

# 2015年関東・東北豪雨災害 土木学会・ 地盤工学会合同調査団関東グループ

## 降水・大気場に関する検討

北海道大学大学院工学研究院 山田朋人\*

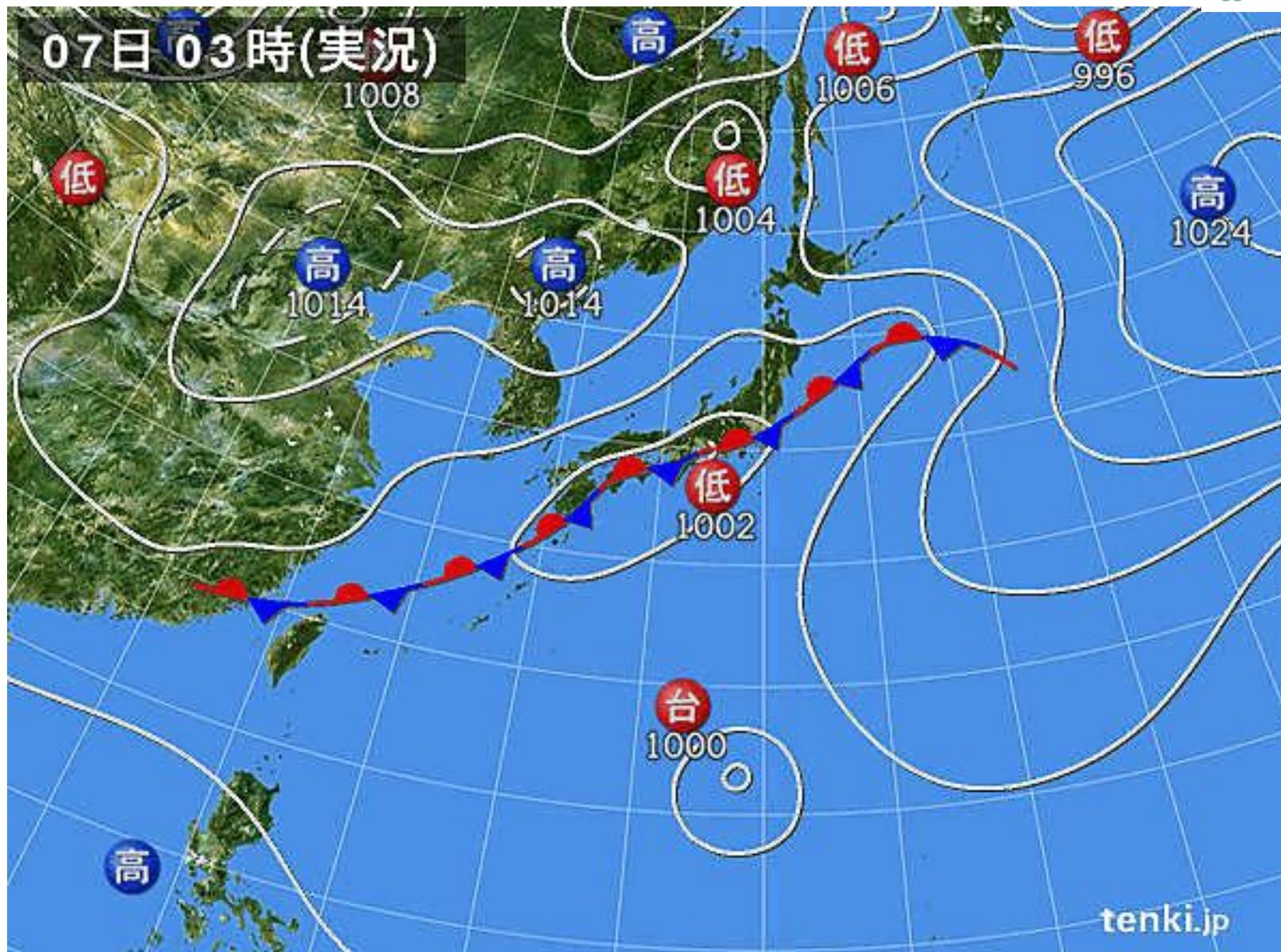
東京大学大気海洋研究所 芳村圭

2015年12月15日発表資料

\*Email: [tomohito@eng.hokudai.ac.jp](mailto:tomohito@eng.hokudai.ac.jp)

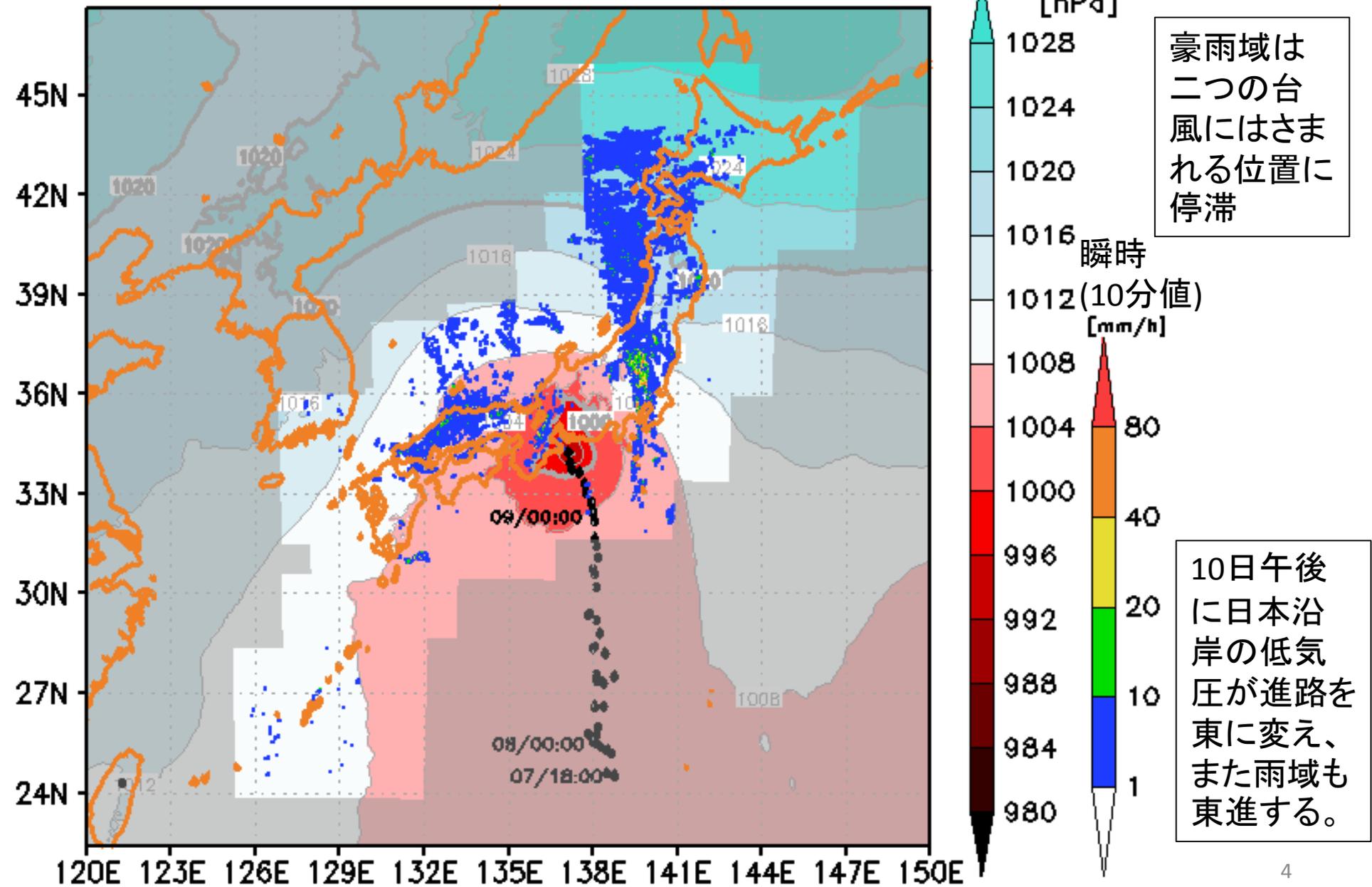
# 検討内容

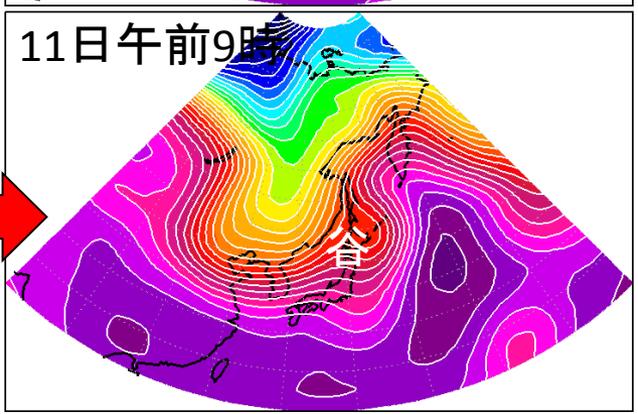
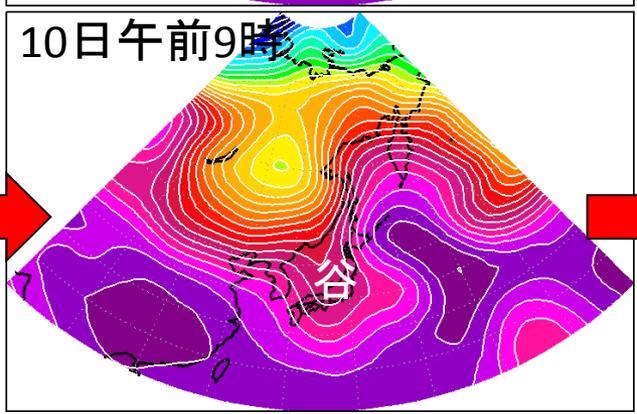
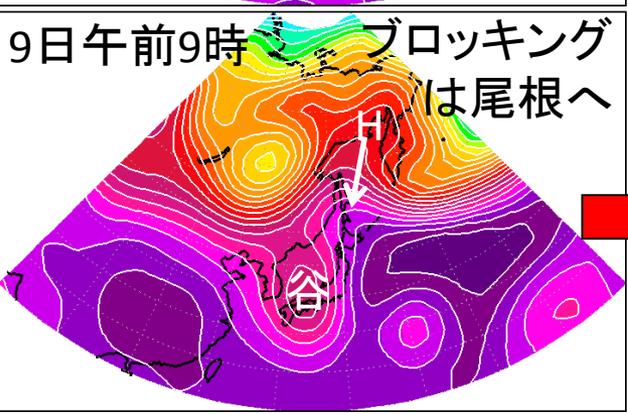
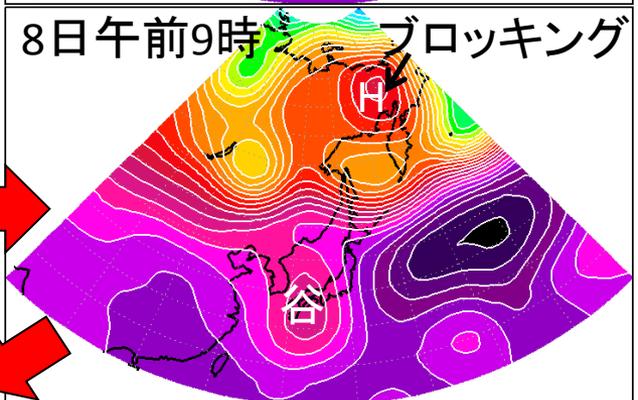
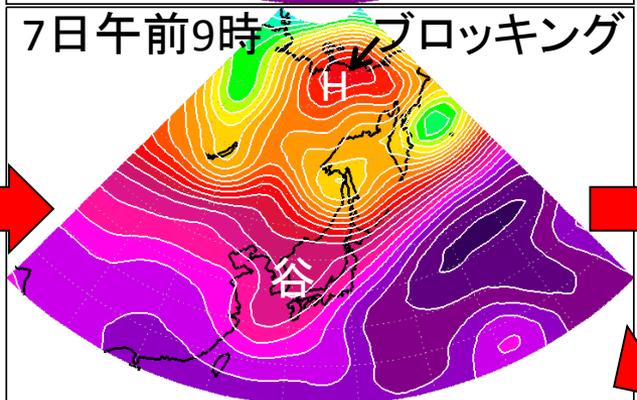
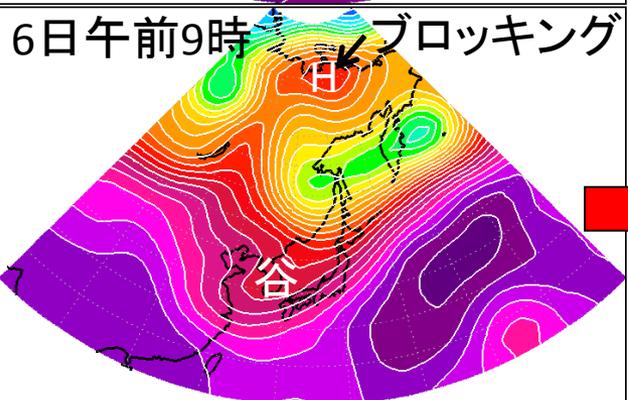
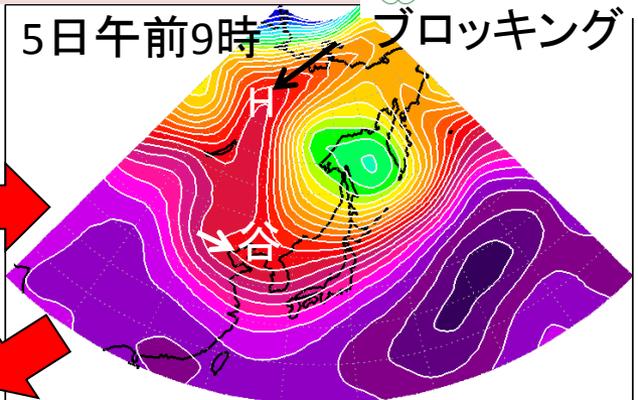
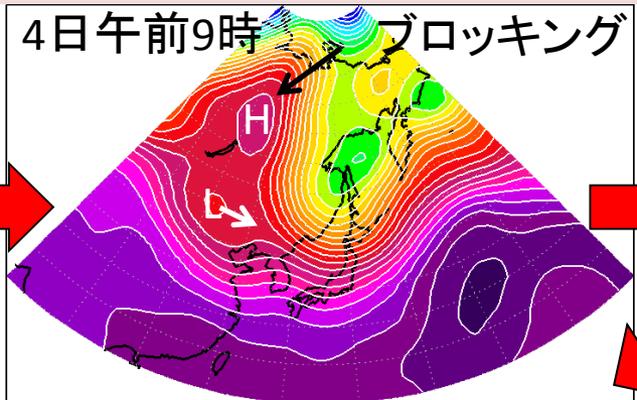
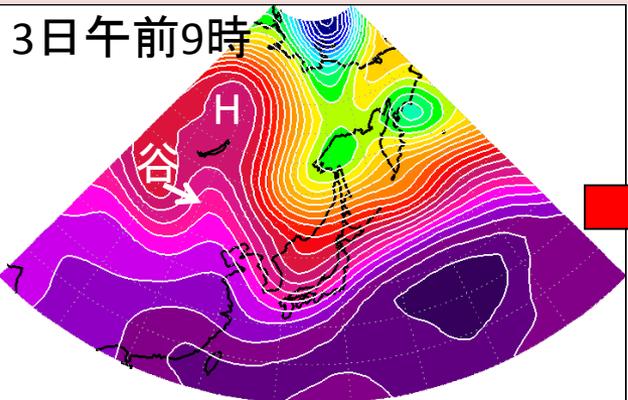
- 地上雨量
  - 新記録の理論、長期統計、既往最大降雨
- レーダ雨量の時空間特性
  - 気象庁Cバンド、国交省XバンドMPLレーダ
- 大規模気象場
  - 台風、ブロッキング、水蒸気供給
- レーダによるドップラー速度と反射強度の3次元構造
  - 線状降水帯
  - 変分法による分析



