

例会講演要旨集

第 151 号

目 次

詳細目次・・表紙裏

例 会

1. インド・アッサム州における 2014-2018 年の降水の特徴と日変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
2. 高知大学レーダーネットワークで補足された竜巻親雲の特性・・・・・・・・・・・・・・・・・・4
3. 雨滴粒度分布系 Parsivel を用いた人工降雨と自然降雨の特徴と比較・・・・・・・・・・・・・・・・8
4. 2005-2019 年の四国における線状降水帯の抽出とその特徴・・・・・・・・・・・・・・・・・・12
5. 2020 年 1 月 27 日に発生した大分県南部および高知県西部の短時間強雨・・・・・・・・・・16

特別講演

「気候変動と豪雨災害」・・20

中北 英一 氏（京都大学防災研究所 教授）

2019 年 12 月 18 日（金）

オンライン開催

日本気象学会関西支部

詳細目次

例 会

1. インド・アッサム州における 2014-2018 年の降水の特徴と日変化・・・1
*栗山 匡一朗 (高知大学大学院総合人間自然科学研究科)・村田 文絵 (高知大学理工学部)・
寺尾 徹 (香川大学)・山根 悠介 (常葉大学)・木口 雅司 (東京大学生産技術研究所)・
福島 あずさ (神戸学院大学)・田上 雅浩 (芝浦工業大学)・林 泰一 (京都大学東南アジア地域研究研究所)
2. 高知大学レーダーネットワークで補足された竜巻親雲の特性・・・4
*藤井 虎太郎・佐々 浩司 (高知大学理工学部)
3. 雨滴粒度分布計 Parsivel を用いた人工降雨と自然降雨の特徴と比較・・・8
*中 陽・村田 文絵 (高知大学理工学部)
4. 2005-2019 年の四国における線状降水帯の抽出とその特徴・・・12
*宮原 大輝 (高知大学大学院総合人間自然科学研究科)・村田 文絵 (高知大学理工学部)
5. 2020 年 1 月 27 日に発生した大分県南部および高知県西部の短時間強雨・・・16
*一 広志 (日本気象予報士会四国支部)

(*は講演者)

特別講演

- 「気候変動と豪雨災害」・・・20
中北 英一 氏 (京都大学防災研究所 教授)

インド・アッサム州における 2014-2018 年の降水の特徴と日変化

*栗山匡一朗、村田文絵(高知大学)、寺尾徹(香川大学)、山根悠介(常葉大学)、木口雅司(東京大学生産技術研究所)、福島あずさ(神戸学院大学)、田上雅浩(芝浦工業大学)、林泰一(京都大学東南アジア地域研究研究所)

1. はじめに

インド北東地方に位置するアッサム州(図1)では、チベット高原からヒマラヤ山脈を越えて流下してくるブラマプトラ川の広大な氾濫原で伝統的に稲作が営まれてきた。現在でも人口の大多数が稲作に従事しており、州経済も稲作をはじめとする農業にたよる割合が大きい(浅田,2011)。洪水や少雨など自然災害の影響も深刻であるため、降水特性を知ることは、重要である。

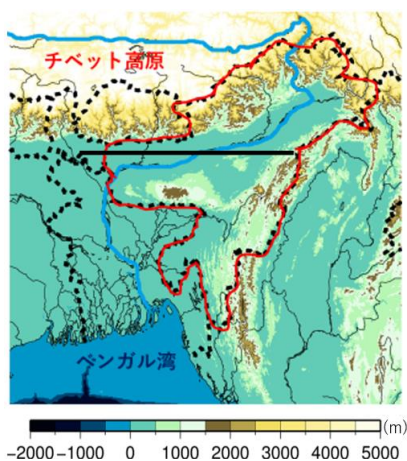


図1 アッサム州の位置と地形図を示す。図中の黒実線は図3-3,3-4で示す緯度26.5Nに沿った経度89-95Eを表す。

インド・アッサム州での降水の日変化に関する研究では、早くは Prasad(1973)によって行われており、雨量計データを解析し23-06LTにかけて降水が多いことを示した。Hirose and Nakamura(2005)は TRMM 降雨レーダーを用いて、3-8月間に02-04LTに降水が多いことを示した。このようにアッ

サム州付近では夜間にかけて降水が卓越していることが示されているが、なぜ夜間に降水が多くなっているのか明らかになっていない。

本研究では、インド・アッサム州内に15地点設置してある2014年から2018年の3月から9月までの転倒ます型雨量計データ、JAXAが作成したGPM主衛星と複数の衛星を用いて作成した降水データセットGSMaP、インド・アッサム州での降水特性、日変化を明らかにすることを目的とする。

2. 使用データと解析方法

2.1 使用データ

2014年から2018年の3月から9月の期間において、インド・アッサム州内に設置した15地点の転倒ます型雨量計データを用いた。また降水システムを解析するため、空間解像度が緯度経度0.1度格子、時間分解能1時間の降水データセットGSMaP Ver.7を用いた。

