

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26750134

研究課題名(和文)夏季に盆地上で突然の豪雨をもたらす積乱雲の出現に先立つ要因と発達に関する研究

研究課題名(英文) Study on Meteorological Conditions Preceding the Appearance of a Cumulonimbus Cloud Causing Suddenly a Heavy Rainfall on a Basin in Summer

研究代表者

佐野 哲也 (SANO, Tetsuya)

国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波研究所リモートセンシング研究室・研究員

研究者番号：90533589

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：夏季の盆地上の突然の局地的豪雨の形成過程の解明を目的として、夏季に甲府盆地上で出現し局地的降雨をもたらした積乱雲の出現に先立つ盆地内の気象場を解析した。2012年からの3年間に抽出された23事例の解析、およびそれらから選択した事例の詳細な解析から、地上での甲府盆地の外側から盆地内への局地風に伴う水蒸気輸送と上空での甲府盆地周囲の山岳から盆地への水蒸気移流による盆地上空の大気の状態の不安定化、そして地上の甲府盆地への局地風により形成した水平収束に伴う水蒸気の持ち上げと雲の形成が考察された。こうして、水平収束域の上空での積乱雲の出現と、それらの組織化に伴う甲府盆地の局地的降雨の形成が推察された。

研究成果の概要(英文)：To elucidate the formation process of a sudden heavy rainfall in a local region on a basin in summer, we analyzed the meteorological conditions on a Basin preceding the appearance of a cumulonimbus cloud (a precipitating cell) using the 23 cases that a cumulonimbus cloud appeared and developed on the Kofu Basin in summer from 2012 to 2014. From the analyses of the cases, we consider the atmospheric instability on the Kofu Basin which was caused by the moisture transport associated with the local winds to the Kofu Basin from the outside at surface and the moisture advection above the Kofu Basin from the surrounding mountains to the Kofu Basin, and the lifting of moisture at the horizontal convergence formed by the local winds at surface causing a cloud. Thus, it is suggested that cumulonimbus clouds appeared and organized on the region of the horizontal convergence, which contributed to the formation of a rainfall in a local region on the Kofu Basin.

研究分野：気象学

キーワード：積乱雲 局地的降雨 局地風 水蒸気輸送 甲府盆地

1. 研究開始当初の背景

夏季に、低気圧や前線がなく、高気圧に緩やかに覆われるなど、総観規模場の擾乱がない、あるいは弱いときに、都市を含む盆地や平野域で、局地的降雨が生じる。局地的降雨は、上空において、水平スケールが数～十数 km の局所に集中した水が地表へもたらされる現象である。その結果として、小河川での急激な水位の上昇や流量の増加を生じさせ、氾濫、冠水などの災害が生じることがある。

このような局地的降雨は、晴天時の午後、盆地や平野の局所で突然出現し、急激に発達する積乱雲、または積乱雲群によりもたらされる。またもたらされる降雨量がしばしば大きくなり、豪雨となることもある。このため、突然発生する局地的豪雨を「ゲリラ豪雨」とも呼ばれる。しかしながら、積乱雲は何の要因のないところで出現することはなく、必ず出現に先立つ要因がある。

まず、積乱雲は条件付不安定な大気場で出現する。ある気温減率を持つ大気中にて、上昇する空気塊が飽和していれば浮力を得てますます上昇するため不安定、飽和していなければ地表に戻るため安定、という意味である(図 1)。そして、空気塊の上昇には、それを持ち上げるメカニズムが必要である(図 2)。すなわち、下層の空気が十分に湿潤であることと、その空気が飽和する高度まで上昇させるための持ち上げのメカニズムが、積乱雲の出現に先立つ要因として必要とされる。