日本列島南方より、台風18号が接近、上陸(9日午前)。日本海に抜け温帯低気圧化(9日21時)。台風17号が南東より接近。関東での豪雨時には約1000km東方に位置。

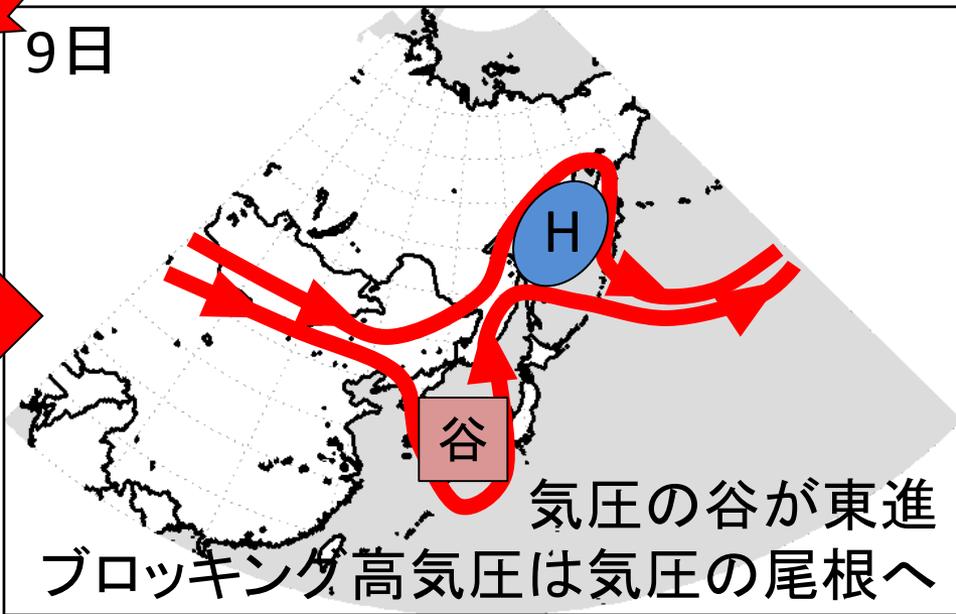
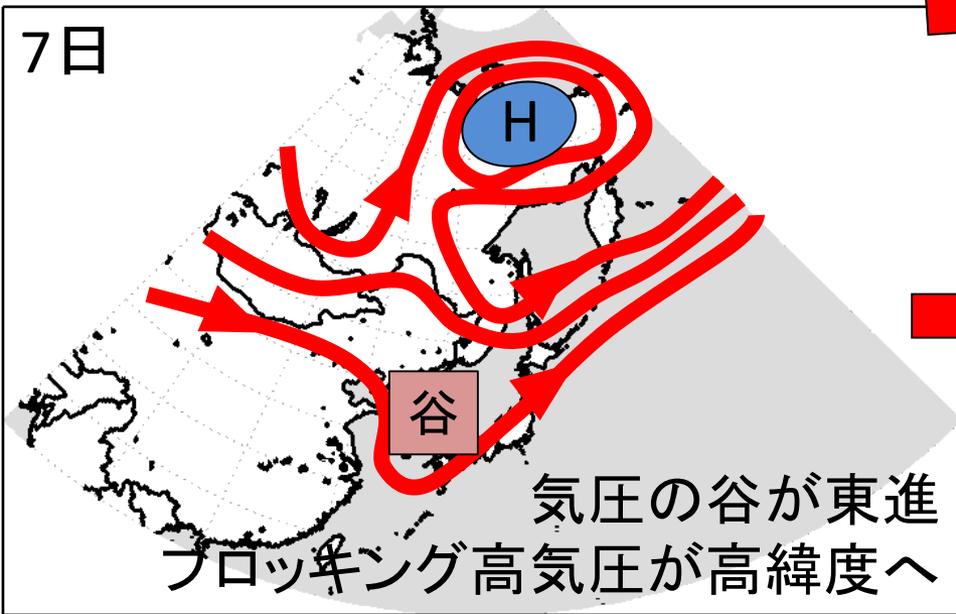
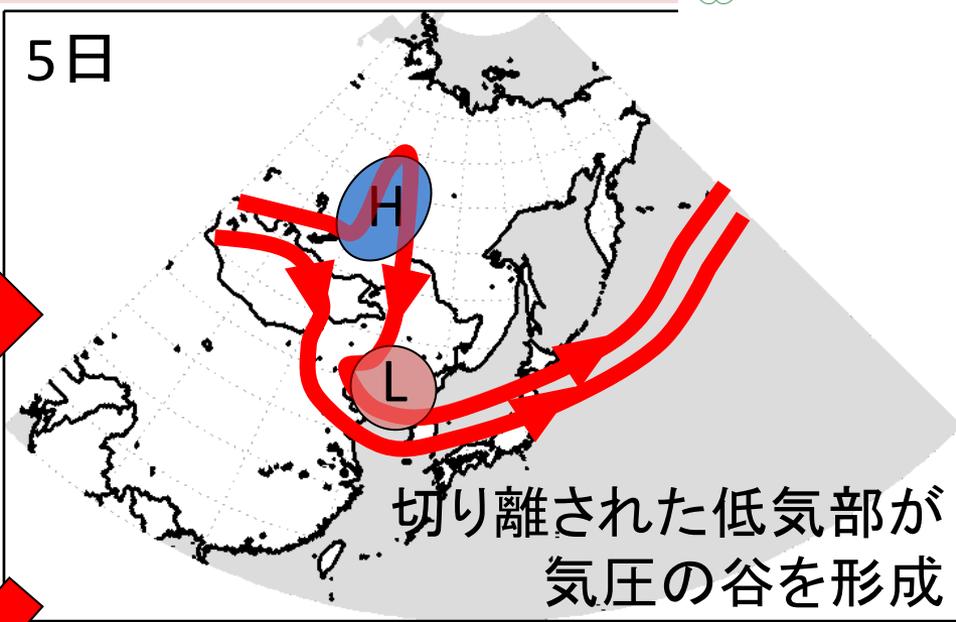
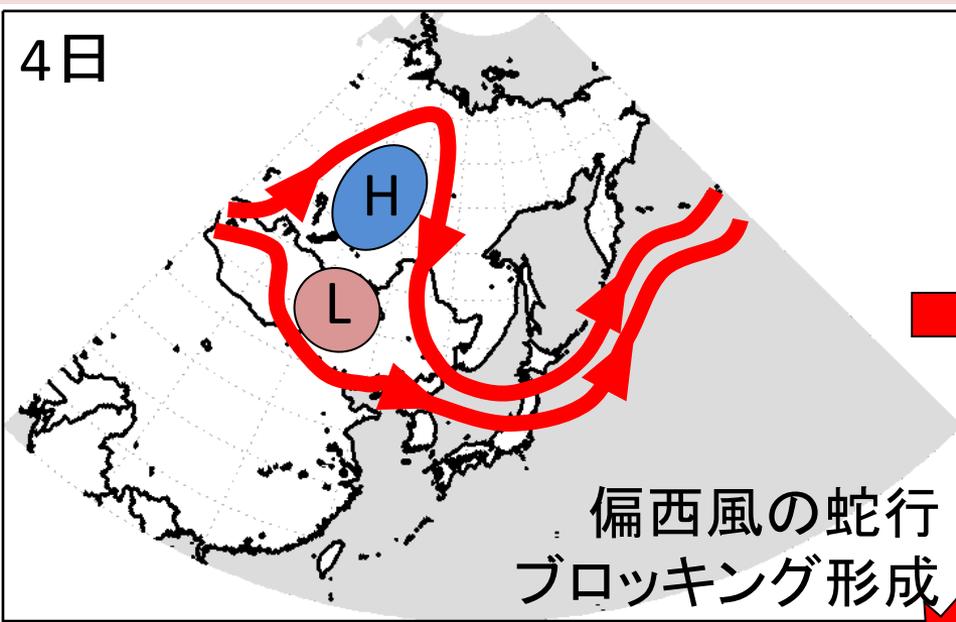
2015.09.09\_09:00 JST





4日に大陸でブロッキング高気圧が発生するとともに、気圧の谷も形成し、日本へと東進。

まとめ: 2015年9月上旬 大気中・上層の流れ場 (500hPa面高度場)



※ブロッキングインデックスを用いると9月4~8日にブロッキングが発生

# 850hPa面の比湿と降水域

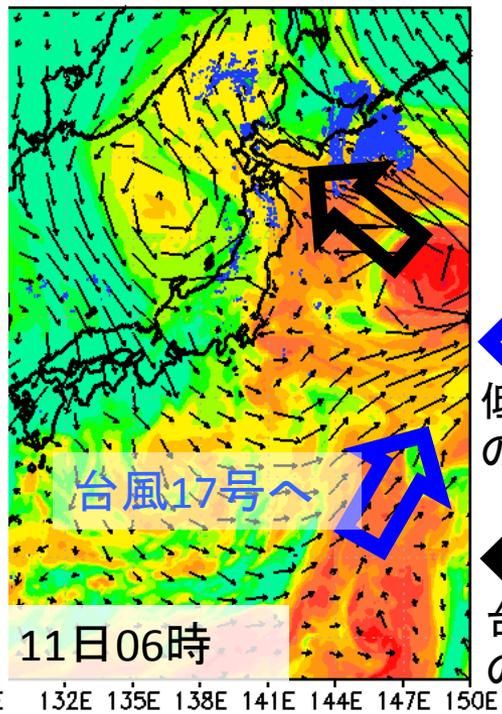
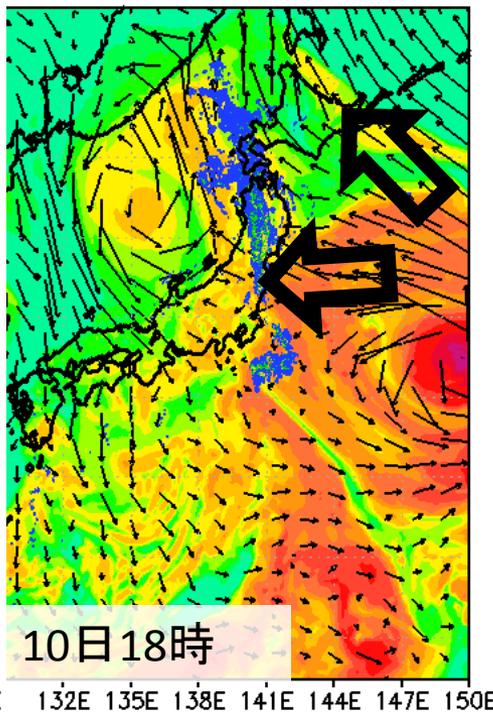
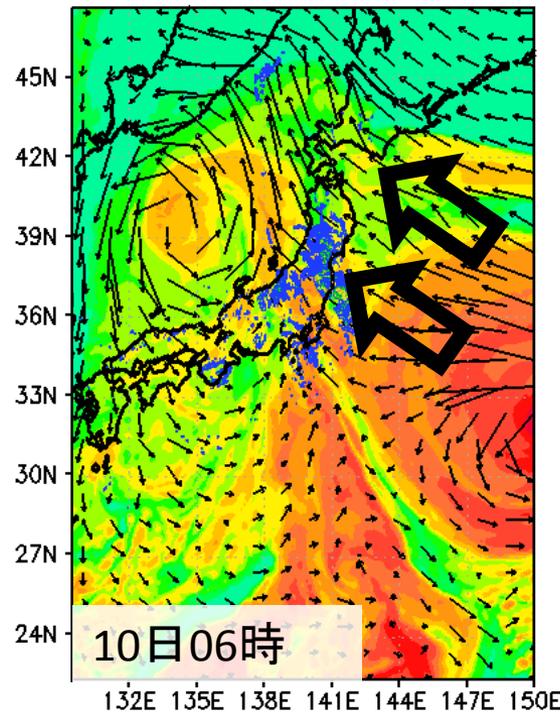
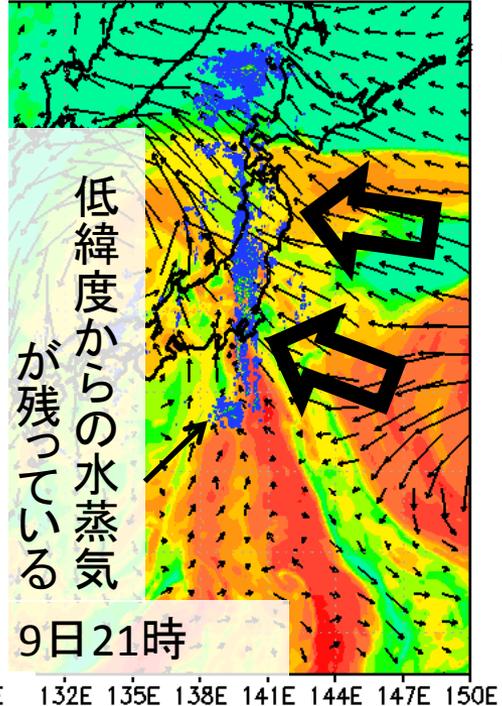
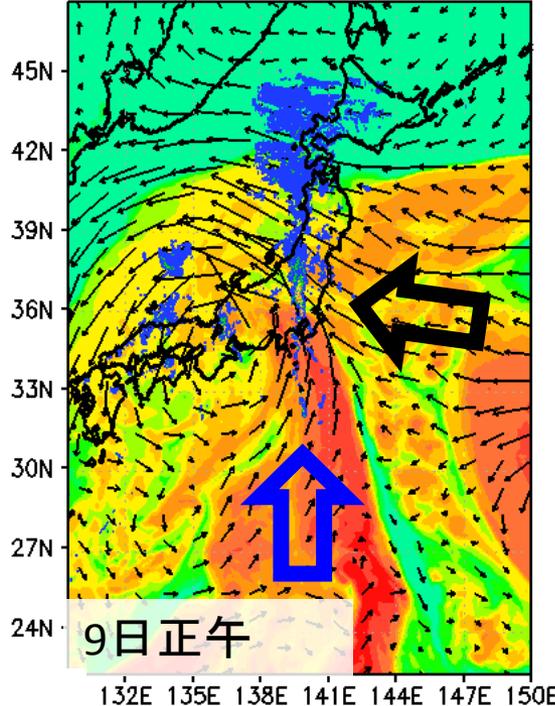
※メソ数値気象モデルGPV (MSM)データを使用

