 年 1 月に V7（プロダクトバージョン 04A）へ移行した。V6（03）では TRMM/PR によるデータベースを使用していたが，V7（04A）では GPM/DPR（Ku）を利用したデータベースを使用している。同時に，降水タイプ分類データベースを温帯低気圧と停滞前線に細分している。また，地形性の強制上昇に伴う降水量補正が，より適切な地域で適用されるよう修正されている（Yamamoto and Shige, 2015）。DPR データは衛星通過経路ごとに収集し，観測頻度とともに集計して GSMaP_MVK データの平均値と比較した。二周波 ns プロダクトには，Ku，Ka の二周波の観測が行われた領域には二周波のアルゴリズムを適用した降水量，Ku しか観測が行われなかった領域には Ku 一周波による降水量が記録されている。

本研究では，まず 2 年分の地上降水量にみられる総観規模擾乱別の分布特性を明らかにした。次に，同期間中の衛星データにみられるバージョンアップの影響，GSMaP_MVK データにおける静止衛星推定の有無，GSMaP_MVK と DPR の差異を示し，地上降水量と衛星推定値を総観規模擾乱別に明らかにした。

III. 地上観測雨量にみられる総観規模擾乱ごとの分布特性

対象期間の 2 年間の平均地上降水量分布を図 2 に示す。GSMaP_MVK データは 0.1° 単位の緯度経度格子点で構成されている。図上の降水強度もこの空間分解にあわせるために，図上の降水強度もスプライン補完を用いて 0.1° に内挿し，日単位（mm/d）で格子点状にカラースケールで示している。図 2 をみると，図中の南に位置する愛知県北東，静岡県中部・西部，および岐阜県中部に多降水域が分布する。さらに内陸にかけては主要な大山脈にそって降水量は増加し，木曽・飛騨山脈の西側斜面，越後山脈から関東山地の東側で降水量が増加している。一方，甲府盆地，上田・松本・長野盆地といった低地では降水量が少ない。これらの降水量分布は，総観規模擾乱ごとに卓越する下層風系と主要山脈の位置関係に依存して合

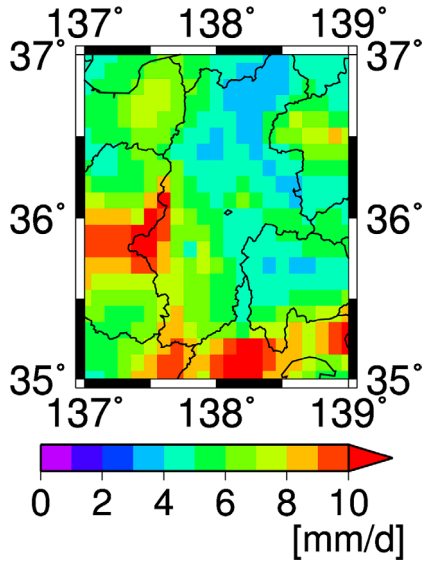

図 2　2015–2016 年の暖候期における AMeDAS および JALPS 地点を使った平均地上降水量分布.

Fig. 2　Averaged precipitation distribution (mm/d) for 2015–2016 warm seasons as measured with the AMeDAS and JALPS gauge networks.

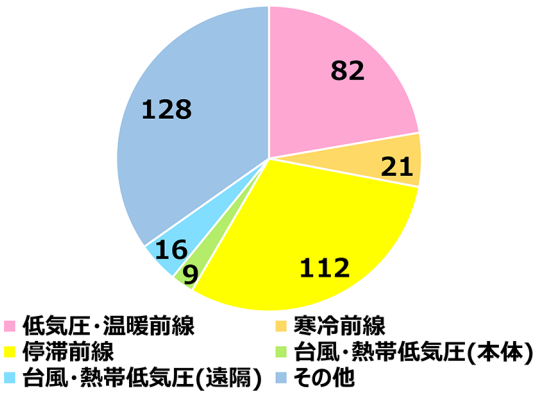

図 3　降水をもたらした擾乱の出現頻度．円内の数値は分類された日数を示す.

Fig. 3　Frequency (days) of synoptic weather patterns with precipitation.

成されたと考えられる。

そこで，総観規模擾乱別に降水量分布を作成した。まず，領域内のいずれかの地点で 0.5 mm/h 以上の降水が発生した日に関して，午前 9 時の気象庁地上天気図で卓越する主要な総観規模擾乱を判定した。擾乱は，吉崎・加藤（2007）を参考に津口・加藤（2014）が分類した 6 種類とした。

(1) 低気圧・温暖前線：低気圧の中心または温暖前線から解析対象地域の距離が 500 km 以内の日

(2) 寒冷前線：前線からの距離が 200 km 以内の日

(3) 停滞前線：前線からの距離が 500 km 以内の日

(4) 台風・熱帯低気圧（本体）：台風，または熱帯低気圧の中心からの距離が 500 km 以内の日

(5) 台風・熱帯低気圧（遠隔効果）：台風，または熱帯低気圧の中心からの距離が 500 km 以上，1500 km 以内の日

(6) その他：以上のいずれにも分類できない日

判定した総観規模擾乱が同一の地上天気図に複数存在していた場合，台風・熱帯低気圧（本体），または台風・熱帯低気圧（遠隔効果）を優先した。さらに，寒冷前線を伴う低気圧が存在した場合は，(1)の条件を優先することで同一日が複数の降水擾乱に分類されないようにした。図 3 に擾乱の卓越頻度を日数の円グラフで示す。降水日数が最多となったのは，主要な総観規模擾乱が卓越しなかった“その他”であった。このような日にどのような降水が生じていたかは本章の後半で説明する。二番目に卓越した擾乱は停滞前線および温暖前線を伴う温帯低気圧であった。台風の影響を受けた降水日は総数に比べると少ないことがわかる。

次に，総観規模擾乱別の地上降水量分布を図 4 に示す。温帯低気圧は岐阜県中部および静岡県を中心に降水をもたらしている。停滞前線も同様の地域で降水量が増加していることがわかり，図 2 の極大域形成と重複する。岐阜県中部ではおもに御嶽山，萩原，宮地のアメダス観測地点での多降水が寄与している。これらの極大域の形成には，温帯低気圧通過時の暖域に南西から侵入する温暖コンベアーベルト（Browning, 1997）と，この流入経路に影響を及ぼす南岸の地形および主要山