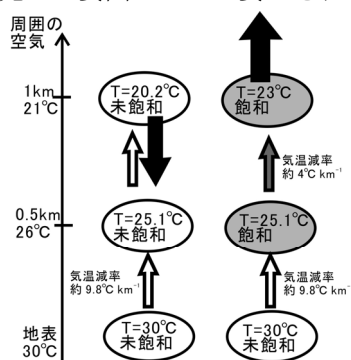


図 1 条件付不安定の模式図。

夏季静穏時に局地的降雨をもたらす積乱雲も、出現に先立って上述の要因を例外なく必要とする。この要因は、2～200km の空間スケールと 1～3 時間程度の時間スケールを持つメソ γ ～ β スケールの環境場で形成される。このような積乱雲に先立つ要因の形成を理解することは、静穏場での積乱雲の出現過程の解明、そして突然発生する局地的降雨の形成過程の理解につながる。しかし、夏季静穏時での積乱雲に先立つ要因を形成する過程については十分に知られていない。さらに、メソ γ ～ β スケールでの水蒸気や、気温、風向風速などの観測、そして積乱雲を詳細に観測する体制が十分でないため、積乱雲の出現に先立つ要因を捉えることが困難である。

夏季の盆地内では、熱的局地循環が発達する(図 3)。日射により盆地内の斜面や地表面

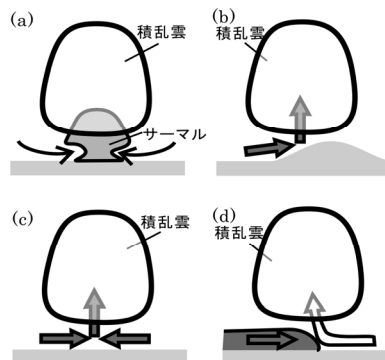


図 2 持ち上げのメカニズムの例。(a)地表面の加熱による持ち上げ、(b)地形の強制上昇による持ち上げ、(c)下層の風の収束による持ち上げ、(d)前線による持ち上げ。

が加熱され、それら直上の空気が暖められる。加熱される斜面直上の空気と、それと等高度の盆地上空の空気の温度の差により、山に向かって谷風が吹く。それに伴って山岳で上昇流が発生する。その反流が盆地上空へ流れ、盆地内に下降流をもたらす。このとき、上空の空気を引きずり下ろしに伴う沈降加熱が生じ、盆地内は高温かつ低圧になる。また、盆地内の水蒸気が谷風によって山岳へ輸送され、盆地内の水蒸気量は減少し乾燥化する。このため、盆地では積乱雲が出現しにくく、降雨の出現頻度は少ない傾向にある。

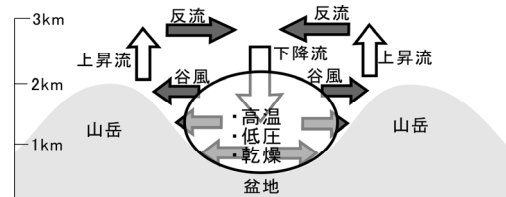


図 3 盆地での熱的局地循環の模式図。

夏季の甲府盆地(図 4)は、熱的局地循環の発達に伴い高温かつ乾燥化しやすい。それにもかかわらず、積乱雲の出現が毎夏 1 事例以上生じる。また積乱雲の発達に伴い、局地的降雨が出現する。例えば甲府地方気象台では、地上での総観規模場の擾乱の弱かった 2004 年 8 月 7 日に、14JST(JST=UTC+9 時間)からの 1 時間に 76mm の降雨を観測した。すなわち、総観規模場の擾乱による盆地内で気象の変動が小さい場の下、積乱雲の出現に先立つ気象場が形成され、積乱雲が出現し、局地的降雨が発生すると考えられる。以上から、甲府盆地は、夏季静穏時に局地的降雨をもたらす積乱雲の、突然の出現に先立つ要因の形成過程と、出現した積乱雲の発達過程の研究に適していると言える。

2. 研究の目的

本研究では、夏季に盆地上の突然の局地的降雨の形成過程の解明を目的として、甲府盆地で出現した積乱雲を例に、積乱雲の出現に先立つ気象場の形成と、積乱雲の出現と発達について考察した。