9日 日中: 低緯度からの水蒸気が関東沿岸へ。台風17号からの水蒸気が東北へ

9日 夜: 低緯度からの水蒸気が関東沿岸に残留。

10日 午前: 台風17号が主要な水蒸気の供給源に。

10日 午後以降: 雨域が移動。東北、北海道へ。

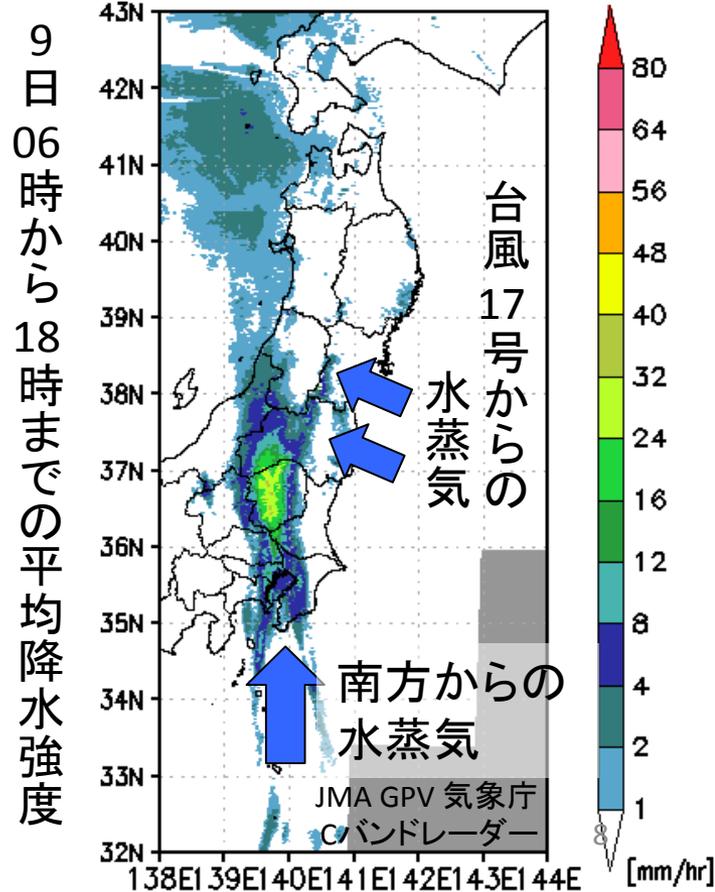
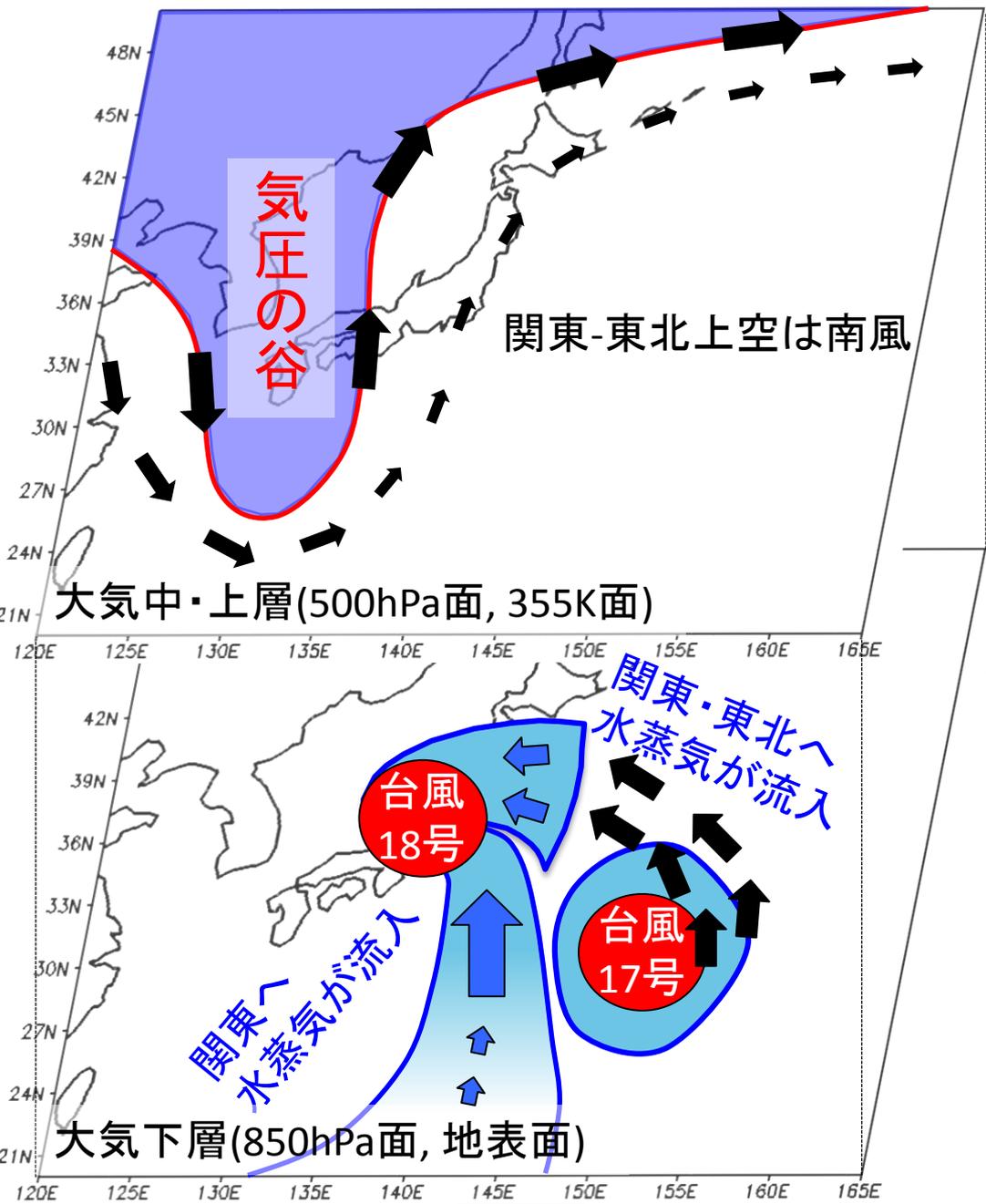


← 低緯度からの水蒸気流入

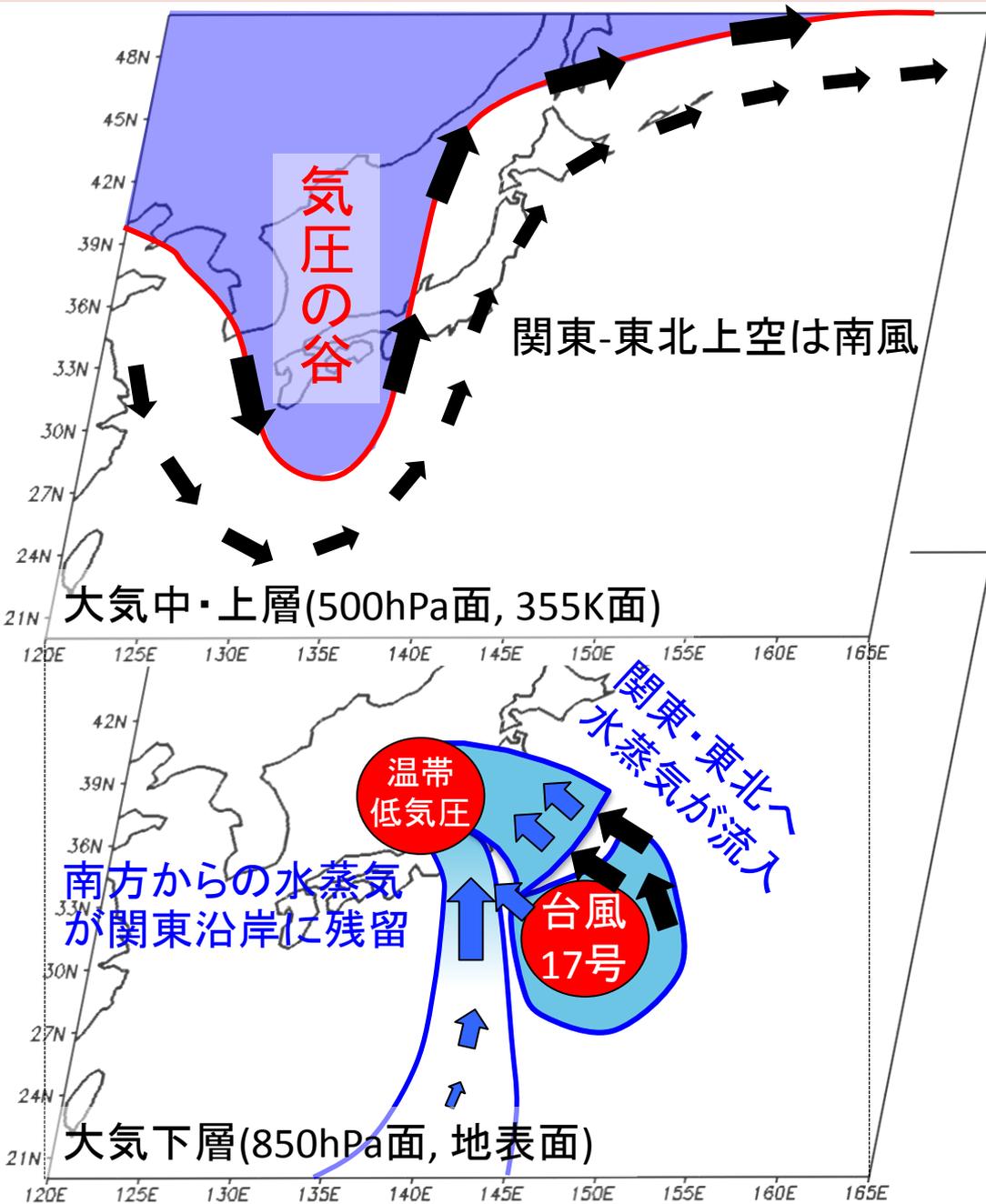
← 台風17号からの水蒸気流入

# まとめ: 2015年9月9日午前~夕方の大気場

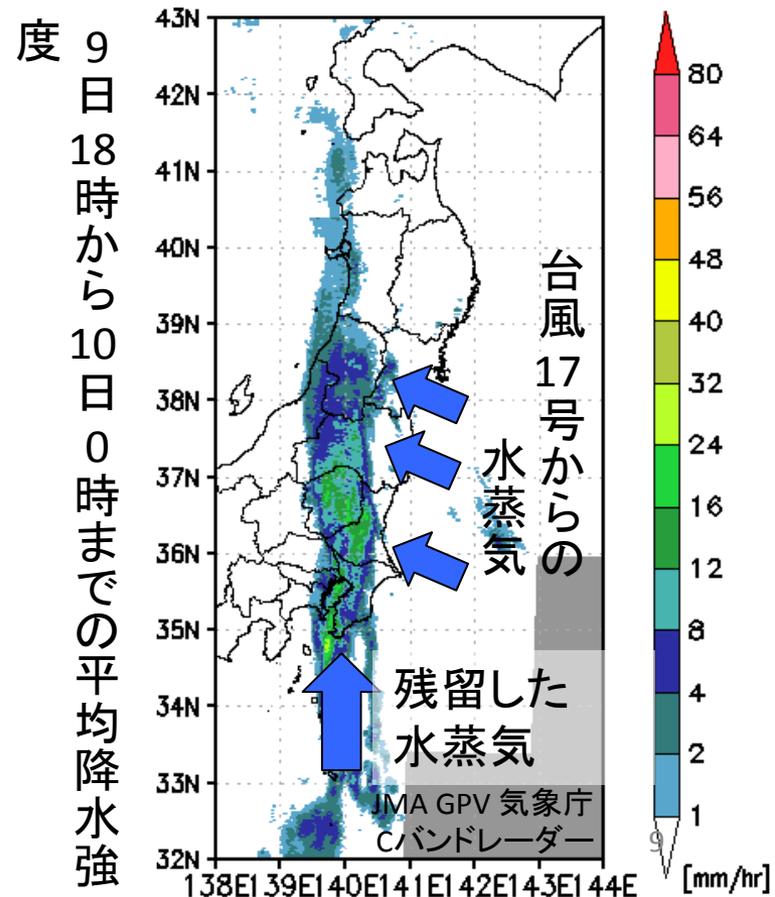
- 上空には気圧の谷。関東-東北にかけて南風。
- 台風18号が低緯度より水蒸気を関東地方に引き込む。
- 台風17号~台風18号にかけて風が流れ込み、関東-東北沿岸より水蒸気が流入。