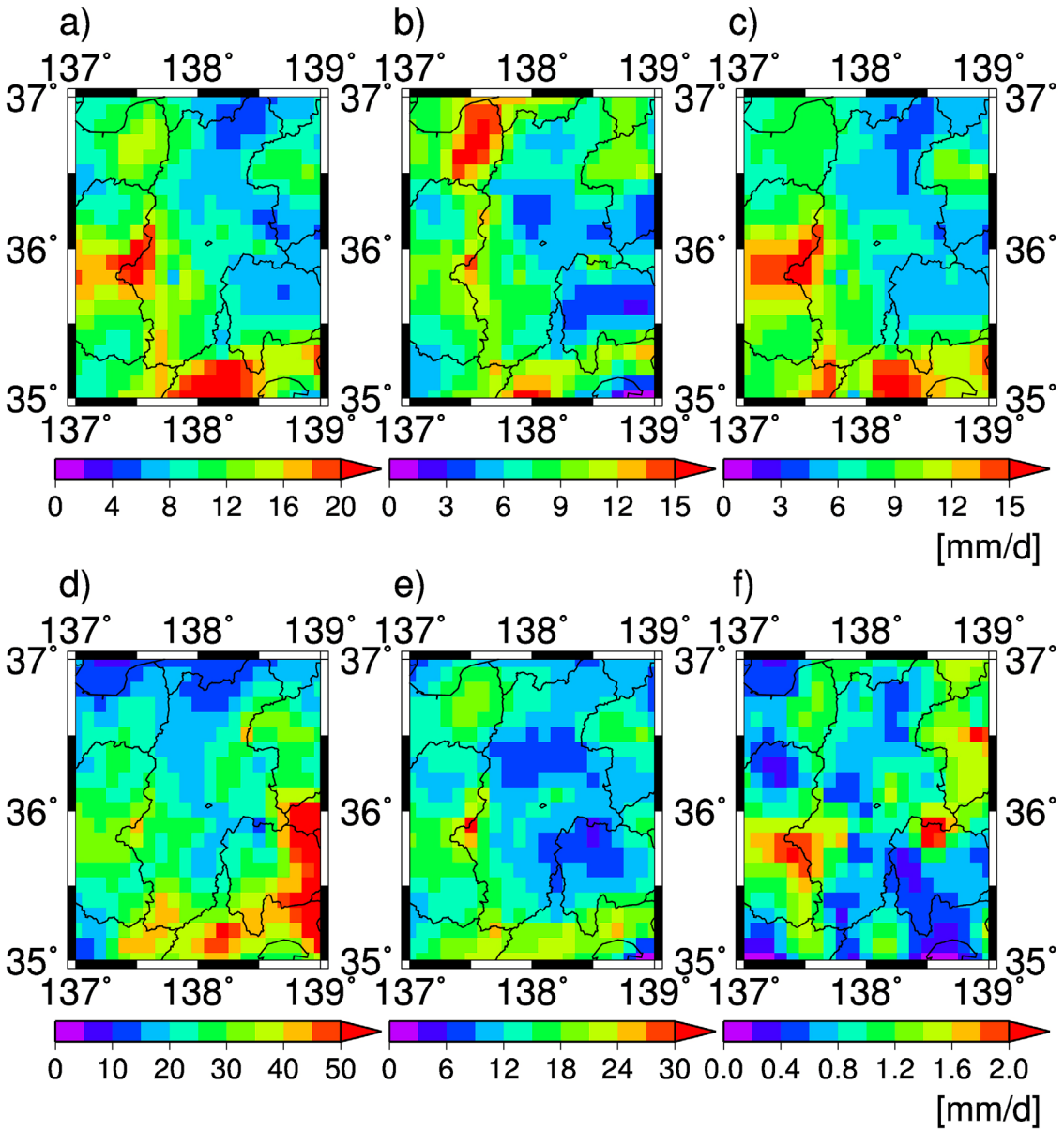

図 4　総観規模擾乱別にみた日平均地上降水量分布．a）温帯低気圧・温暖前線，b）寒冷前線，c）停滞前線，d）台風・熱低気圧（本体），e）台風・熱帯低気圧（遠隔効果），f）その他，に対応する．凡例の数値の単位は mm/d で，図により最大値が異なることに注意．

Fig. 4　Daily averaged gauge-measured precipitation distribution depending on synoptic disturbances, such as a) extratropical cyclone and warm fronts, b) cold fronts, c) stationary fronts, d) typhoon and tropical cyclone (direct effects), e) typhoon and tropical cyclone (indirect effects), and f) others. Legend scale of changes depends on disturbances.

脈の走向が寄与していると考えられる。一方，寒冷前線通過時には富山県山間部で降水量が増加し，日本海側から侵入する前線に沿った西風に対する木曽・飛騨山脈の地形の効果が関与していると考えられる。台風による降水量分布は降水強度は大きいものの静岡県南西部および関東山地以東に限定されている。対象とした 2015，2016 年の天気概況をみたところ，2015 年は 9 月に台風 18 号，および台風 17 号による南～南東の湿った空気が流れ込み続けた影響で多数の線状降水帯が次々に発生したことによって関東・東北豪雨が発生し，降水量は東日本太平洋側で平年よりも多かった。一方 2016 年は東日本で 7 月に梅雨前線の活動が弱く降水量が少なかったが，台風の接近・上陸数が多く，とくに 8 月には 4 つの台風が上陸した。その結果，年平均日降水量をみると 2015 年に比べ 2016 年は太平洋沿岸（日本海側，とくに芦峅寺付近）で 1–2 mm 程度の減少（増加）がみられ，その主要な要因が図 3 の台風時の降水量分布の年による違いであった（図省略）。一方，内陸では際立った降水量の差はみられなかった。言い換えれば，台風以外の擾乱に関しては降水量分布に年による際立った違いはみられず，天気図から判別される気圧配置によってどの地域で雨が降りやすいかが図 4 により表現されたことになる。

次に，“その他”に分類された日の降水分布をみる（図 4f）。日平均降水量は他の擾乱のものに比べて少ない。しかし，V 章で述べるように，時間降水量でみた場合局所的な大雨が発生している日も多く含まれる。極大域は山岳域に集中しており，JALPS 観測地点でも検知されることが多かった。発生日を調べると 6–8 月に頻発しており，移動性高気圧時に上空に寒冷渦が侵入している日や，オホーツク海高気圧からの北東気流卓越時も含まれていた。下層が対流性不安定で陸面加熱に伴う局所的な熱雷に伴う積乱雲など，日平均降水量としては他の擾乱に比べて降水強度が弱いが，山岳域特有の局所的な短時間強雨事例も含まれているものと考えられ，V 章で衛星降水量での再現性を分析した。

IV. 衛星降水量と地上降水量の分布比較

GSMAP_MVK データにはアルゴリズムの変更により異なるバージョンが存在する。本章では，まずバージョンアップにより衛星降水量そのものにどの程度の差異が生じるかを把握したのちに，地上降水量との違いを議論した。同一期間でバージョンの変更に伴う平均降水量の差をみると（図 5a），対象領域の南部で 1 mm/d 以上の降水量の増加がみられた。これらの領域は総観規模擾乱通過時に南～南西方向からの下層湿潤大気が山岳域に侵入する前面に相当し，地形性強制上昇に伴う降水量増加補正が機能した可能性がある。この増加量はアルゴリズムバージョン 6 の領域平均降水量（6.7 mm/d）の約 2 割に相当する。正偏差領域が図 4 の台風による極大域とも重複するため，台風日のみで V7 と V6 の違いを把握したが，図 5 の正偏差が台風による降水に依存して発生しているとは限らなかなった。GSMaP_MVK にはマイクロ波放射計で直接観測された時間帯と，静止衛星データから推定された時間帯のデータが混在する。両時間帯での降水量の差を把握するために，V6，V7 両データに関して，衛星搭載マイクロ波放射計での観測時刻のみのデータ（PMW）と GSMAP_MVK 全データとの差を調べた。V6 では両データにほとんど差がなかったが（図省略），V7 では長野県中部から群馬県西部にかけて 1 mm/d 程度の増加がみられた（図 5b）。この差は，バージョンによる差以下ではあるが，低地上空で再発達する降水システムが静止衛星情報による雨域移動で十分再現できていない可能性もあり，今後，要因分析が望まれる。