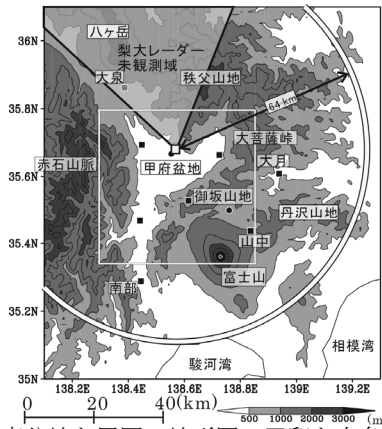


図4 甲府盆地と周囲の地形図。□印と白色の円は、それぞれ梨大レーダーの位置と観測範囲を示す。●と■印は気象庁地上気象観測点を示し、観測要素はは図5の凡例に示す。

3. 研究の方法

本研究において、積乱雲は1つの降水セルを持つと定義し、複数の降水セルの集合体を対流性降水システムと呼ぶことにする。

まず、甲府盆地上で最初に出現した降水セル(プライマリーセル)の出現分布とそれに先立つ気象場の特徴を、2012年から2014年までの6月から9月までの観測データから解析した。夏季の総観場の擾乱の弱い日の甲府盆地地上でのプライマリーセルの出現分布を、山梨大学 X-バンド二重偏波ドップラーレーダー(以下、梨大レーダー)観測データから解析した。そして、プライマリーセルの出現に先立つ甲府盆地と周囲の気温と風向風速のパターン(図4と5:気象庁の地上気象観測点甲府、韮崎、勝沼、切石、古閑、河口湖、南部、大月、山中、大泉)、および気象庁メソモデルの初期値より解析された甲府盆地上空の不安定度の特徴を示した。

上述の1事例、2014年7月25日の事例解析より、甲府盆地内の地上気象(気温、風向風速、気圧、相対湿度:図5:気象庁、NTTドコモ、山梨大学による観測)、および国土地理院による全球測位衛星システム(GNSS)観測の大気遅延量(図5:日本造船提供)より推定された可降水量の時間変化を示し、気象庁の気象衛星 MTSAT-2 による雲の分布(可視画像のアルベドの分布:高知大学提供)と気象庁メソ客観解析を参照して、甲府盆地内のプライマリーセルの出現につながる気象場への変化を調べた。そして、梨大レーダー観測より、プライマリーセルを基点として、対流性降水システムを構成した降水セルの出現高度と偏波パラメータを解析した。

以上の解析より、夏季に盆地地上の突然の局地的降雨に先立つ気象場の形成とそれをもたらす降水セルの出現を、水蒸気の盆地内への輸送と局所への集中の観点から考察した。

4. 研究成果

ここで、降水セルは、梨大レーダーにより反射強度 10dBZ 以上($Z \geq 10$ dBZ)のセル状エコーとして観測される。そして、複数のセル

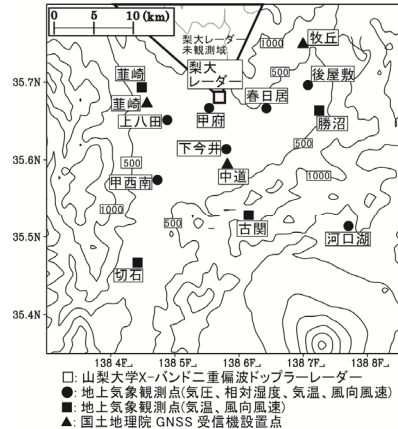


図5 事例解析における甲府盆地地上の観測体制とその凡例。黒色の等値線は等高線(単位: m)を示す。

状エコーを含む $Z \geq 10$ dBZ のエコーを対流性エコーとし、降水セルで構成される対流性降水システムと対応する。

2012年から2014年までの6月から9月までについて、総観場の擾乱の弱い日に甲府盆地地上でプライマリーセルが出現し、その後対流性降水システムを形成した事例数は23であった。プライマリーセルの出現位置は甲府盆地の中央から東部に集中した(図6)。また、プライマリーセルの出現高度は、梨大レーダー近傍で出現したため推定できない4事例を除いて、高度2.25 kmから6.25 kmであった。そして、梨大レーダー観測より推定された事例毎の最大積算降雨量は、最小で20分間に6.7 mm、最大で100分間に53.0 mmであった(図なし)。