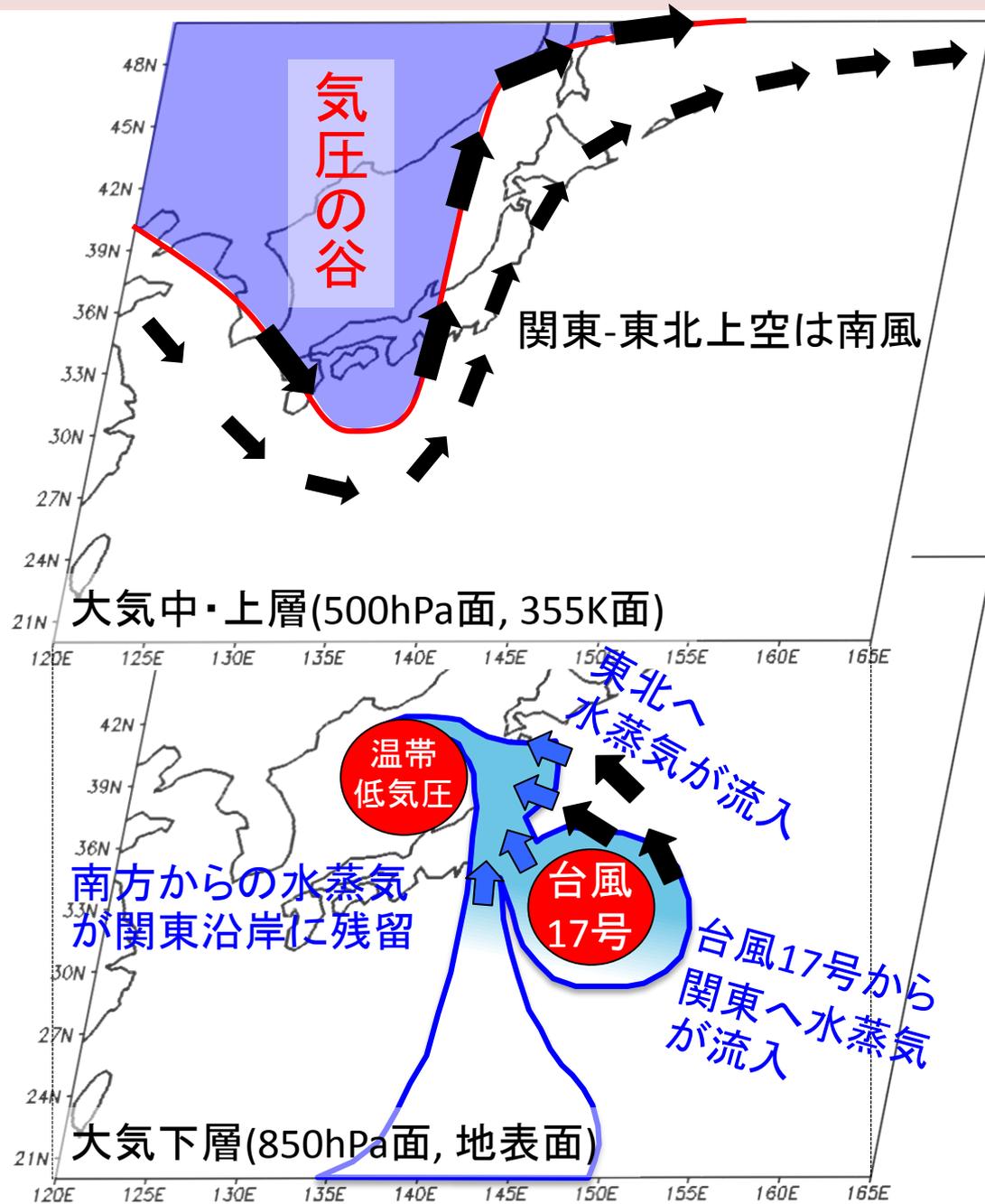
# まとめ: 2015年9月9日夜の大気場



- 上空の気圧の谷の下へ台風18号が移動、温帯低気圧化。

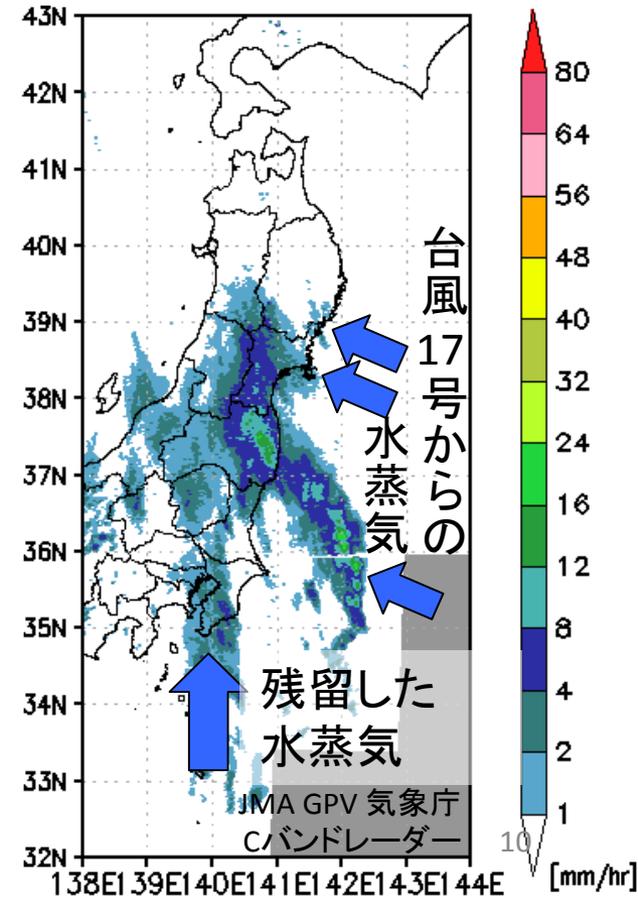


# まとめ: 2015年9月10日午前の大気場

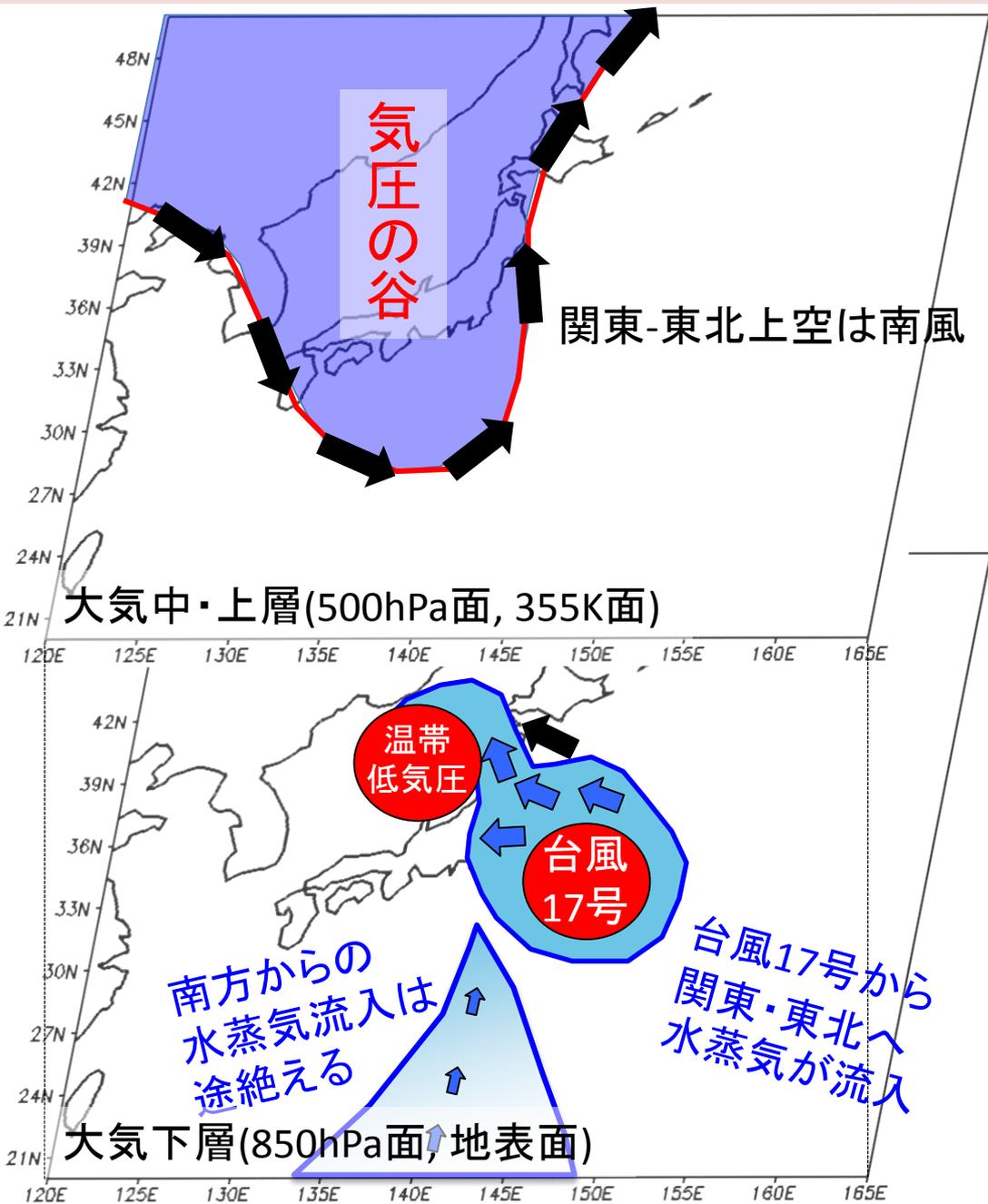


- 気圧の谷が関東へ接近。
- 台風17号から、水蒸気が関東地方へ流入
- 降水域が関東の東沿岸にも形成

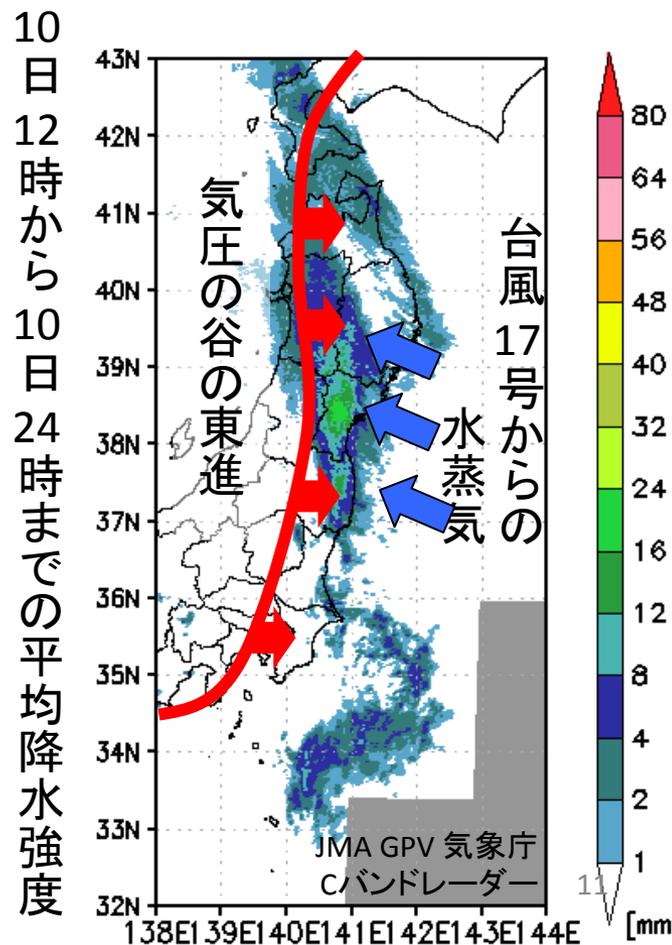
10日0時から10日12時までの平均降水強度



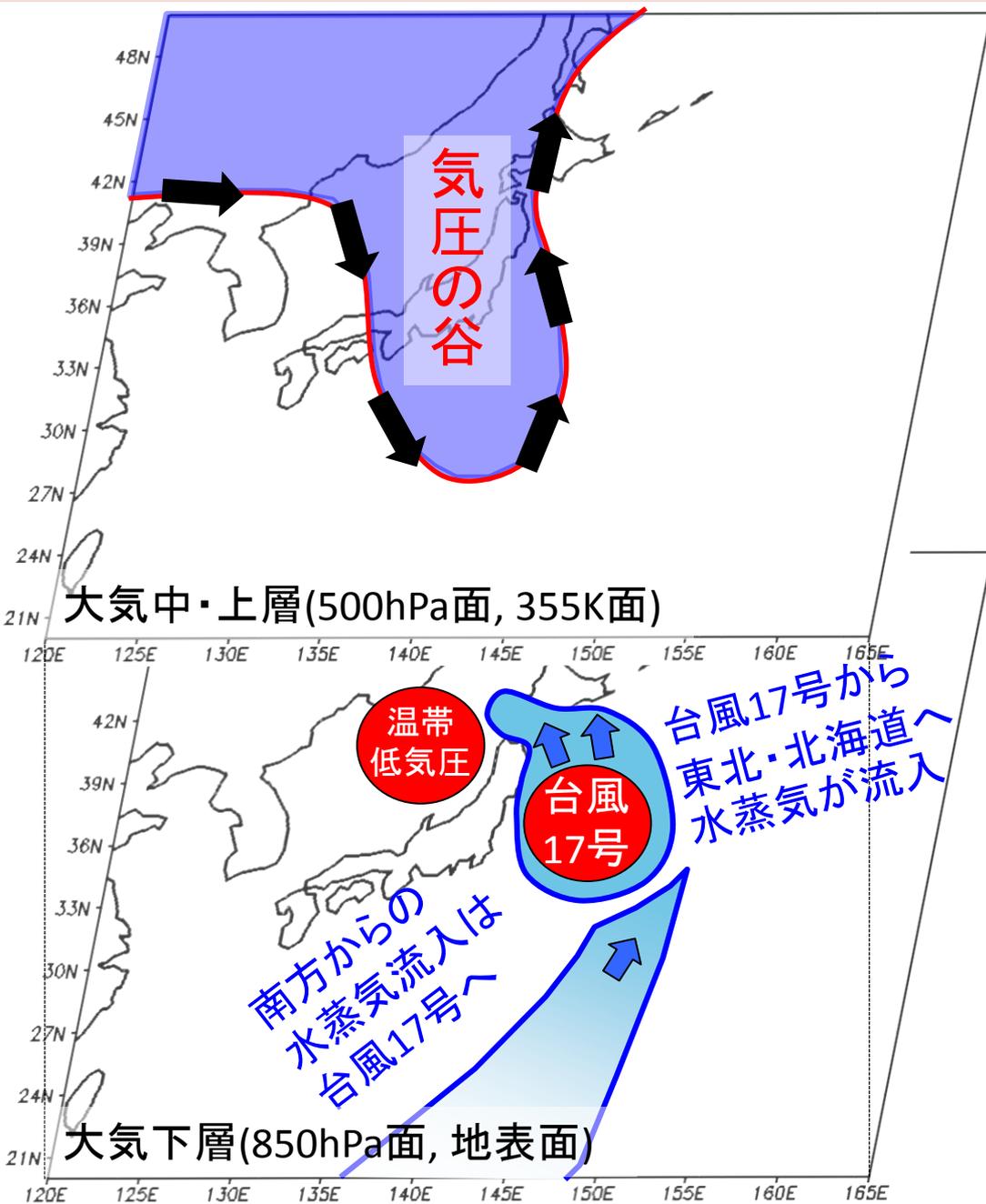
# まとめ: 2015年9月10日午後の大気場



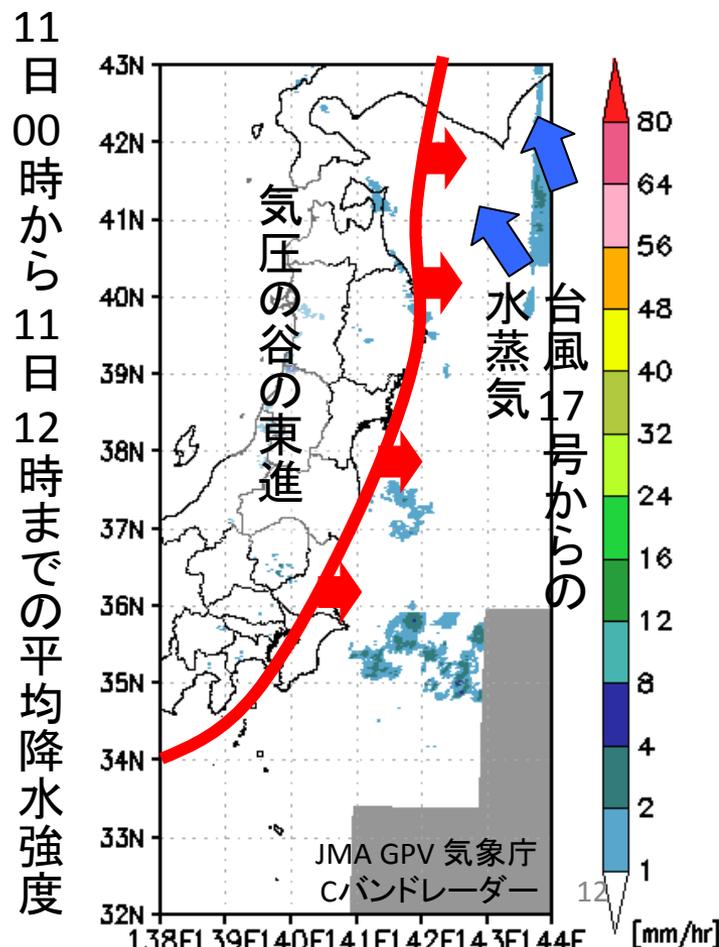
- 低緯度からの水蒸気の流入が途絶える。
- 台風17号から関東・東北へ水蒸気が流入
- 降水域は東北地方へ



# まとめ: 2015年9月11日午前の大気場



- 降水域は停滞せず北方へ
- 台風17号からの水蒸気は主に北海道へ
- 日本列島南方からの水蒸気は台風17号へ供給される

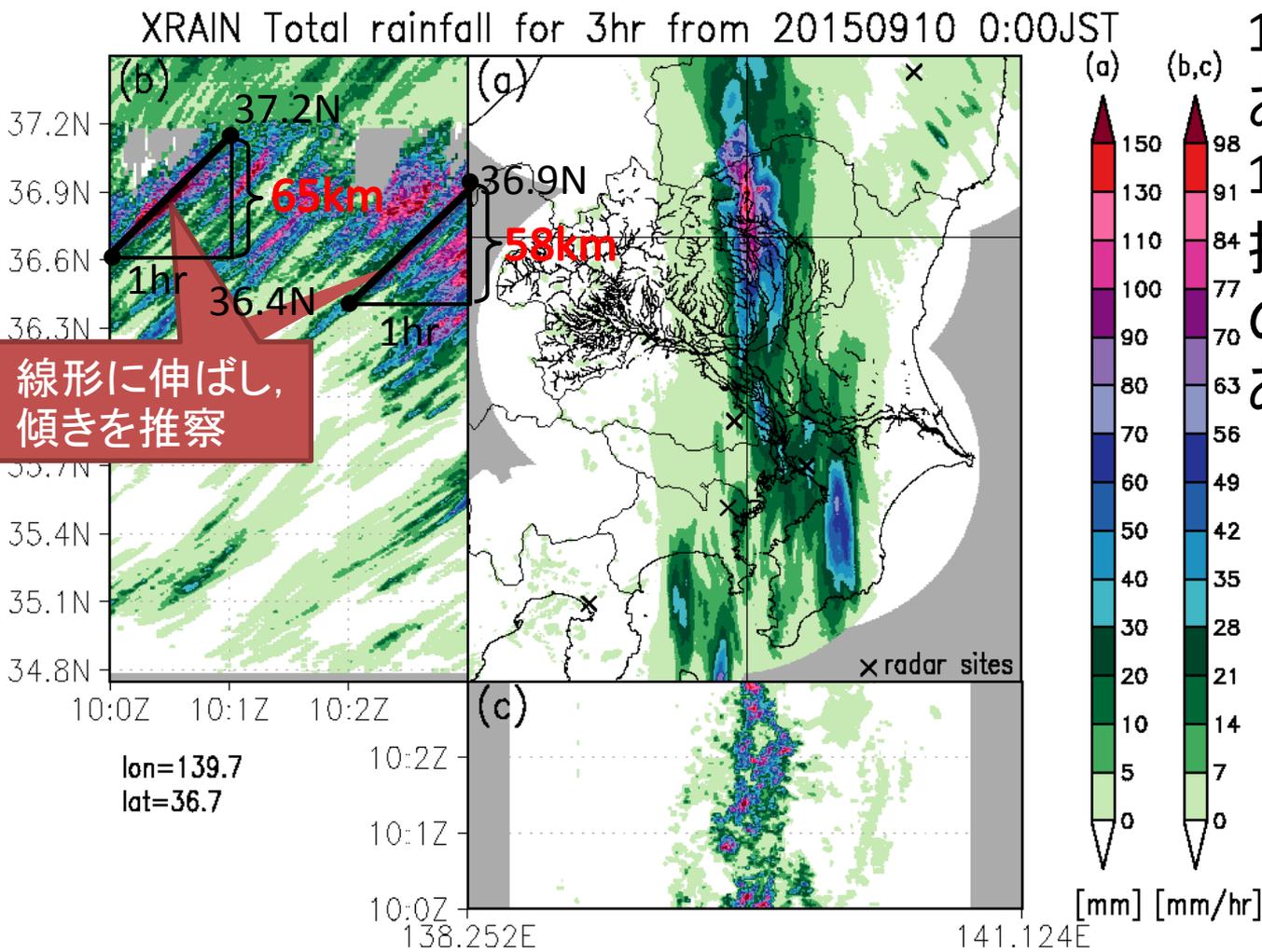


# 雨域の移動速度 ~XRAINの観測雨量による推定値~

2015年9月10日0時から9月10日3時までの

- (a) 3時間積算雨量[mm]
- (b) 東経139.7° におけるホフメラーダイアグラム
- (c) 北緯36.7° におけるホフメラーダイアグラム

MUSCUT法による  
10日午前2時-3時に  
おける36.4N-36.9N,  
139.7Eの風速の  
推定値. 但し, この時  
の風向は南南東で  
あった.



高度 (km)	風速 (m/s)
1.4	15 → 54 [km/hr]
3.5	20 → 72 [km/hr]
4.9	27 → 97.2 [km/hr]

# 変分法による3次元風速場の算出: MUSCAT法

(Yamada, Y. 2013) (Bousquet and Chong, 1997)

- ・レーダの観測値(反射強度, ドップラー速度  $V_q$ )  
 → カートesian座標系における3次元風速( $u, v, w$ )を算出