次に衛星降水量（図 6 ）を地上降水量（図 2 ）と比較する。ここで比較対象とした衛星降水量は，GSMaP_MVK データ（MVK_V7）のほかに，同データ中でマイクロ波衛星観測時刻のみのもの（PMW），通過頻度は少ないが 2 年間の DPR で直接観測された地上降水強度データ（GPM_DPR），も採用した。まず，GSMaP_MVK データは，PMW の観測の有無で大きな違いはなく，PMW 観測値のみ（図 6b）の方が静止衛星データも利

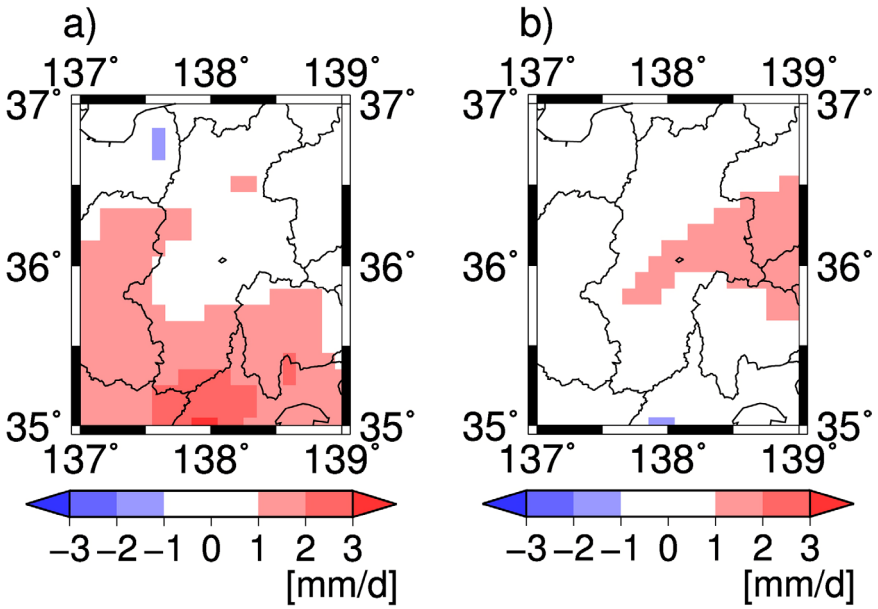

図 5　a）アルゴリズムバージョン V7 から V6 を差し引いた暖候期平均降水量（mm/d），b）V7 においてマイクロ波観測が行われた時刻と全時間帯での観測データの差.

Fig. 5　Differences in daily precipitation from a）GSMaP_MVK V7 minus V6, and b）time slots of passive microwave observation minus all periods for GSMaP_MVK V7.

用した全データ（図 6a）より極大･極小域の振幅が増加している。これは，マイクロ波観測値のみの推定の方が，より降水量の増減の幅を地上降水量に即して再現することを示している。地上降水量データ（図 2 ）と全 MVK データ（図 6a）を比べると，図中の南部および西部で降水量が増加するという傾向は一致し，飛騨山脈・木曽山脈の西側および明石山脈の南側の雨量計による降水量増加を再現している。一方内陸の降水変動は平坦で，地上降水量にみられる長野県北部および山梨県中部の低地で降水量が減少し，越後山脈南部で増加するという傾向は再現できていない。両者の差（MVK-Ground）をみると（図 6d），岐阜県中部，静岡県山間部および群馬県中西部で局所的に降水量が過小評価する地域が存在し，それ以外の山岳域や日本海側では降水量が過大評価となっている。その差は 2 mm/d 以上で，衛星データのプロダクトバージョンによる違いや，PMW 観測の有無による違いより大きい。栗林ほか（2019）は御嶽山で多降水が観測される一方，6 月の降水量が有意に長期的減少傾向を示しているとしており，衛星データの過小評価も含め同地域周辺での集中観測が望まれる。

DPR データ（図 6c）の降水量分布は，MVK の分布の極大・極小をより強調した分布を示している。飛騨・木曽山脈の西方および赤石山脈以南で 10 mm/d を超える極大域が発生し，長野県中部から関東平野北部で 3 mm/d 以下の極小値が出現している。DPR の観測頻度は対象期間中に最多で 128 回，最少では 104 回と，GSMaP_MVK 全シーンが 10272 回であるのに対して極端に少ない（1％に相当）。DPR の観測回数に対する降水記録回数の割合の分布図（図省略）と図 6d を比較するとパターンが類似することから，平均値の分布が比較できるだけの DPR データの蓄積が十分でないために，図 6d のような極端な差異が再現されたと考えた。V 章でとりあげるように DPR では GSMaP_MVK でとらえることができ

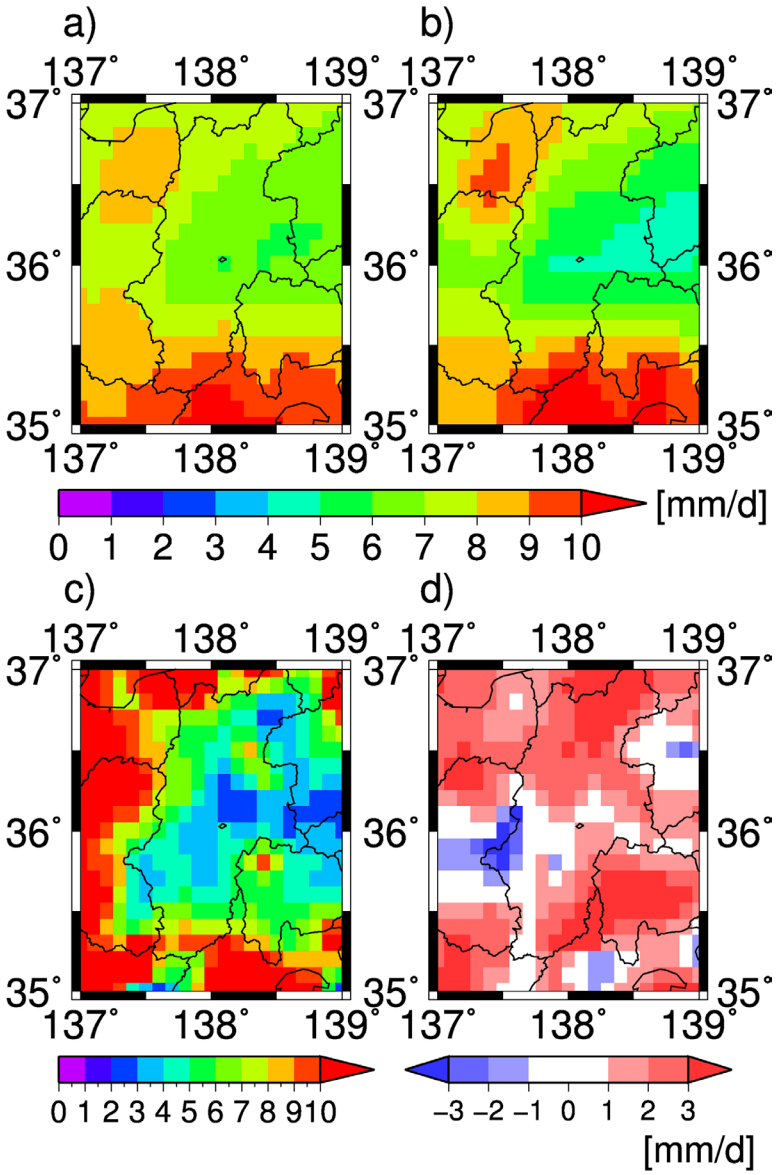

図 6　a）GSMaP_MVK，b）マイクロ波放射計観測時間帯のみの GSMaP_MVK，c）GPM/DPR，d）GSMaP_MVK データから図 2 の地上降水量を差し引いた差，いずれも単位は mm/d.