プライマリーセルの出現前の甲府盆地地上の大気の状態の傾向を調べるため、対流不安定指数(CII, Sato and Kimura 2005)を調べた。CIIは気圧高度面500 hPaの飽和相当温位($\theta_{e^*}(500 \text{ hPa})$)から気圧高度面800 hPaの相当温位($\theta_e(800 \text{ hPa})$)の差と定義し、CIIが小さいほど大気の状態が不安定の傾向にあることを意味する。気象庁メソモデルの初期値を用いて計算した事例毎のCIIを見ると、いずれの事例も09 JSTにCIIが最大となり、プライマリーセルの出現前の時刻までに最小となった(図7)。いずれのCIIの減少は、 $\theta_e(800 \text{ hPa})$ の増加に伴いなされた(図なし)。

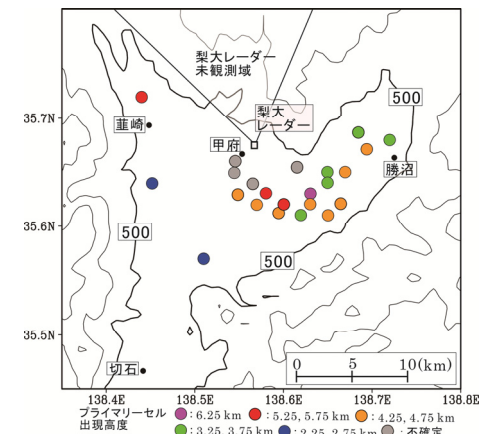


図6 プライマリーセルの出現分布。黒色の等値線は等高線(単位: m)を示す。●印は気象庁地上気象観測点を示す。

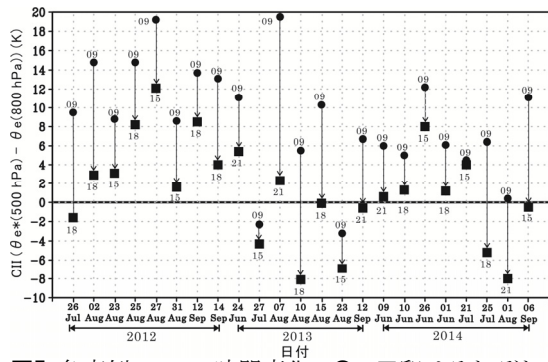


図7 各事例のCIIの時間変化。●、■印はそれぞれCIIの最大値と最小値を示す。数字は時刻(時, JST)を示す。

次に、プライマリーセルの出現前の地上気象場の傾向を調べた。地上気象観測点切石で南西風、地上気象観測点勝沼で南東風、そして地上気象観測点甲府で南西～南南西風の風系で、甲府と勝沼の間で高温域となった15事例中、14事例で高温域でのプライマリーセルの出現が確認された(図8a)。さらに、切石で南西風、勝沼で南東風、そして甲府で南東～南南東風の風系で、甲府の南側で高温域となった6事例中、5事例で甲府の南側でのプライマリーセルの出現が確認された(図8b)。これらの事例にて、南西～南南西風と南東風はどちらも、甲府盆地内と比べてやや低い補正された気温を伴った。後の2事例は、切石で南西風、勝沼で南東風、そして甲府で西側の山岳から気温の低い空気と伴った北西風があり、甲府と切石の間でのプライマリーセルの出現を確認した(図なし)。またすべての事例において、南部で南南東風、大月で北東風が卓越し、補正された気温は甲府盆地内と比べて低かった。

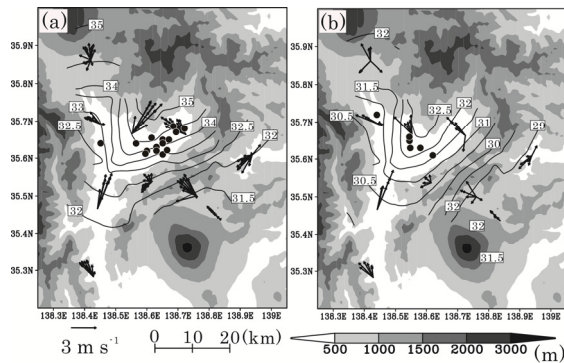


図8 プライマリーセルの出現前30分間を平均した気温(6.5°C/1 kmで補正)と風向風速。(a)は甲府で南西から南南西風、(b)は南東から南南東風を観測した事例である。●印はプライマリーセルの出現位置を示す。グレー階調の陰影は地形を示す。