## ・変分法を使用: 汎関数(関数の関数)

汎関数  $F$  を 最小 にするような  $u, v, w$  を各高度面において求める方法。

$$F(u, v, w) = \int_s [A(u, v, w) + B(u, v, w) + C(u, v, w)] dx dy$$

$$\frac{\partial F}{\partial u} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial v} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial w} = 0$$

➡ 同時に満たす

$$A(u, v, w) = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^{n_p} \sum_{q=1}^{n_q(p)} \omega_q [\alpha_q u + \beta_q v + \gamma_q (w + v_T) - V_q]^2 : \text{動径方向成分の解析値と観測値 } V_q \text{ の差}$$

$$B(u, v, w) = \mu_1 \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho w}{\partial z} \right)^2 : \text{連続式(束縛条件)}$$

$$C(u, v, w) = \mu_2 [J_2(u) + J_2'(u) + J_2(v) + J_2'(v) + J_2(w) + J_2'(w)] : u, v, w \text{ の二次微分とその微分の二乗和(平滑化)}$$

$p$ : レーダ番号

$q$ :  $p$  番のレーダーのビーム番号

$N$ :  $q$  の全領域における総和

$\omega_q$ : cressmanの重み関数

$\alpha_q, \beta_q, \gamma_q$ : 方向余弦(流速方向を修正する係数)

$v_T$ : 雨滴の終端落下速度 (m/s)

$\mu_1, \mu_2$ : 正規化重み付きパラメータ

$\rho$ : 大気密度 (kg/m<sup>3</sup>)

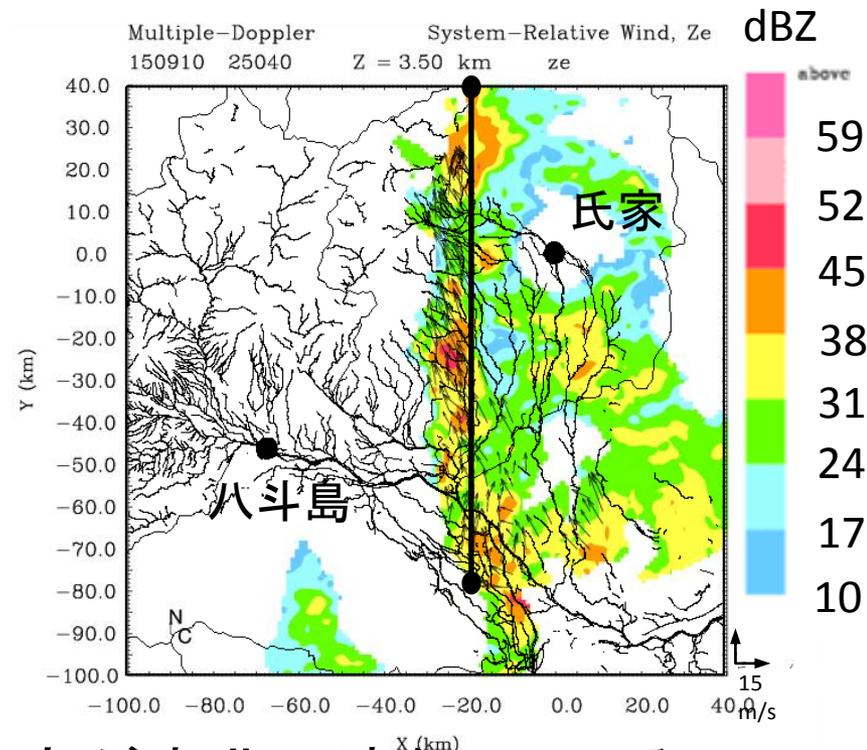
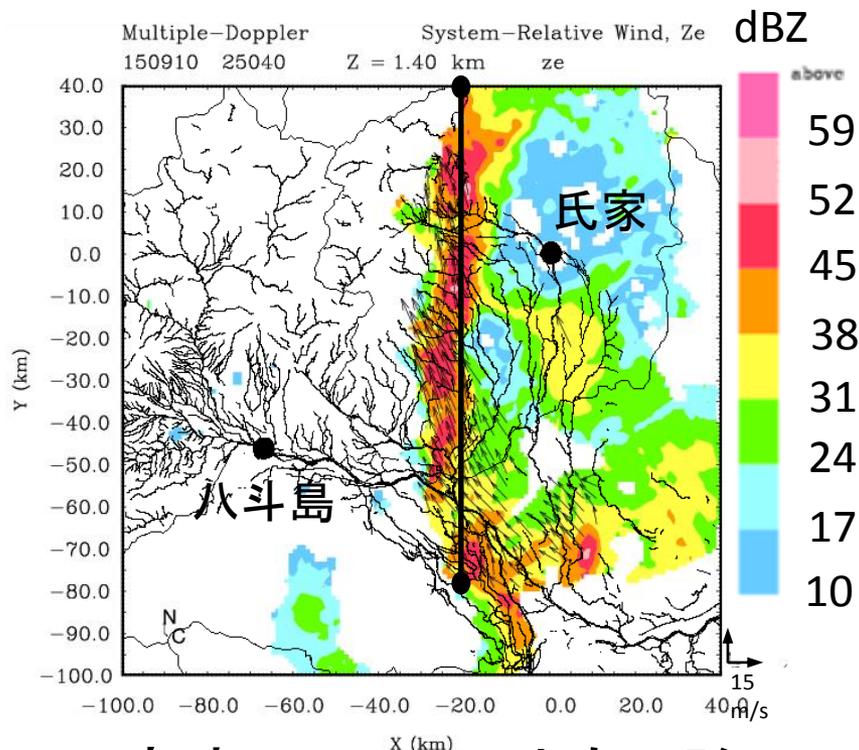
$J_2$ : 微分演算子