Fig. 6　Averaged satellite precipitation（mm/d）for a）GSMaP_MVK V7, b）GSMaP_MVK V7 only for passive microwave observation time slots, c）GPM/DPR, and d）gauge-measured precipitation（Fig. 2）minus GSMaP_MVK V7.

ない局所降水を検知することが可能である。しかし，TRMM による熱帯域の降水量分布図が少なくとも 10 年以上の平均値で示される（例えば，Hirose and Nakamura, 2005; Liu, 2015）ことを考えると，現時点では DPR データは事例解析での活用が望ましい。

次に MVK データに関して総観規模擾乱別に降水量を平均した（図 7）。まず，雨量計データで

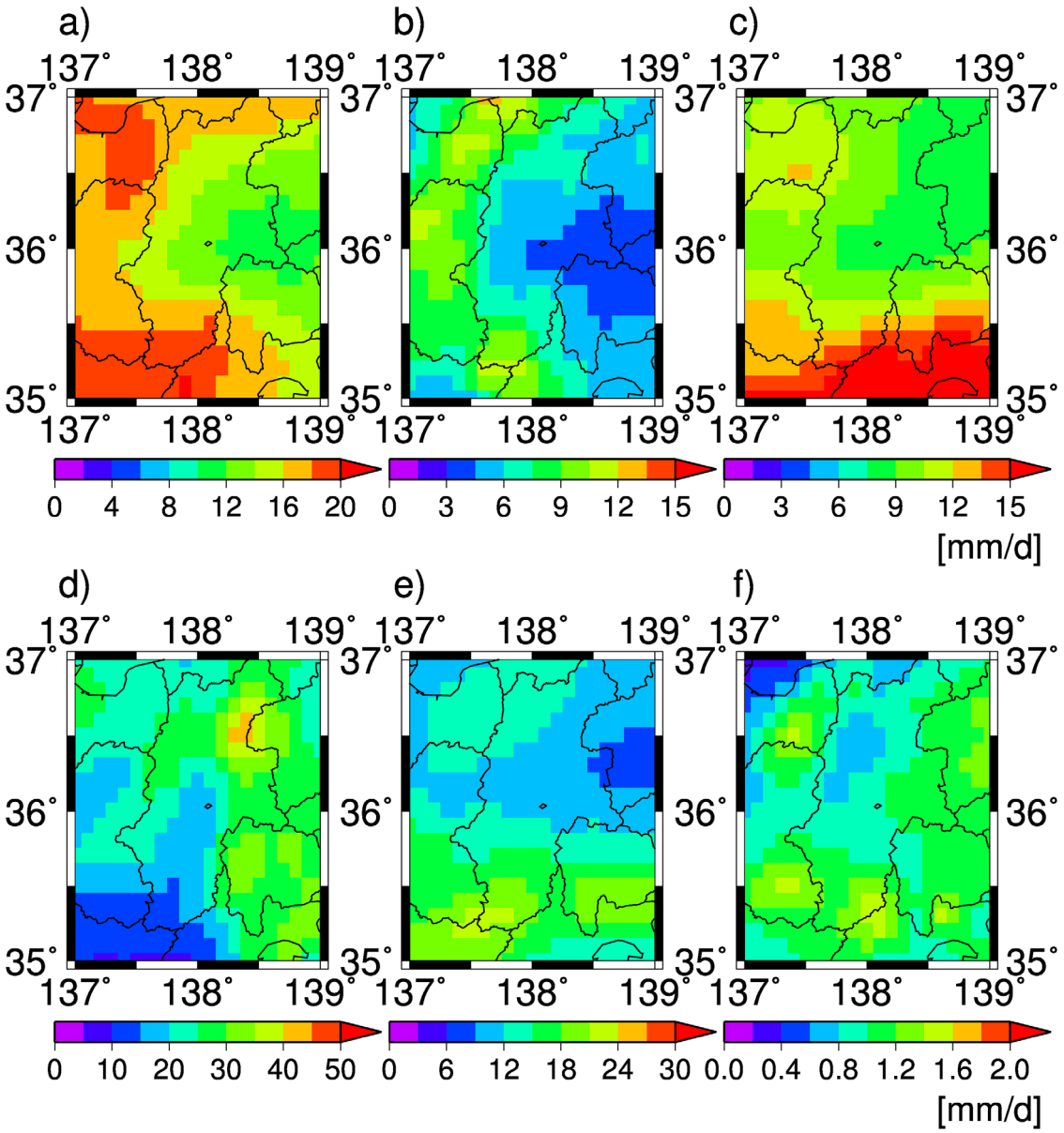

図 7　図 4 と同様，ただし衛星降水量（GSMaP_MVK V7）を使用した場合.

Fig. 7　Same as Fig. 4 except for GSMaP_MVK V7 data.

は複数の擾乱に関して共通にみられる岐阜県中央付近から長野県県境にかけた極大域が衛星データではいずれも検知されていない。同地域は JALPS 山岳観測地点からも外れており，今後，周辺山岳域も含めた集中観測と不一致事例に関する分析が望まれる。温帯低気圧による降水量が北西部および南西部で衛星データの方が極端に降水量を多く再現しており，台風通過時には雨量計で観測され

た関東山地付近の降水量増加が衛星では検知されていない。また，寒冷前線やその他に関しては，相対的な分布は似ているが衛星データの方が極大域で過小評価されている。JALPS 観測地点を含む主要山岳域を 5 つ設定し（図 1），各地点内の雨量計とその近傍格子点での日降水量の差を平均し，差が大きい順に順位付けをして日付とともに図 8 にまとめた。その時の卓越擾乱も付記してある。これらをみると，衛星データの方が過大となった日と，過小となる日では擾乱の種類に大きな違いがあることがわかる。まず，衛星データの方が過大となった日は明らかに温帯低気圧通過日に生じており，どのエリアにも共通して高順位となった日が存在する（図 8 の灰色日）。また，地域 4，5 といった南西域では停滞前線により降水量が過大となった日もみられた。つまり，図 6d でみられた衛星データが過大となる日は，低気圧通過に伴い広域で MVK データが多量の降水を推定している可能性がある。一方，衛星データが過小となった日をみると，総観規模擾乱はさまざまで，エリア 2，3 ではその他に分類される日も含まれる。停滞前線や台風により多地点で過小評価が生じている日もあるが，一般的には各領域での過小となる日が個別に生じている場合が多い。これは，衛星データが地域ごとに生じている小規模の多降水を見逃していることで過小評価を生んでいることを示唆している。