2.2 解析方法

アッサム州では雨期と乾期が明瞭であり、降水は premonsoon 期(3-5月)と monsoon 期(6-9月)に主に生じる。アッサム州は premonsoon 期の雨量も比較的大きい。また10-20日と30-60日の季節内変動のうちアッサム州では特に10-20日周期が顕著にみられる。降水活発期は下層の風系が南西風となっており、それ以外の総観場と違いが

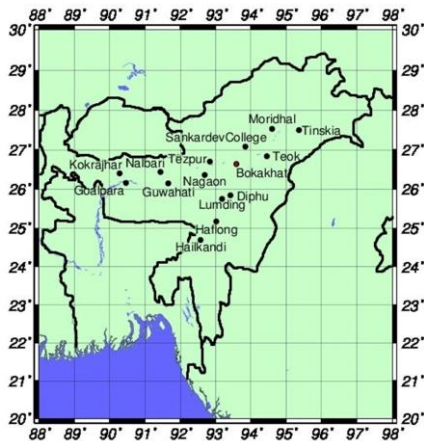


図2 転倒ます型雨量計が設置した観測点の位置。

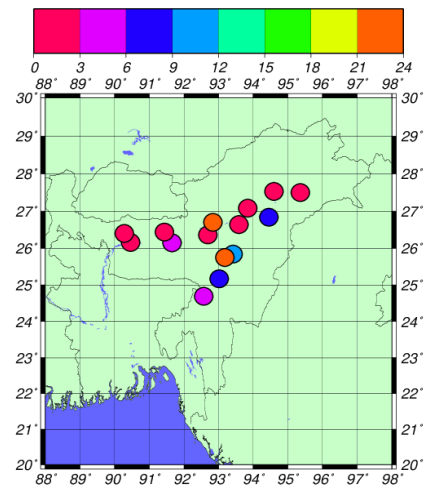


図3-1 地点ごとの premonsoon 期での最大3時間降水量が観測された時間帯の分布。

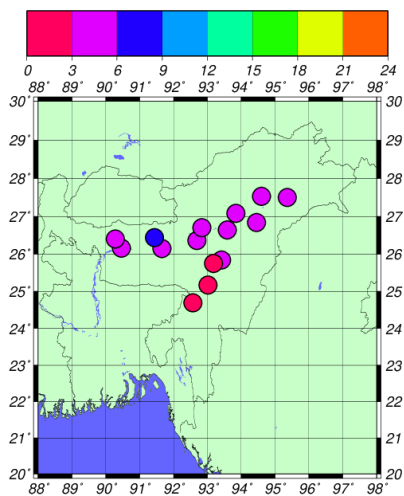


図3-2 地点ごとの monsoon 期での最大3時間降水量が観測された時間帯の分布。

見られる。本研究では31日移動平均を引いた15地点平均日降水量に対して3日以上連続でプラスとなった日を降水活発期と定義した。

3.結果

3.1 降水の日変化

図3-1、図3-2は、それぞれ premonsoon 期、monsoon 期で最大3時間降水量が観測された時間帯を示す。premonsoon 期は21-03LTまでに観測された地点が多い。一方、monsoon 期は03-06LTの地点が多い。premonsoon 期の方が3-6時間程、降水ピーク観測される時間帯が早くなっていた。

3.2 降水システムの移動

図3-3と図3-4は premonsoon 期と monsoon 期の GSMaP による降水強度の緯度26.5度に沿った時間経度断面を示す。premonsoon 期は、21LTにアッサムより西側のブラマプトラ谷の入り口付近で降水システムが発生し、西から東への移動する様子が見られた。monsoon 期は、夜間から早朝にかけて降水システムが発生し、東から西への移動が見られた。そこで premonsoon 期は18LTから00LTまで経度89度から92度の間で発生した西から東へ移動する降水システムを抽出、monsoon 期は18LTから09LTまで経度89-95度で発生、消滅し東から西へ移動する降水システムを抽出するとそれぞれ premonsoon 期で86事例、monsoon 期で156事例見られた。降水活発期との対応では premonsoon 期が86事例

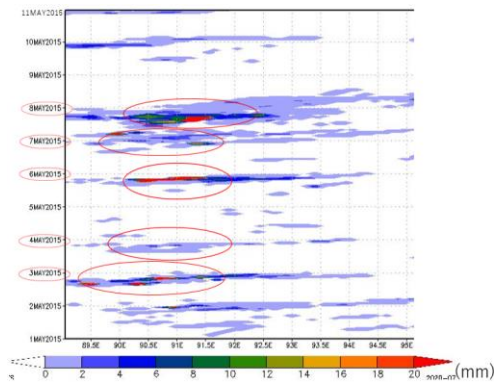


図 3-3 premonsoon 期での経度 89-95 度までの緯度 26.5 度に沿った GSMaP による降水強度の時間経度断面図の例。

期間は 2015 年 5 月 1 日から 5 月 10 日までを示す。

中 52 事例、monsoon 期が 156 事例中 105 事例で降水活発期であった。

4. 考察

インド・アッサム州では premonsoon 期 monsoon 期両方で夜雨が卓越している。premonsoon 期と monsoon 期で降水システムの発生時間、発生場所、移動方向が異なっていたため、夜雨をもたらすメカニズムは異なっていると考えられる。