# XRAIN(氏家と八斗島)による高度別の反射強度[dBZ] と水平風速の合成ベクトル[m/s]

2015年9月10日午前2時50分

高度: 1.4km

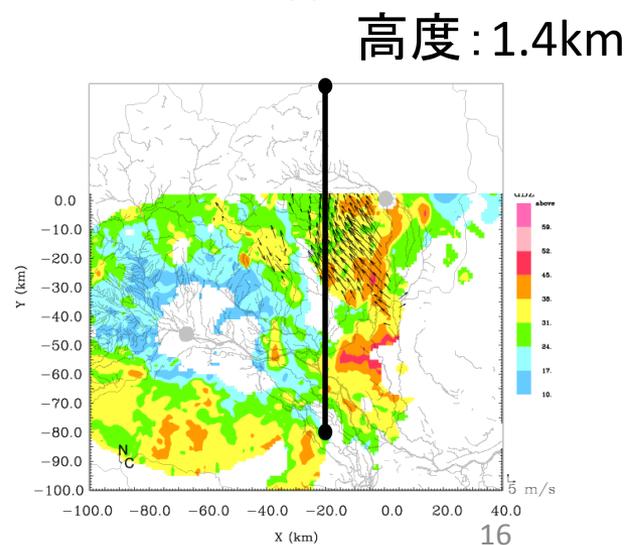
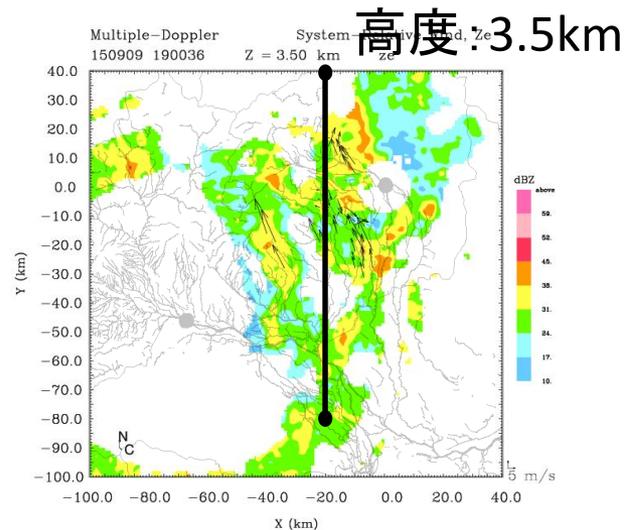
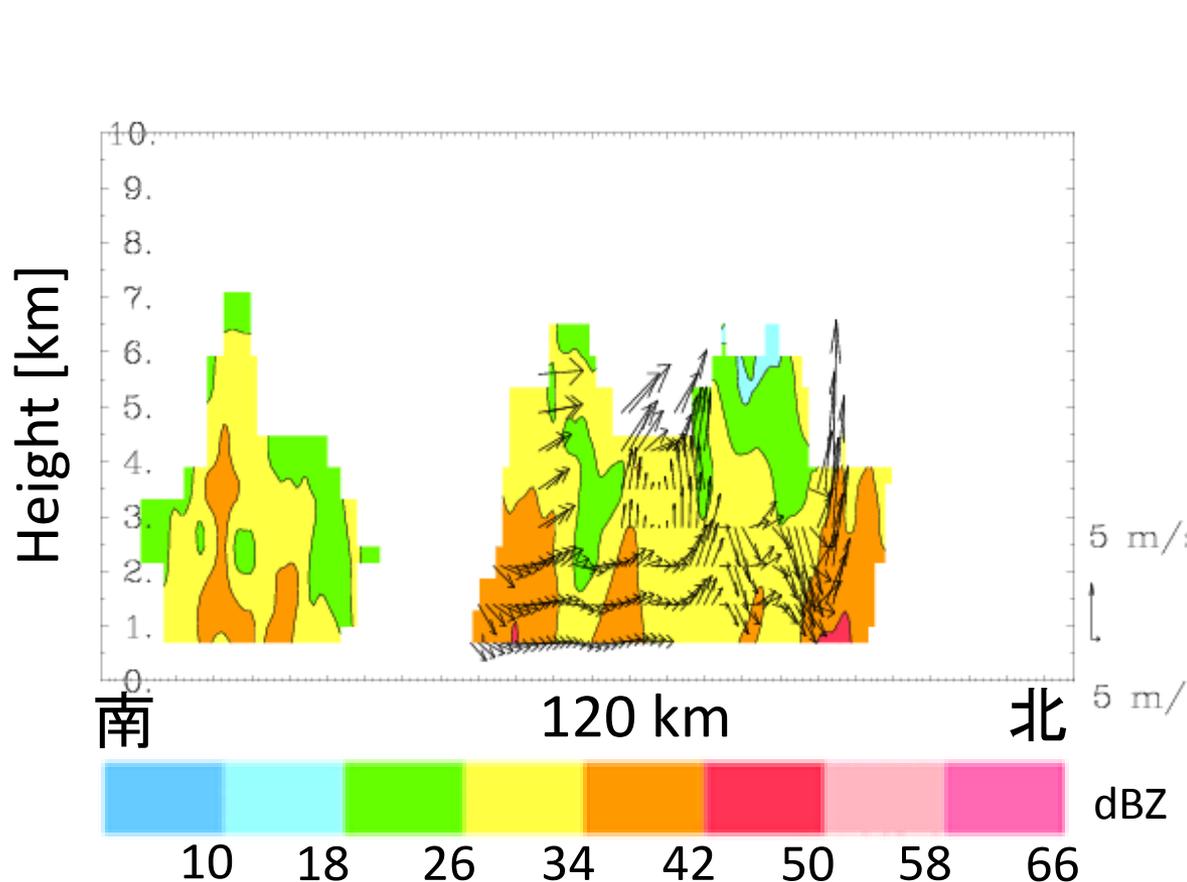
高度: 3.5km



高度1.4, 3.5kmともに強い反射強度が南北に連なっている。  
両高さともに南東風。

# XRAIN(氏家と八斗島)による反射強度[dBZ]と 南北-鉛直風速[m/s]の断面図

2015年9月9日午後7時00分～9月10日午前4時00分

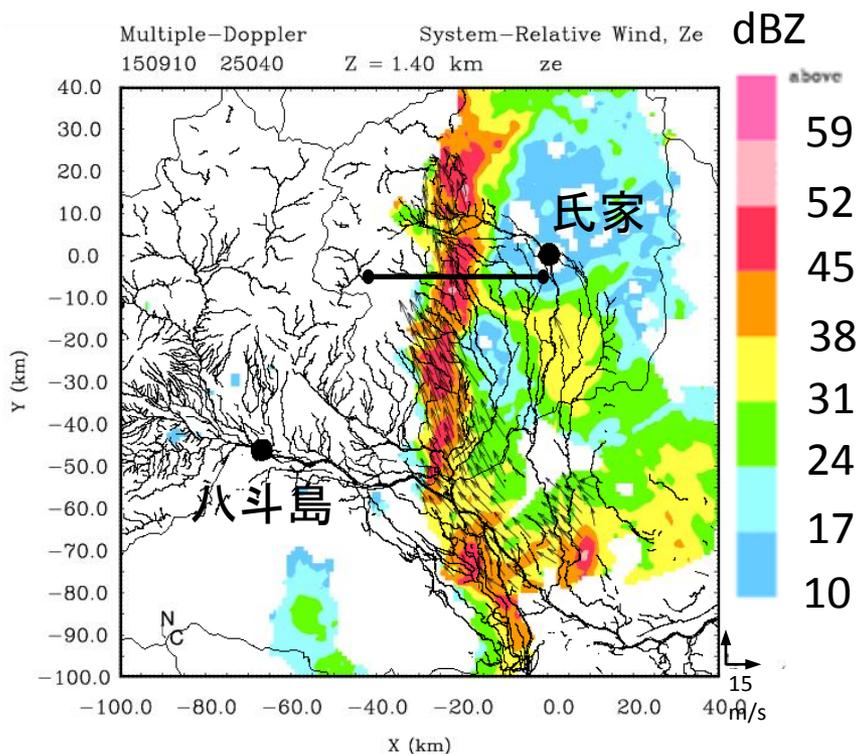


南北方向に強い上昇風と反射強度が繰り返し発生している。

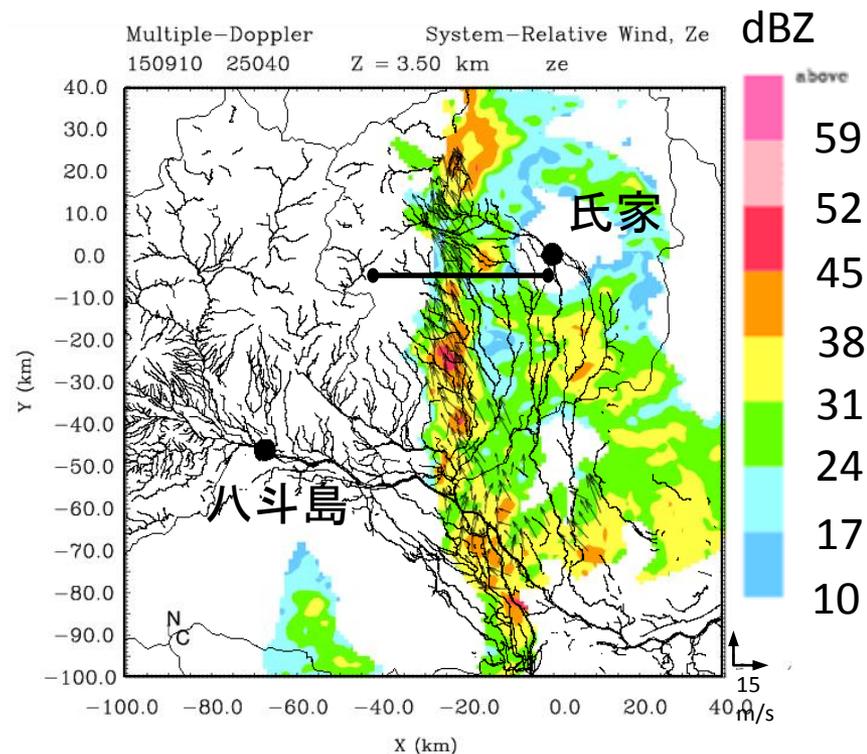
# XRAIN(氏家と八斗島)による高度別の反射強度[dBZ] と水平風速の合成ベクトル[m/s]

2015年9月10日午前2時50分

高度: 1.4km



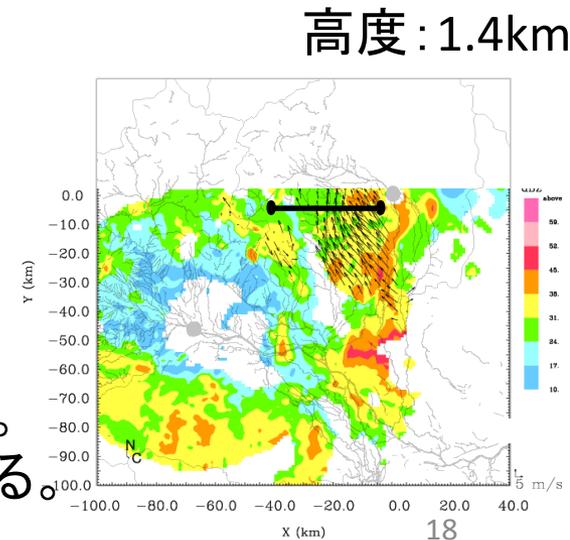
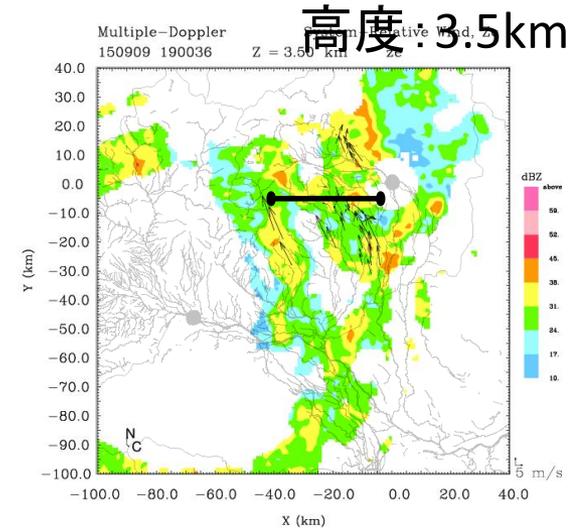
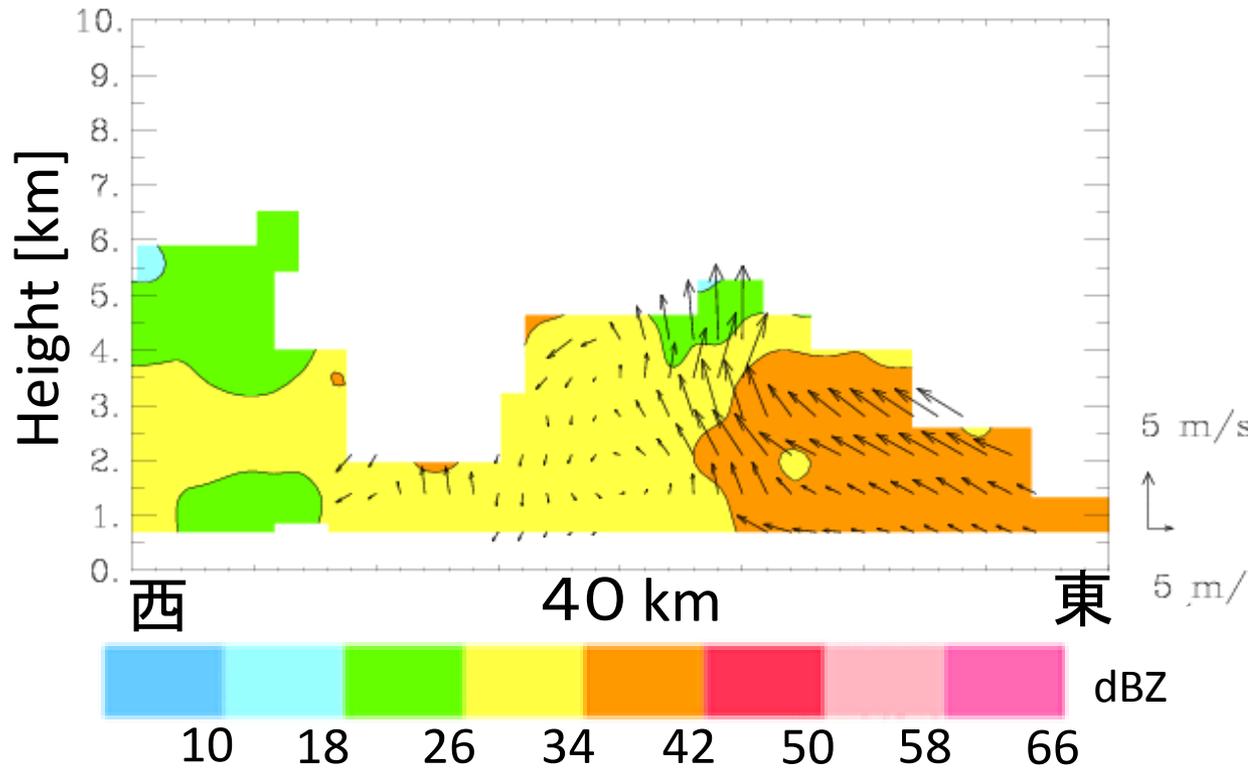
高度: 3.5km