V. 山岳域での局所降水

その他に分類された日に関して，DPR 観測が JALPS 観測領域で実施された日を抽出したところ，2015 年 6 月 21 日 22 時半に木曽山脈および長野県中部で顕著なメソ降水域を DPR が検知していることがわかった（図 9a）。同時刻帯の木曽山脈，千畳敷および乗鞍での JALPS 観測地点時間降水量を近傍のアメダス観測地点（伊那，木曽福島）と比較すると（図 9c），降水が JALPS の 2 地点で観測されているが，AMeDAS ではとらえられておらず，DPR がアメダス網ではとらえられない局所降水を検知できる機能があることを実証している。一方，同時刻の GSMaP_MVK 時間降水量をみると雨量分布（図 9b）はかなり過小評価している。木曽山脈上での DPR/KuPR レーダー反射強度因子の鉛直断面を分析すると，エコー頂は高度 4 km 以下で，山岳東側斜面上で浅い対流が発生していた（図省略）。JALPS 観測地点以外での降水も含めてその他に分類された降水日で，GPM の観測域が解析対象地域と重なり，DPR データでも主要な降水域が検知された事例として，2015 年 8 月 4 日 20 JST と 2016 年 8 月 2 日 24 JST の時間降水量分布を図 10 に示す。前者では太平洋から張り出す高気圧場に南の台風から湿った気流が流入し，日中に木曽山脈上を中心に雷雨が発達した日で，DPR，GSMaP_MVK データともにメソ対流による局所的な降水域を再現している。レーダー反射強度因子の断面をみると，エコー頂が高度 12 km まで達する非常に背の高い対流セルが解析された（図省略）。この時の GSMaP_MVK データは DPR 観測値を比較的よく再現している。一方，後者は太平洋側から寒冷低気圧が張り出し，大気が不安定で，静岡県沿岸から甲府・長野県南部の盆地および北関東山麓一帯で夜間に集中して降水が発生している。DPR では甲府盆地周辺で大雨が解析され，甲府や河口湖のアメダスでも深夜にかけて 10 mm/h 以上の局所的降水が観測されている。この時のレーダー反射強度因子断面をみると，盆地上空では高度 4 km 付近にブライトバンドを示す層状エコーがみられ（図省略），エコー頂が高度 6 km 付近に達する対流セルが内在している。この時，GSMaP_MVK では図 10 同様に時間降水量が過小評価されている。以上は，局所降水も降水セルの構造によってマイクロ波放射計データによる推定値が誤差を生むことを示しており，とくに山岳域での背の低い浅い対流は GSMaP_MVK で雨量を過小評価することが想定される。

VI. 山岳降水観測の展望

日本のような森林に覆われた複雑山岳域では，山中に雨量計を設置し降水量の時空間分布を把握するのは非常に困難を有する。また，落下中の雨滴や雪片は周辺の微地形の影響を受けた下層気流

a) GSMaP_MVK過大評価事例

エリア1	総観規模擾乱	差(mm/d)	エリア2	総観規模擾乱	差(mm/d)	エリア3	総観規模擾乱	差(mm/d)
2016/08/22	台風・熱帯低気圧(本体)	62.3	2015/04/14	低気圧・温暖前線	58.4	2016/08/22	台風・熱帯低気圧(本体)	72.3
2015/04/14	低気圧・温暖前線	55.1	2016/09/20	台風・熱帯低気圧(本体)	51.1	2015/09/08	台風・熱帯低気圧(遠隔)	59.8
2016/04/21	低気圧・温暖前線	48.8	2015/06/05	低気圧・温暖前線	48.2	2015/07/04	停滞前線	47.1
2016/04/07	低気圧・温暖前線	47.1	2015/04/13	低気圧・温暖前線	47.5	2016/04/21	低気圧・温暖前線	47.0
2016/10/17	低気圧・温暖前線	44.3	2016/04/21	低気圧・温暖前線	44.3	2015/04/13	低気圧・温暖前線	42.1
2015/04/13	低気圧・温暖前線	43.2	2015/09/08	台風・熱帯低気圧(遠隔)	43.2	2016/10/17	低気圧・温暖前線	36.3
2016/04/28	低気圧・温暖前線	41.7	2015/07/07	停滞前線	41.3	2015/04/14	低気圧・温暖前線	31.1
2016/04/13	低気圧・温暖前線	40.7	2016/04/13	低気圧・温暖前線	41.1	2016/04/07	低気圧・温暖前線	31.0
2015/06/05	低気圧・温暖前線	40.7	2016/10/17	低気圧・温暖前線	36.8	2015/06/05	低気圧・温暖前線	29.3
2016/08/18	台風・熱帯低気圧(本体)	37.5	2015/07/04	停滞前線	29.5	2015/07/18	台風・熱帯低気圧(本体)	28.4

エリア4	総観規模擾乱	差(mm/d)	エリア5	総観規模擾乱	差(mm/d)
2015/09/08	台風・熱帯低気圧(遠隔)	69.0	2015/09/06	停滞前線	137.1
2015/04/14	低気圧・温暖前線	54.0	2016/08/22	台風・熱帯低気圧(本体)	95.8
2015/07/04	停滞前線	51.3	2015/04/13	低気圧・温暖前線	94.3
2015/04/13	低気圧・温暖前線	43.1	2015/09/07	停滞前線	79.4
2016/05/06	低気圧・温暖前線	39.8	2015/07/04	停滞前線	62.7
2016/04/21	低気圧・温暖前線	36.3	2016/04/21	低気圧・温暖前線	58.5
2015/06/05	低気圧・温暖前線	30.1	2016/06/21	停滞前線	52.3
2015/07/03	停滞前線	29.6	2015/09/16	停滞前線	52.0
2016/10/17	低気圧・温暖前線	26.4	2015/06/05	低気圧・温暖前線	48.3
2016/06/21	停滞前線	24.8	2016/05/06	低気圧・温暖前線	46.3

b) GSMaP_MVK過小評価事例

エリア1	総観規模擾乱	差(mm/d)	エリア2	総観規模擾乱	差(mm/d)	エリア3	総観規模擾乱	差(mm/d)
2016/08/26	寒冷前線	-25.6	2015/08/30	停滞前線	-46.0	2016/08/30	台風・熱帯低気圧(本体)	-37.4
2015/08/30	停滞前線	-20.8	2016/08/30	台風・熱帯低気圧(本体)	-42.6	2016/08/27	寒冷前線	-36.6
2016/08/30	台風・熱帯低気圧(本体)	-20.7	2016/09/22	停滞前線	-30.2	2015/06/20	その他	-26.5
2015/09/09	低気圧・温暖前線	-20.1	2016/05/30	停滞前線	-28.3	2015/07/16	台風・熱帯低気圧(本体)	-24.9
2015/08/29	停滞前線	-18.3	2015/07/23	台風・熱帯低気圧(遠隔)	-22.1	2016/09/20	台風・熱帯低気圧(本体)	-23.2
2016/08/01	低気圧・温暖前線	-15.9	2016/07/30	その他	-22.0	2016/07/15	停滞前線	-20.1
2015/07/29	低気圧・温暖前線	-13.6	2015/04/01	寒冷前線	-21.8	2015/06/17	停滞前線	-19.8
2016/09/19	台風・熱帯低気圧(遠隔)	-12.8	2015/09/07	停滞前線	-21.3	2015/08/01	その他	-18.8
2015/06/18	停滞前線	-12.3	2015/08/17	停滞前線	-20.5	2016/09/18	台風・熱帯低気圧(遠隔)	-17.8
2016/08/29	台風・熱帯低気圧(遠隔)	-11.0	2015/08/26	低気圧・温暖前線	-19.9	2016/08/18	台風・熱帯低気圧(本体)	-17.3