以上から、プライマリーセルの出現前において、甲府盆地上空の大気の状態は不安定に変化する傾向が見られた。そして地上では、盆地の西側で南西～南南西風、東側で南東風に覆われ、いずれも甲府盆地と比べてやや気温の低い寒気を伴っていて、南部で南よりの風、大月で東よりの風の卓越から、盆地の外側からの移流が考えられた。そして両者間の高温暖域でプライマリーセルは出現した。

甲府盆地の西側と東側のそれぞれを覆う

南西風と南東風の形成、そしてプライマリーセルの出現につながる盆地への水蒸気の輸送と局所への集中について、2014年7月25日の事例より解析した。

総観規模の擾乱が弱い環境場において、09:00JSTに、甲府盆地上空で雲はなく、地上では風向の定まらない弱い風が観測された(図9aと9b)。その後、甲府盆地内の補正された気温は40°Cに達した(図なし)。

そして15:00JSTまでに、盆地周囲の山岳域の上空で雲が発達した。その一方で、盆地上、盆地と駿河湾沿岸のつながる谷域、そして盆地と関東平野のつながる谷で雲は見られなかった(図9c)。そのような状況下で、盆地の西側で駿河湾沿岸に通じる谷を通る南よりの風、東側で関東平野に通じる谷を通る東よりの風が、それぞれ甲府盆地中央から東部の高温域を挟んで到達した(図9d)。

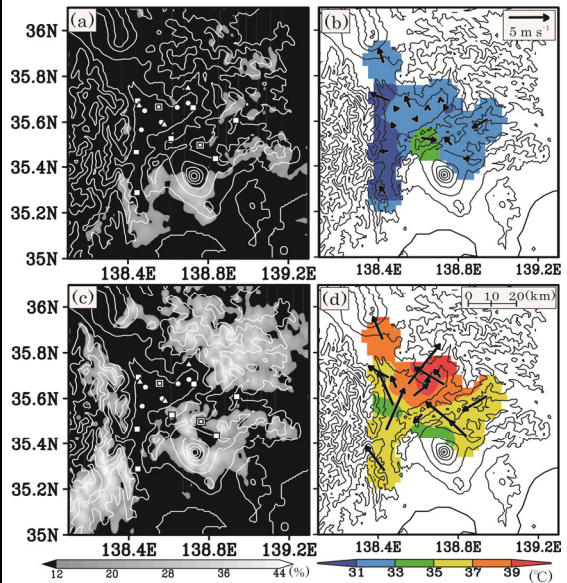


図9 MTSAT-2による雲(アルベド)の分布と、甲府盆地内の海面補正された地上気温(6.5°C/km、カラー陰影)と風向風速(黒矢印)。日時は2014年7月25日の(a, b)09JSTと(c, d)15JSTである。等値線(a, c: 白色、b, d: 黒色)は等高線(500m毎)を示す。

甲府盆地内の地上の水蒸気混合比と相当温位を見ると、12:00JSTでは、盆地内は風向の定まらない弱風で、水蒸気混合比、相当温位ともに低かった(図10a)。15:20JSTにて、盆地西側では後方に低い相当温位、前面に高相当温位を伴う南よりの風、東側では高相当温位を伴う東よりの風が見られた(図10b)。なお、盆地の東側にあたる後屋敷の相当温位と勝沼の補正された気温は減少した(図なし)。そして、両者の間では、やや低い相当温位と水蒸気混合比が見られたが、12:00JSTと比べると両者共に増加していた。