## 東西-鉛直風速[m/s]の断面図

/external9/knagao/MRI-Radar/MUSCAT/Sh/uvw\_uxy/uvw\_09190036\_uxy

2015年9月9日午後7時00分～9月10日午前4時00分



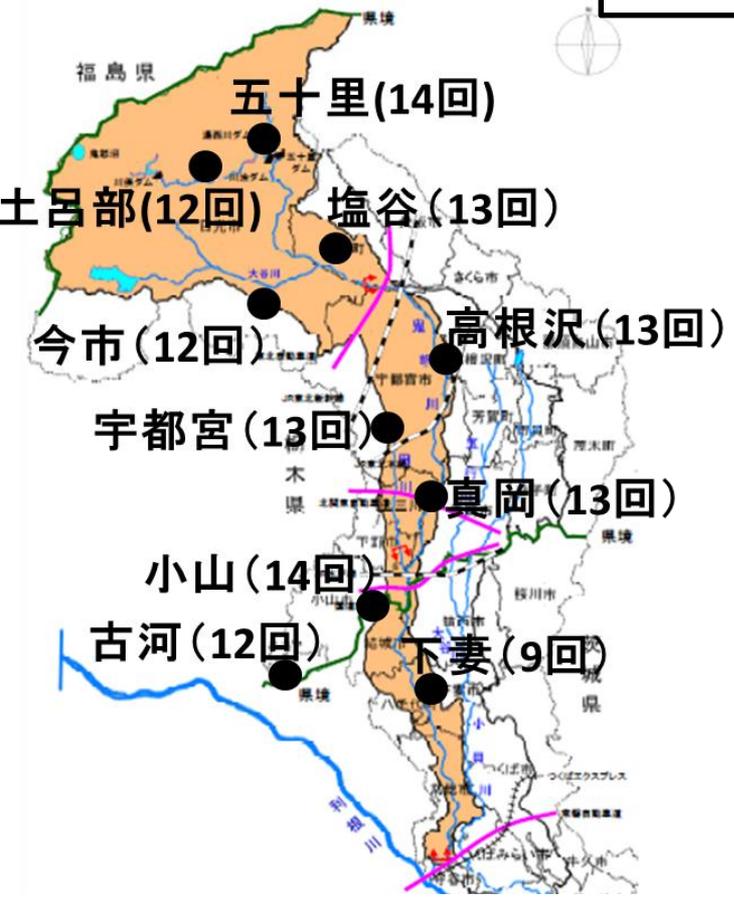
上昇流の強い地域に東(1-3km高さ)から風が流入している。  
また、流入した風は東西-鉛直方向に循環する様子が見える。

# 鬼怒川流域と周辺の観測所10地点における (1時間,24時間積算)降雨量最大記録更新回数

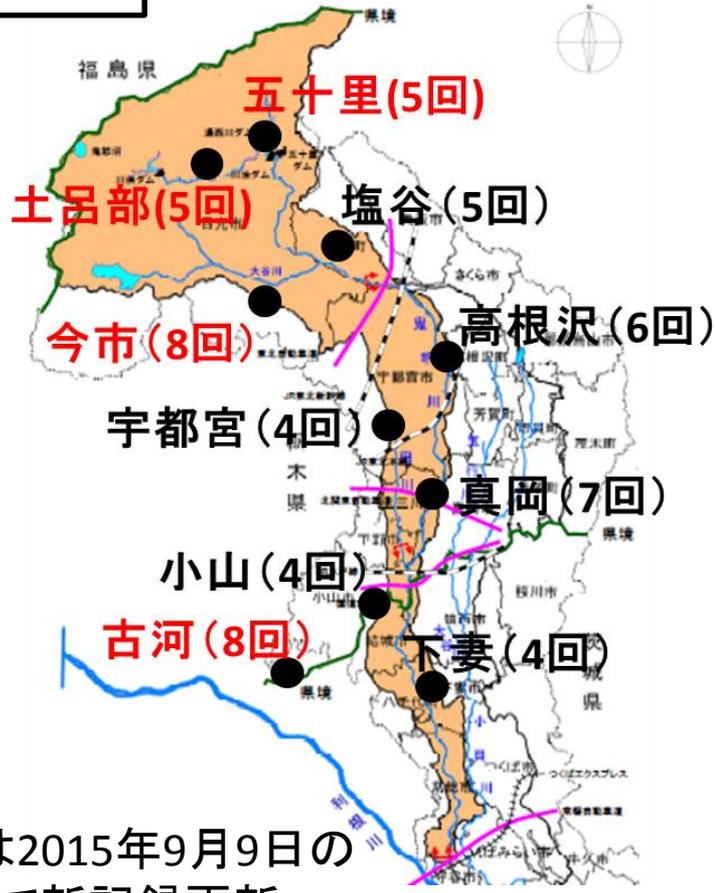
1時間雨量(mm/hr)  
最大記録更新回数

**AMeDASの1時間雨量データを使用**  
(2008年~2009年にかけて  
毎10分値→任意の時分で観測に変更)

24時間雨量(mm/day)  
最大記録更新回数



観測所	観測開始 年月日
五十里	1977.11.10
土呂部	1977.11.10
塩谷	1978.12.21
今市	1978.12.21
高根沢	1974.11.1
宇都宮	1949.1.1
真岡	1976.3.26
小山	1976.3.26
古河	1976.3.12
下妻	1976.1.1



**赤字**は2015年9月9日の  
雨で新記録更新

複数の地点において24時間降雨量が過去最高を記録した

# 24時間積算降雨量(mm/day)新記録の定義

仮定

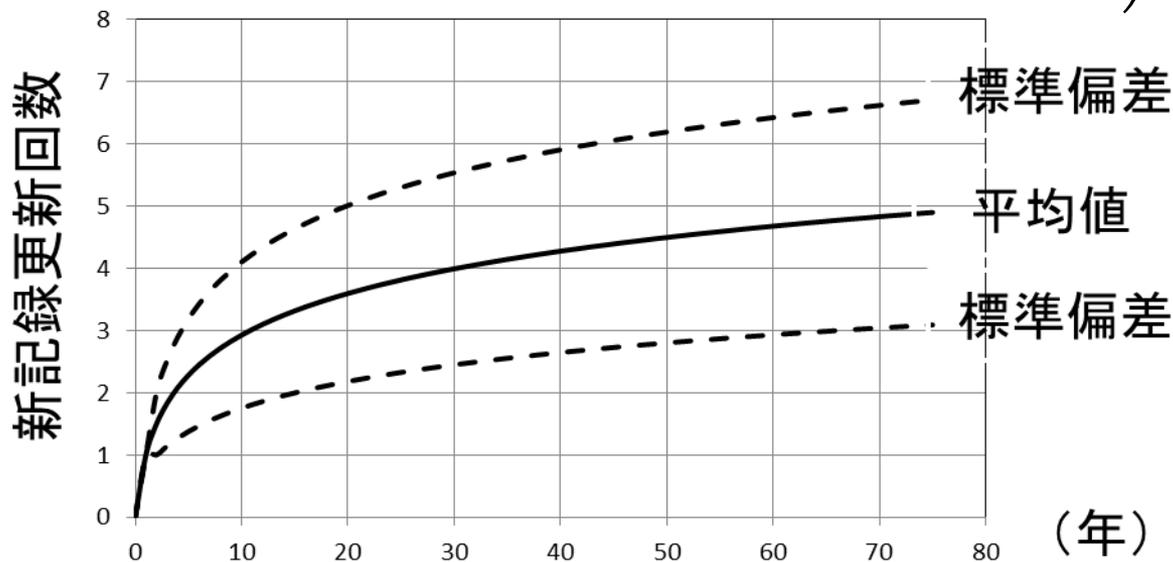
渡辺、山田(1992)より

- ・各年の年最高24時間積算雨量にのみ注目
  - ・降雨特性に年ごとの変化がない
- ・各年の最高記録が同一の連続分布に従う

$i$ 年目の最高記録が新記録になる確率は $\frac{1}{i}$ ,

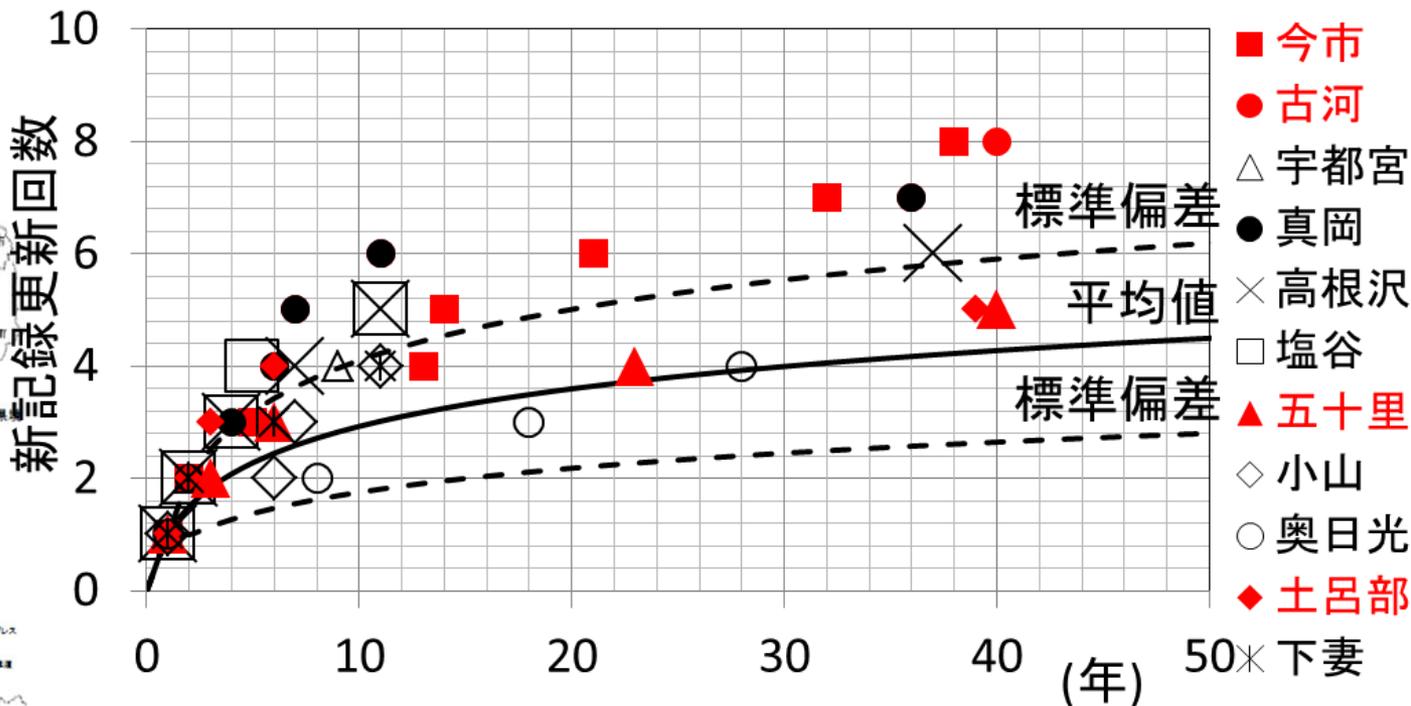
確率変数 $X_i$ を $X_i = 1$ :  $i$ 年目の記録が新記録,  $X_i = 0$ : 新記録とならないときと定義すると、これらは独立であり、平均値( $E(X_i)$ )と分散( $V(X_i)$ )はそれぞれ

$$E(X_i = 1) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{i}\right), \quad V(X_i) = \sum_{i=1}^n \left(i - \frac{1}{i^2}\right)$$



# 新記録の更新回数(24時間積算; mm/day)

AMeDASの1時間雨量データを使用



赤字は2015年9月9日の豪雨により新記録更新

観測所	五十里	土呂部	塩谷	今市	高根沢	宇都宮	真岡	小山	古河	下妻
観測開始月日	1977.11.10	1977.11.10	1978.12.21	1978.12.21	1974.11.1	1949.1.1	1976.3.26	1976.3.26	1976.3.12	1976.1.1

今市、古河、五十里地点は新記録理論の平均値よりも高い頻度で記録の更新をしやすい傾向

# 地点別日降水量と極値記録

地点別日降水量[mm/day]