エリア4	総観規模擾乱	差(mm/d)	エリア5	総観規模擾乱	差(mm/d)
2015/10/02	寒冷前線	-43.9	2015/07/16	台風・熱帯低気圧(本体)	-129.5
2016/09/18	台風・熱帯低気圧(遠隔)	-41.1	2015/04/20	低気圧・温暖前線	-78.4
2015/07/01	低気圧・温暖前線	-40.4	2015/07/17	台風・熱帯低気圧(本体)	-69.0
2015/08/30	停滞前線	-39.6	2016/09/20	台風・熱帯低気圧(本体)	-61.7
2015/04/20	低気圧・温暖前線	-35.3	2015/09/09	低気圧・温暖前線	-60.3
2016/10/28	低気圧・温暖前線	-34.7	2016/09/19	台風・熱帯低気圧(遠隔)	-46.0
2015/08/29	停滞前線	-33.1	2016/09/08	停滞前線	-43.1
2016/09/13	停滞前線	-31.4	2016/09/22	停滞前線	-42.1
2016/08/30	台風・熱帯低気圧(本体)	-29.6	2016/10/28	低気圧・温暖前線	-41.5
2015/08/26	低気圧・温暖前線	-26.0	2016/05/04	寒冷前線	-39.9

図 8　地上降水量と GSMaP_MVK 降水量の差が大きかった日のリスト．a）上段は GSMaP_MVK 降水量の方が降水量が多く，b）下段はその逆の日で，差が多い上位 10 位をエリア別に掲示している．当日卓越した総観規模擾乱を図 3 と同じ色で着色し，複数のエリアで表れた同一日は下線付きの灰色に着色した．

Fig. 8　List by date of large differences in precipitation amounts of five areas. Upper (lower) table corresponds to larger (smaller) precipitation amount for GSMaP_MVK. Colors correspond to synoptic scale disturbances as in Fig. 3, and overlapping dates in different areas are shaded with underlines.

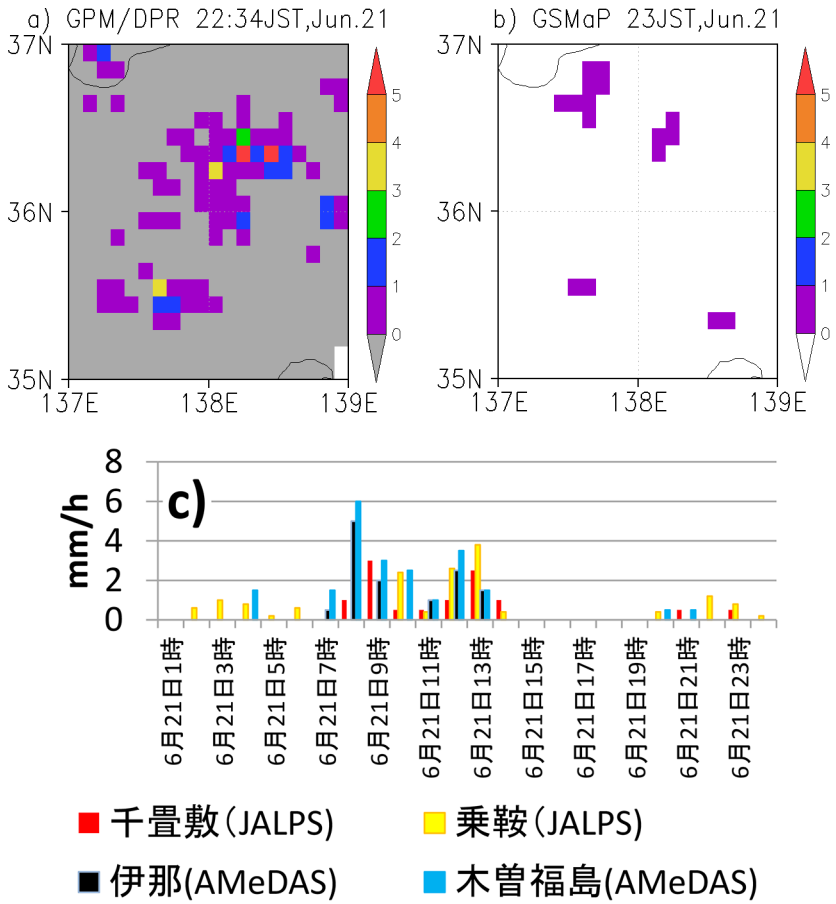

図 9　2015 年 6 月 21 日の a）GPM/DPR 時間降水量（22：34 JST），b）同時間帯の GSMaP 時間降水量および c）木曽山脈周辺で実測された同日の地上雨量計データ.

Fig. 9　Hourly precipitation distribution with a）GPM/DPR（22:34 JST）, b）GSMaP_MVK（23 JST）and c）gauge data at hourly points around the Kiso mountain range.

系に流されるため，地上に到達する降水量は必然的に風の弱い谷底で増加し強風が卓越する稜線では減少する。一方で，図 4 に示したように，任意の総観規模擾乱で特定の地域で降水量は増減する傾向を示し，これは主要山脈の走向や安定度に応じて地形の影響を受けて強化（減衰）した降水システムの結果であると考えられる。標高を関数として低地で測定された降水量を増幅させて高標高地点の値を推定する手法もあるが，この手法では総観場に応じて異なる地形の影響が卓越する動的変化を再現することは不可能である。山岳上の降水分布を，衛星が上空から均一に観測できれば，地上レーダーやアメダス観測網では得られない中部山岳域での局所的な強雨や断続的な降水域に関する知見が飛躍的に向上することが期待される。

今回の解析により，日々の天気概況の指標となる気圧配置型に伴う降水発生域が特定され，一方で温帯低気圧や停滞前線といった日常卓越する総観場のなかでも特異日に広域で衛星降水量が過大評価することが明らかとなった。一方で，暖候期に山岳域で発生する局所的降水が，その構造により過小評価される事例も検出されている。Houze