GNSS 可降水量を見ると、GNSS 受信機設置点中道では、14:40JSTからの50分間に10mmの可降水量の増加が見られた(図10c)。このような状況において、16:00JSTのMTSAT-2の観測から、盆地の中央から東部、すなわち盆地西側の南よりの風と東側の東よりの風の間、水蒸気混合比と相当温位の増加を伴う高温域で雲が出現した(図10d)。

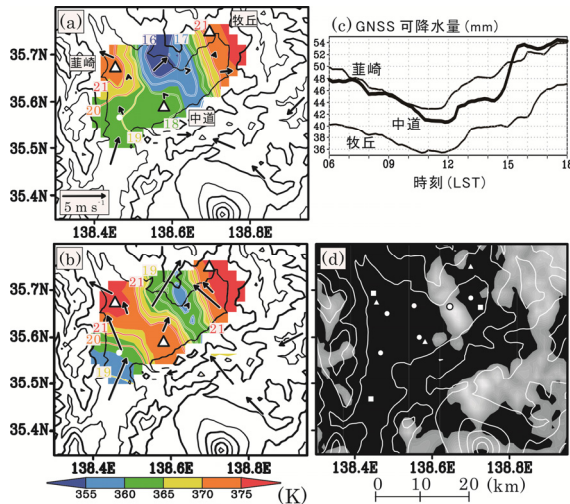


図10 (a), (b) 2014年7月25日12:00JSTと15:20JSTの甲府盆地内の地上気象による相当温位(カラー陰影)、水蒸気混合比(g kg^{-1}), カラー等値線、風向風速(黒矢印)。(c) 同日のGNSS可降水量の時間変化。(d) 同日16:00JSTのMTSAT2で観測されたアルベド。(a), (b)の黒色、(d)の白色の等値線は等高線(500m毎)を示す。

盆地内への南よりの風と東よりの風の流入、そして盆地内の湿潤化の過程を考察するため、気象庁メソ客観解析のデータを解析した。15:00JSTの900hPa面の風向風速と水平発散の分布より、盆地の中央から東部で、いずれもやや低い相当温位を伴った南よりの風と東よりの風で形成した、高相当温位を伴った水平収束が見られた(図11a)。線分A-A'での鉛直断面より、甲府盆地にて、900hPaの高度より下層での南寄りの風と東よりの風で形成した水平収束に伴い、盆地中央部の地表から、盆地東部の700hPaの高度にかけての、12:00JSTからの水蒸気混合比の増加と、それに伴う凸型の相当温位の分布が見られた(図11b)。高温かつ乾燥する甲府盆地に、盆地の外側からの南よりの風、および東よりの風の流入によって盆地に水蒸気が輸送され、両者が収束することによって、水蒸気が持ち上げられたことが推察された。

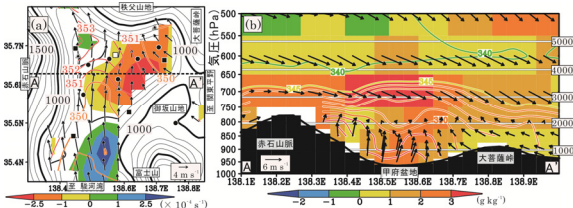


図11 2014年7月25日15:00JSTの気象庁MANALによる、(a) 900hPa気圧面の相当温位(カラー等値線)、風向風速(黒矢印)、水平発散(カラー陰影、負:水平収束)と、(b)線分A-A'の相当温位(カラー等値線)、水平風速(黒矢印)、12:00JSTからの水蒸気混合比の差(カラー陰影)の鉛直分布。(a)の黒等値線は、気象庁MANALで用いる等高線(単位:m)、(b)の黒陰影は同様の地形を示す。

また、盆地の上空700hPaの高度でも、北西風を伴った水蒸気混合比の増加が見られた(図11b)。観測より、GNSS受信機設置点中道、韮崎、牧丘のいずれも、12:00JSTから14:00JST頃までのGNSS可降水量の増加が見られた(図10c)。盆地の上空での北西から盆地への水蒸気の移流が示唆され、盆地の上空