	8日	9日 (既往最大降水量比)	10日
下妻	32	128(63%)	68
奥日光(日光)	35	390(75%)	49
土呂部	31	406(118%)	123
五十里	15	337(157%)	265
今市	34	367(144%)	233
高根沢	22	97(50%)	89
真岡	25	93(54%)	89
宇都宮	30	178(81%)	103

: 新たに極値記録1~10位を記録した日降水量

極値記録(日降水量[mm/day])

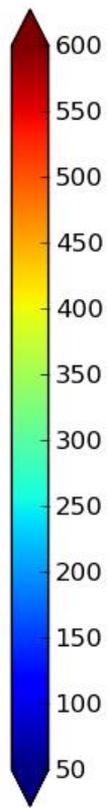
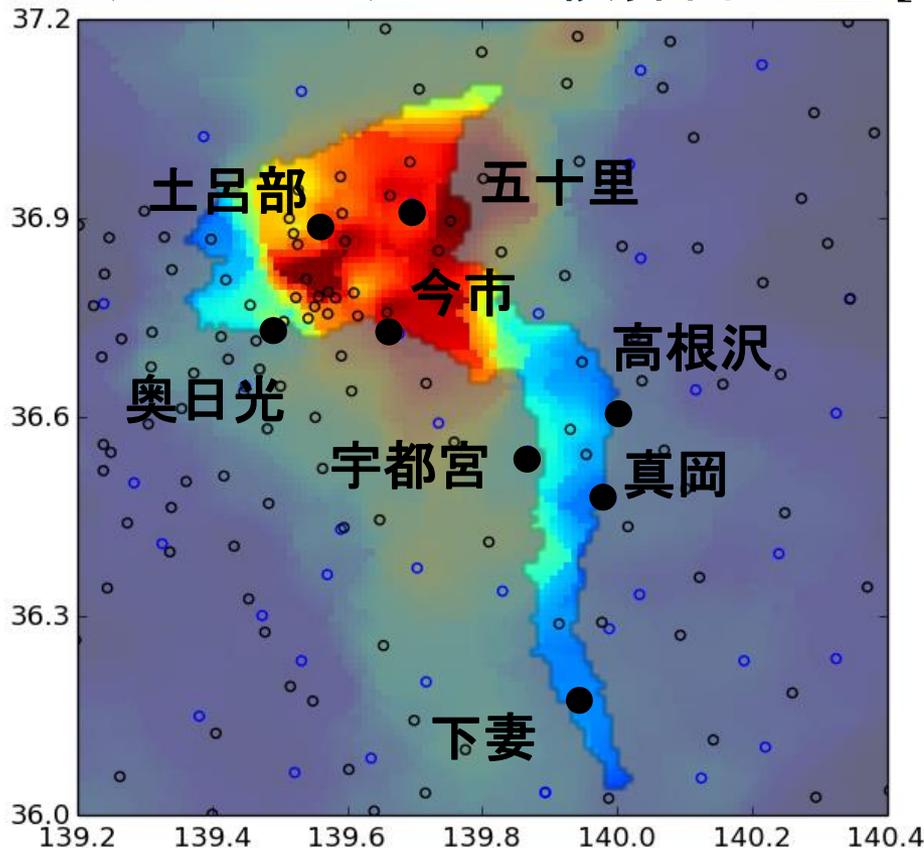
AMeDASより作成

	1位	2位	3位	4位	5位	6位	7位	8位	9位	10位
下妻	203	168	164	159	157	157	143	132.5	129	128
奥日光	519.2	519.1	475	454.5	438.2	397	390	364.5	361	358
土呂部	405.5	343	287	285	277	276.5	274	256	238	232.5
五十里	337	265	215	194	183	169	162	161	160	159
今市	366.5	254.5	243	233	230	218	206	199.5	198	195
高根沢	192.5	188	177	159	155	152	149.5	140	130	130
真岡	172.5	170.5	170	167	145	141	140	130	125	123
宇都宮	219.4	213.5	202.5	197.4	178.9	177.5	177.5	173	165.5	164



# 鬼怒川流域積算3日降水量分布 AMeDAS+水文水質DB

9月8日～9月10日積算降水量 [mm] 鬼怒川流域面積:約1775km<sup>2</sup>  
(実際は約1760km<sup>2</sup>)



閾値	面積[km <sup>2</sup> ] (割合)
50	1775(100%)
100	1775(100%)
200	1545(87.0%)
300	1053(59.3%)
400	925(52.1%)

- 流域平均では384.4mm。
- 石井上流域平均では440.8mm。

# 降水量の地点観測

## 💧 使用データ

### ❄️ 区内観測所(気象庁)

- 藤部ら(2008)によりデジタル化された日降水量
- 期間:1926~1977

### ❄️ AMeDAS(気象庁)

- 時間降水量を日降水量へ変換。4時間以下の欠損は許容範囲とした
- 期間:1976~現在

### ❄️ 水文水質データベース(国交省)

- AMeDASと同様
- 期間:1950~現在

### ❄️ 栃木及び隣接する4県のデータを使用

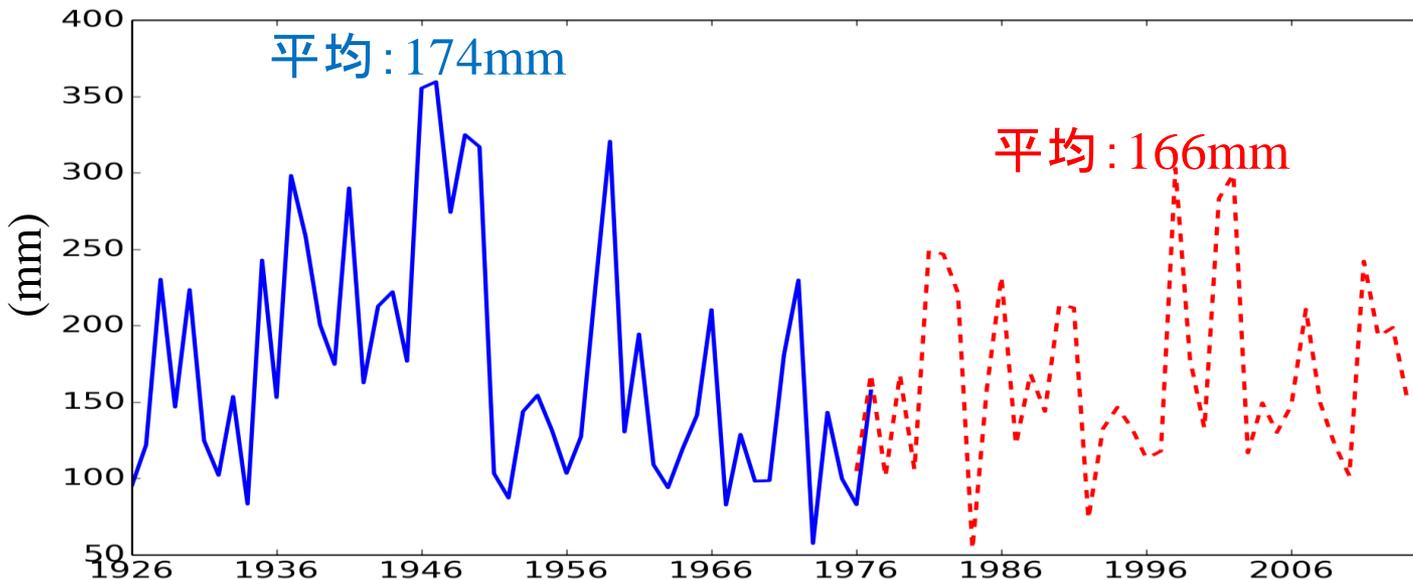
- 栃木、福島、群馬、埼玉、茨城

# 長期統計解析 –石井上流平均–

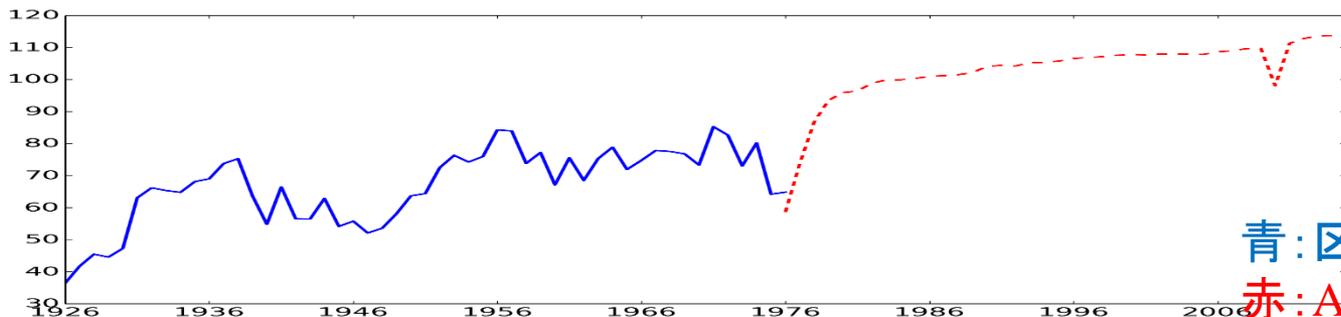
\* 逆距離加重法(最も近い3点)

441 今回の雨量

年最大3日積算降水量



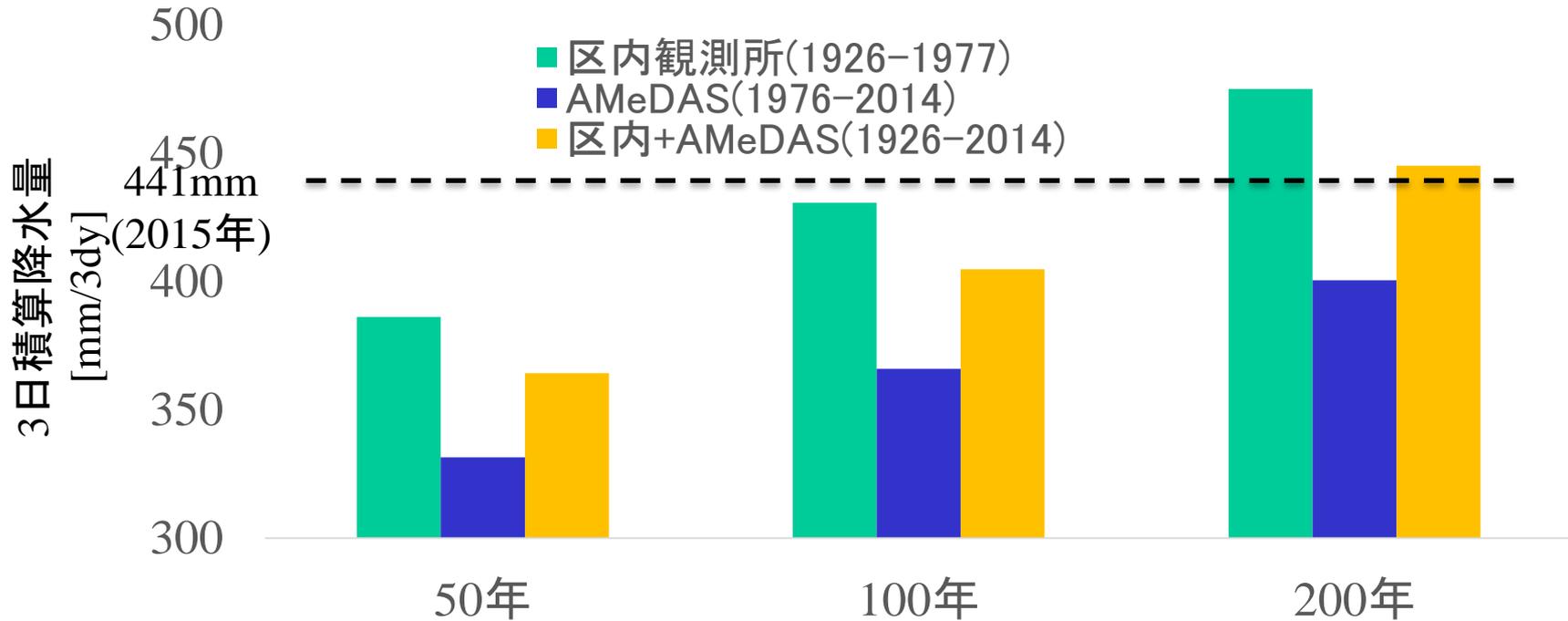
流域内観測地点数



青:区内観測所  
赤:AMeDAS

# 長期統計解析 –石井地点上流平均–

\* 逆距離加重法(最も近い3点)



今回の雨量441.5mmは、1926-2014年の雨量を基にすると188年に1度(1/188)のイベントであった。

# まとめ

- 鬼怒川上流域アメダス観測点では、9月9日の日降水量について、8地点中6地点で、観測が始まって以来歴代10位以内を記録した。うち3地点は歴代1位を記録した。
- 利根川水系河川整備基本方針で用いられている石井地点上流での3日間降水量について、今回の雨量(9月8日~10日)は441mm程度だった。鬼怒川全域では384mmであった。
- 1926年から2014年までの観測データを再整理し、今回の雨量の再起確率を推計したところ、石井上流では200年に一度程度、鬼怒川全体では400年に一度程度であった。いずれも1926年からの観測史上初めての雨量であった。

# まとめ

- 今市、古河、五十里地点は新記録理論の平均値よりも高い頻度で記録の更新をしやすい傾向であった。
- 台風17、18号による水蒸気が関東地方に断続的に供給されていた。線状降水帯発生当初はそれぞれの台風に起因して南南東、南東から暖湿気塊が関東南部に集中していた。
- オホーツク海付近では9月8日頃までブロッキングが持続し、それに付随して日本上空では気圧の谷が発生した。
- 線状降水帯の南北移動速度は約50-70 km/hrであった。9月9～10日にかけて、ほぼ同程度の速度で北上を繰り返していた。
- XRAIN(氏家と八斗島レーダ)を用いた解析では、線状降水帯に沿って南北方向に強い鉛直風速の領域が見られ、その間隔は約10～20kmであった。
- 線状降水帯に向かって東側から強い風の流入(対流圏下層)が見られた。流入した東風は東西-鉛直断面で時計回りに循環する様子が確認された。