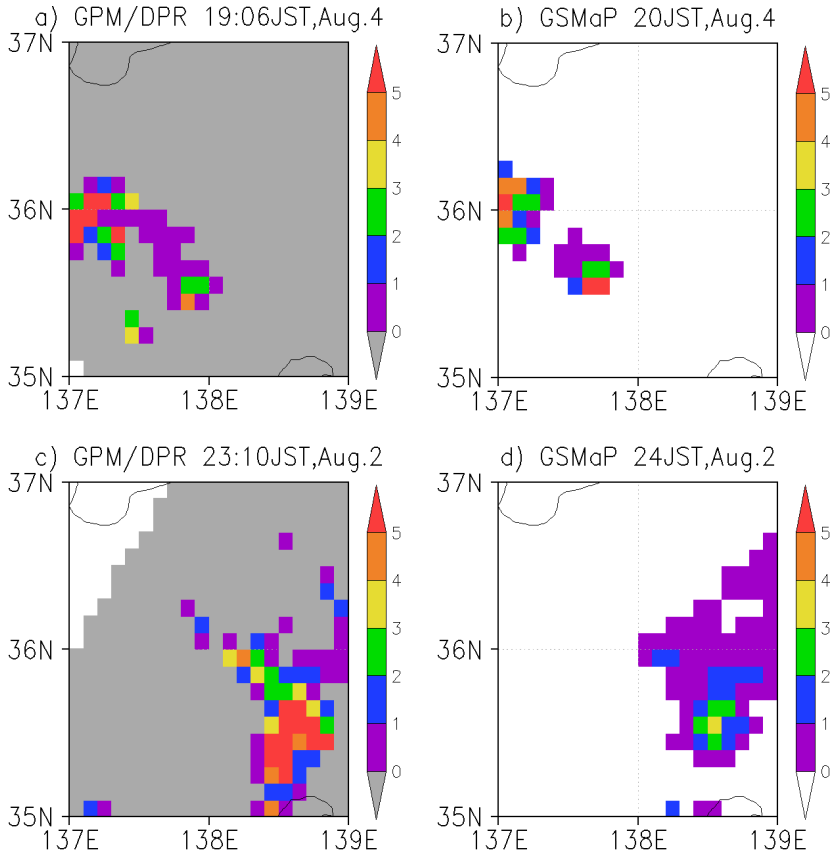

図 10　2015 年 8 月 4 日の a）GPM/DPR 時間降水量（19：06 JST），b）同時間帯の GSMaP_MVK 時間降水量，および 2016 年 8 月 2 日の c）GPM/DPR 時間降水量（23：10 JST），d）同時間帯の GSMaP_MVK 時間降水量.

Fig. 10　Hourly precipitation distribution on Aug. 4, 2015 with a）GPM/DPR at 19:06 JST, b）GSMaP_MVK at 20 JST, and the same for Aug. 2, 2016, by c）GPM/DPR at 23:10 JST, and d）GSMaP_MVK at 24 JST.

（2012）は降水システムに対するさまざまな地形効果を，気流の安定度，山岳の規模，日変化の有無などの観点から整理している。どのような地形効果の時に衛星推定値の誤差が大きくなるか，その要因も含めて理解が進めば，推定アルゴリズムの改良につながる一方で，データユーザーも推定値を利用可能かどうかの判断をより的確に行えるようになる。Houze（2012）の図 3 に示されたパターンと比較した場合，図 9a，b で示した 2015 年 8 月 4 日の事例が Houze（212）が(c)として示された日中の山岳加熱に依存した効果で，図 9c，d で示した 2016 年 8 月 2 日の事例が(d)として示された夜間に山麓での下層気流の収束に伴う降水であったとすれば，後者のような天候・時間帯に関しては GSMaP_MVK データが過小評価を起こしていることになる（もしくは，山麓での雨量計の値の方が信頼性が高いと結論づけられる）。実際，2017 年 8 月が例年になく降水日が継続したが，とくに長野県下では夜間に盆地で多量の降水が発生した観測記録が得られており，今後の衛星データとの突合せが期待されている。DPR データは今までにない多くの 3 次元物理量を提供してくれるが，観測頻度が少ない。山岳域で展開する観測網で典型的な降水事例が発生した

時刻に DPR と GSMaP-MVK 両者のデータが同時に取得されるケースはまれであるが，データの蓄積と観測維持により解析事例を増やすことで，不一致の要因とともにメソ降水系への地形の影響が精査できると期待される。そのためにも観測の継続と今後のデータ蓄積が重要である。

謝　辞

本研究は，宇宙航空研究開発機構，PMM 第 8 回共同研究・研究費の支援を受けて実施しています。第 2 著者の修士論文研究の一環としても実施しております。地上降水量データの収集に関しては，JALPS の関係者の支援に感謝いたします。作業図作成に関して澤田壮弘君（筑波大学生命環境科学研究科）に補助をいただきましたことも誌上にてお礼申し上げます。

注

1）世界の雨分布速報：http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/index_j.htm［Cited 2018/2/13］。
2）JALPS 気象データアーカイブ：http://www.geoenv.tsukuba.ac.jp/~jalps-atm/［Cited 2018/2/13］。
3）国土数値情報：http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html［Cited 2018/2/13］。

文　献

Adler, R.F. and Negri, A.J.（1988）: A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall. *Journal of Applied Meteorology*, **27**, 30–51.

Aonashi, K., Awaka, J., Hirose, M., Kozu, T., Kubota, T., Liu, G., Shige, S., Kida, S., Seto, S., Takahashi, N. and Takayabu, Y.N.（2009）: GSMaP passive, microwave precipitation retrieval algorithm: Algorithm description and validation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **87A**, 119–136.

Arkin, P.A. and Meisner, B.N.（1987）: The relationship between large-scale convective rainfall and cold cloud over the western hemisphere during 1982–1984. *Monthly Weather Review*, **115**, 51–74.

Bookhagen, B. and Burbank, D.W.（2006）: Topography, relief, and TRMM derived rainfall variations along the Himalaya. *Geophysical Research Letters*, **33**, L08405, doi:10.1029/2006GL026037.

Browning, K.A.（1997）: The dry intrusion perspective of extra-tropical cyclone development. *Meteorological Applications*, **4**, 317–324.

Dinku, T., Chidzambwa, S., Ceccato, P., Connor, S.J. and Ropelewski, C.F.（2008）: Validation of high-resoluition satellite rainfall products over complex terrain. *International Journal of Remote Sensing*, **29**, 4097–4110.

Ebert, E.E. and Manton, M.J.（1998）: Performance of satellite rainfall estimation algorithms during TOGA COARE. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **55**, 1537–1557.

Hirose, M. and Nakamura, K.（2005）: Spatial and diurnal variation of precipitation systems over Asia observed by the TRMM precipitation radar. *Journal of Geophysical Research*, **110**, D05106, doi:10.1029/2004JD004815.

Hong, Y., Adler, R. and Huffman, G.（2006）: Evaluation of the potential of NASA multi-satellite precipitation analysis in global landslide hazard assessment. *Geophysical Research Letters*, **33**, doi:10.1029/2006GL028010.

Hou, A.Y., Kakar, R.K., Neeck, S., Azarbarzin, A.A., Kummerow, C.D., Kojima, M., Oki, R., Nakamura, K. and Iguchi, T.（2014）: The global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **95**, 701–722.