方向のさらなる加湿に寄与したといえる。そして雲が出現した場所にて、16:00JSTから17:00JSTまでに6つの降水セルが出現した(図12)。それぞれの降水セルの出現高度は、高度3.25kmから6.25kmまでであった。これら降水セルで構成した対流性降水システムは、水平スケールが10km程度で、局所で最大反射強度が50dBZを超えた。

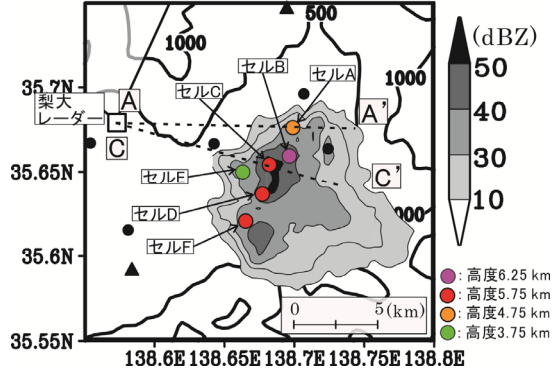


図12 梨大レーダーで観測された2014年7月25日16:00JSTから17:00JSTまでの高度4.75kmの最大反射強度分布(グレー陰影)と、降水セルの出現分布。黒等値線は等高線(単位:m)を示す。

プライマリーセルであった降水セルAについて、出現時の降水構造を調べた。16:08JSTに、降水セルAは高度4.25km付近に $Z \geq 30$ dBZを伴っていた(図13a)。下層から降水セルAにかけて負のドップラー速度が高度と共に正のドップラー速度へ変化した(図13a)。それに対応して、二重偏波レーダーで観測された、正の反射因子差(Z_{DR})の柱状の分布(Z_{DR} column)が観測された(図13b)。最も発達した降水セルCの出現時の構造について、16:13JSTに、降水セルCは、高度5.25kmに $Z \geq 40$ dBZを伴っていた(図13c)。降水セルCの梨大レーダー側の縁にて、下層から降水セルCに向かって、負のドップラー速度から正のドップラー速度に変化した(図13c)。それに対応して、 Z_{DR} columnが観測された(図13d)。以上のような降水セルに伴うドップラー速度と Z_{DR} のそれぞれの鉛直分布は、他の降水セルでも見られた(図なし)。降水セルの辺縁での Z_{DR} columnは、成長する雨滴を含む上昇流と対応することが示されている

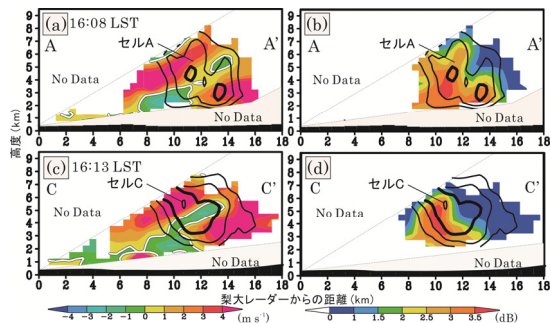


図13 (a)セルA(図12の線分A-A')と(c)セルC(図12の線分C-C')の反射強度(黒等値線)とドップラー速度(カラー陰影、正:梨大レーダーから離れる速度)の鉛直分布と、(b)セルAと(d)セルCの反射強度(黒等値線)と反射因子差(カラー陰影)の鉛直分布。黒陰影は地形を示す。

(Kumjian et al. 2014)。降水セルは、地表で形成された水平収束域の上空で、個々の積雲スケールの上昇流に伴い高い高度で出現したことが考えられた。

以上から、夏季の総観規模擾乱の弱い場における、高温かつ乾燥した盆地で出現する局地的降雨は、盆地とその外側の気温勾配により形成する地上の外側から盆地への局地風に伴う水蒸気輸送が起点であることが考えられた。また、上空での周囲の山岳から盆地への水蒸気移流による、盆地上空の条件付不安定の強化への寄与が示唆された。そして、盆地へ流入する地上風により形成した水平収束により、盆地内の局所で水蒸気が持ち上げとそこでの雲の形成が推察された。最後に、水平収束域の上空で、雲スケールの上昇流に伴うプライマリーセルの出現が推察された。その後、複数の降水セルの出現と組織化によって対流性降水システムが形成し、局地的降雨の出現につながったと考えられた。