Houze, R.A.（2012）: Orographic effects on precipitating clouds. *Reviews of Geophysics*, **50**, 1–47.

Joyce, R.J., Janowiak, J.E., Arkin, P.A. and Xie, P.（2004）: CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, **5**, 487–503.

Kubota, T., Shige, S., Hashizume, H., Aonashi, K., Takahashi, N., Seto, S., Hirose, M., Takayabu, Y.N., Nakagawa, K., Iwanami, K., Ushio, T., Kachi, M. and Okamoto, K.（2007）: Global precipitation map using satelliteborne microwave radiometers by the GSMaP Project : Production and validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **45**, 2259–2275.

Kubota, T., Ushio, T., Shige, S., Kida, S., Kachi, M. and Okamoto, K.（2009）: Verification of high-resolution satellite-based rainfall estimates around Japan using a gauge-calibrated ground-radar dataset. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **87**, 203–222.

Kumerrrow, C., Bames, W., Kozu, T., Shiue, J. and Simpson, J.（1998）: The tropical rainfall measuring mission（TRMM）sensor package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **15**, 809–817.

栗林正俊・大和広明・浜田　崇（2019）: 長野県における 1979 ～ 2015 年の夏季降水量の年変化率と標高依存性．地学雑誌，**128**，21–30．［Kuribayashi, M., Yamamoto, H. and Hamada, T.（2019）: Altitude dependence of trends of summertime precipitation during the period 1979–2015 in Nagano prefecture. *Journal of Geography*（*Chigaku Zasshi*）, **128**, 21–31.（in Japanese with English abstract）］

Liu, Z.（2015）: Evaluation of precipitation climatology derived from TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis（TMPA）monthly product over land with two gauge-based products. *Climate*, **3**, 964–982.

中井専人・横山宏太郎（2009）: 降水量計の捕捉損失補

正の重要さ．天気，**56**，11–16．［Nakai, S. and Yokoyama K.（2009）: The importance of the correction of wind-induced undercatch of the gauges: The necessity for complication of metadata on the gauges. *Tenki*, **56**, 11–16.（in Japanese）］
小倉義光（2015）：日本の天気，その多様性とメカニズム．東京大学出版会，426p．［Ogura, Y.（2015）: *Weather in Japan. Its Variability and Mechanism*. University of Tokyo Press, 426p.（in Japanese）］
Satgé, F., Xavier, A., Zolá, R.P., Hussain, Y., Timouk, F., Garnier, J. and Bonnet, M-P.（2017）: Compatrative assessments of the latest GPM mission's spatially enhanced satellite rainfall products over the main Bolivian watersheds. *Remote Sensing*, **9**, 369, doi:10.3390/rs9040369.
佐藤晋介（2007）：日本における気象レーダーの発展．天気，**54**，17–20．［Sato, S.（2007）: Development of weatjer radar in Japan. *Tenki*, **54**, 17–20.（in Japanese）］
Shige, S., Kida, S., Ashiwake, H., Kubota, T. and Aonashi, K.（2013）: Improvement of TMI rain retrievals in mountainous areas. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **52**, 242–254.
新保明彦（2001）：レーダーアメダス解析雨量（I）．天気，**48**，59–63．［Shinbo, A.（2001）: Radar-AMeDAS composites. *Tenki*, **48**, 59–63.（in Japanese）］
Takido, K., Valeriano, O.C.S., Ryo, M., Tanuma, K., Ushio, T. and Kubota, T.（2016）: Spatiotemporal evaluation of the gauge-adjusted global satellite mapping of precipitation at the basin scale. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **94**, 185–195.
Tian, Y., Peters-lidard, C.D., Adler, R.F., Kubota, T. and Ushio, T.（2010）: Evaluation of GSMaP precipitation estimates over the contiguous united states. *Journal of Hydrometeorology*, **11**, 566–574.
津口裕茂・加藤輝之（2014）：集中豪雨事例の客観的な抽出とその特性・特徴に関する統計解析．天気，**61**，19–33．［Tsuguchi, H. and Kato, T.（2014）: Objective extraction of heavy rainfall and statistical analysis on their characteristic features. *Tenki*, **61**, 19–33.（in Japanese）］
上野健一（2001）：降水量，第 7 章．気象研究ノート，**199**，153–164．［Ueno, K.（2001）: Precipitation measurements. *Meteorological Research Note*, **199**, 153–164.（in Japanese）］
上野健一・磯野純平・今泉文寿・井波明宏・金井隆治・鈴木啓助・小林　元・玉川一郎・斉藤　琢・近藤裕昭（2013）：大学間連携事業を通じた中部山岳域の気象データアーカイブ．地学雑誌，**122**，638–650．［Ueno, K., Isono, J., Imaizumi, F., Inami, A., Kanai, R., Suzuki, K., Kobayashi, H., Tamagawa, I., Saitoh, T. and Kondo, H.（2013）: Data archive of meteorological data created through the Japanese Alps interuniverity cooperative project. *Journal of Geography*（*Chigaku Zasshi*）, **122**, 638–650.（in Japanese with English abstract）］
Ushio, T., Sasashige, K., Kubota, T., Shige, S., Okamoto, K., Aonashi, K., Inoue, T., Takahashi, N., Iguchi, T., Kachi, M., Oki, R., Morimoto, T. and Kawasaki, Z.（2009）: A Kalman filter approach to the Global Satellite Mapping of Precipitation（GSMaP）from combined passive microwave and infrared radiometric data. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **87**, 137–151.
Ushio, T., Aonashi, K., Kubota, T., Shige, S., Kachi, M., Oki, R., Okamoto, K., Yoshida, S., Morimoto, T. and Kawasaki, Z.（2013）: Global satellite mapping of precipitation（GSMaP）project. *International Water Technology Journal*, **3**, 192–196.
Xie, P（2010）: CPC unified gauge-based analysis of global daily precipitation. *24th Conference on Hydrology, the 90th American Meteorological Society Annual Meeting, Atlanta*. https://ams.confex.com/ams/90annual/techprogram/paper_163676.htm［Cited 2018/2/13］.
山田　正・日比野忠史・荒木　隆・中津川　誠（1995）：山岳流域での降雨特性に関する統計的解析．土木学会論文集，**527**，1–13．［Yamada, T., Hibino, T., Araki, T. and Nakatsugawa, M.（1995）: Statistical characteristics of rainfall in mountains basins. *Proceedings of JSCE*, **527**, 1–13.（in Japanese）］
Yamamoto, M., Ueno, K. and Nakamura, K.（2011）: Comparison of satellite precipitation products with rain gauge data for the Khumb Region, Nepal Himalayas. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **89**, 597–610.
Yamamoto, M.K. and Shige, S.（2015）: Implementation of an orographic/nonorographic rainfall classification scheme in the GSMaP algorithm for microwave radiometers. *Atmospheric Research*, **163**, 36–47.
吉崎正憲・加藤輝之（2007）：豪雨・豪雪の気象学．朝倉書店，187p．［Yoshizaki, M. and Kato, T.（2007）: *Meteorology of Heavy Rain and Snow*（*Gou Gosetsu No Kishogaku*）. Asakura Publishing, 187p.（in Japanese）*］
* Title etc. translated by K.U.