これらの結果は、高温で乾燥した盆地での突然の局地的降雨の形成の一例を示すとともに、局地的な水循環過程における盆地への水の輸送とその中の局所への集中化の過程の一例も示すと言える。また、盆地の局地的降雨の出現の監視において、メソβスケールでの盆地への水蒸気輸送と局所への集中、そしてメソγスケールでの集中した水蒸気の持ち上げと降水セルの出現の、直接的な監視あるいはそれらの推察を可能にする観測システム構築の重要性を示す。

※参考文献

- Kumjian, M. R. et al., 2014: *J. Appl. Meteor. Clim.*, 53, 1820-1843.
Sato, T., and F. Kimura, 2005: *J. Atmos. Sci.*, 62, 1626-1636.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 7 件)

- ① 佐野哲也, 冬季の南岸低気圧に伴い発生する甲府盆地の大雪の解析, ワークショップ「降雪に関するレーダーと数値モデルによる研究 in 長岡 (第 15 回)」～固体降水量観測の高精度化とその活用に向けて～, 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター(新潟県長岡市), 2016 年 11 月 21~22 日.
- ② 佐野哲也, 大石哲, 夏季静穏時に甲府盆地で発達した対流性降水システムの出現に先立つ気象場の事例解析, 日本気象学会 2016 年秋季大会, 名古屋大学(愛知県名古屋市), 2016 年 10 月 26~28 日.
- ③ Tetsuya SANO, Tadashi SUETSUGI, and Satoru OISHI, Case Study on Preceding Meteorological Conditions of Sudden

Appearance of Convective Precipitating Cells on Kofu Basin in Summer, 3rd International Workshop on Tokyo Metropolitan Area Convection Study for Extreme Weather Resilient Cities (TOMACS), Japan Meteorological Agency (Chiyoda, Tokyo), 4 - 5 February, 2016.

- ④ 佐野哲也, 末次忠司, Ratih Indri Hapsari, Nurul Nadiyah Binti Norzan, 複数の小河川を対象とする X-MP レーダー降雨量を入出計算, 土木学会第 70 回年次講演会, 岡山大学(岡山県岡山市), 2015 年 9 月 16-18 日.
- ⑤ 佐野哲也, 末次忠司, 大石哲, 甲府盆地にもたらされた南岸低気圧に伴う大雪の特徴と形成過程, 南岸低気圧とそれに伴う気象・雪氷災害に関する研究会, 気象庁気象研究所(茨城県つくば市), 2015 年 8 月 10 日.
- ⑥ 佐野哲也, 末次忠司, 大石哲, 2014 年 2 月 14-15 日に甲府盆地にもたらされた南岸低気圧に伴う豪雪の特徴と形成過程, 日本気象学会 2014 年秋季大会, 福岡国際会議場(福岡県福岡市), 2014 年 10 月 21~23 日.
- ⑦ Tetsuya SANO, Tadashi SUETSUGI and Satoru OISHI, Characteristics of distribution and preceding surface conditions of cumulonimbus clouds appeared on Kofu Basin on a calm, Japan Geoscience Union Meeting 2014, Pacifico YOKOHAMA (Yokohama, Kanagawa), 28 April to 2 May 2014.

[図書] (計 1 件)

- ① 佐野哲也, 砂田憲吾, 大石哲, 中村高志, 末次忠司, 盆地周囲の山岳斜面での降雨強化機構と盆地内で出現する夏季の短時間大雨の出現前の地上気象場の解析, 気象研究ノート「都市における極端気象の観測・予測・情報伝達」(分担執筆), 日本気象学会(印刷中).

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

- 招待講演 (計 1 件)
- ① 佐野哲也, 昨年度(2014 年度)の大雪について, 甲府地方气象台, 2015 年 3 月 12 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐野哲也 (SANO, Tetsuya)

国立研究開発法人 情報通信研究機構・電磁波研究所リモートセンシング研究室・研究員

研究者番号: 90533589