5. まとめ

本研究では、インド・アッサム州において降水が夜間に卓越する原因を調べている。昨年は 2017 年の一年間のデータで得られた特徴を述べたが、本稿ではデータの解析期間を 2014-2018 年に拡大して調べた。

2017 年の結果と同様に premonsoon 期と monsoon 期を比較すると、アッサム premonsoon 期は monsoon 期より、3-6 時間程降水が早まっていた。GSMaP による降

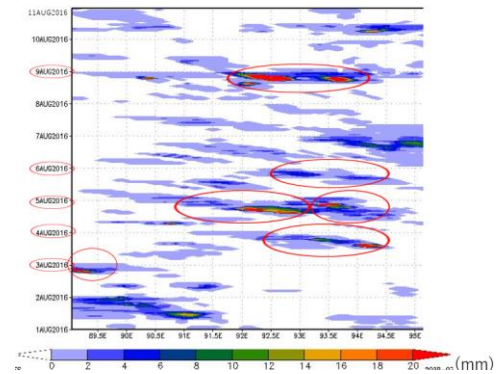


図 3-4 monsoon 期での経度 89-95 度までの緯度 26.5 度に沿った GSMaP による降水強度の時間経度断面図の例。

期間は 2016 年 8 月 1 日から 8 月 10 日までを示す。

水強度の時間経度断面図は、premonsoon 期と monsoon 期で夜雨をもたらす降水システムの発生場所、移動方向が異なっていた。降水活発期との関係では premonsoon 期が 86 事例中 52 事例、monsoon 期が 156 事例中 105 事例で降水活発期であった。降水活発期は総観場に違いがみられるが、夜雨はどちらの状況でもみられることが分かった。

6 参考文献

- ・Prasad,B,1974:Diurnal variation of rainfall in Brahmaputra valley, Indian J. Met. Geophys,25(2),245-250
- ・Hirose,M., and K. Nakamura,2005:Spatial and diurnal variation of precipitation systems over Asia observed by the TRMM Precipitation Radar, JGR ,110,D05106
- ・浅田晴久,2011: タイ系民族アホムの稲作体系-インド、アッサム州の村落における事例研究, 人文地理 63,42-59

高知大学レーダーネットワークで捕捉された竜巻親雲の特性

* 藤井虎太郎・佐々浩司(高知大学理工学部)

1. はじめに

過去に気象庁室戸レーダーで捕捉した竜巻親雲(杉村・佐々 2013)の解析においては、竜巻親雲の大半が土佐湾海上で発生し上陸することがわかっているため、レーダーデータを用いた機械学習により、親雲特定のパターンを準リアルタイムで捕捉することができれば、竜巻注意情報より高精度の情報を発信する可能性も期待できる。

2014年4月に小型Xバンド二重偏波レーダーの朝倉レーダーと物部レーダーが観測を開始して以来、2018年10月までに高知県内に6台のレーダーによるネットワークが完成して常時観測を継続している。この6年半で高知県内に発生した竜巻の親雲19事例(表1)が捕捉されてきた。各レーダーは比較的ビーム幅が広いので、広域の探査には向かないが、レーダーから30km程度の範囲内ならば、気象庁レーダーよりも高分解能であり、メソクロンのみならず竜巻漏斗雲の回転そのものに伴うフックエコーやWERなどを捉えることができる。

ここでは、今後の機械学習に向けた竜巻親雲の分類をめざして、これまでにレーダーネットワークで捕捉された事例により竜巻親雲の特性について統計的に明らかにした結果を報告する。

2. データ解析

朝倉レーダーを除く5レーダーは3度～16度の5仰角を1分毎に観測している。高知地方気象台により報告のあった表1に示す2014年7月～2020年1月までの19事例のうち、朝倉レーダーの探査範囲にあった事例は5事例あったが、いずれも地形遮蔽などで十分な解析がで

きないため、物部、安芸、須崎、土佐清水の4レーダーによって取得されたデータを用いて解析を行った。黒潮レーダーに捕捉された事例はまだない。また、レーダーでは親雲を明確に特定できていない2016年8月16日の1事例、2017年9月11日のうち2事例(佐々・西井 2017)と2020年1月8日の事例ははずした。

データは2016年当時高知地方気象台に在籍していた東克彦氏制作の変換プログラムを用いてgrib2形式に変換した後、気象研究所開発のDraftを用いて描画し、主として最低仰角3度のデータを用いて親雲の形態、規模、移動速度、渦の位置関係などを測定した。最低仰角の強エコー域があいまいな場合はより高仰角のデータも参照した。親雲の規模は反射強度が40dBz以上のおよその領域で判断したが、探査範囲がカバーしきれない場合は、気象庁室戸レ

表1 竜巻と認定されている対象事例

日付	親雲の性状	個数
2014年7月10日	スーパーセル	1
2016年8月16日	積乱雲	2
2016年10月5日	スーパーセル	1
2016年12月22日	積乱雲	1
2017年9月11日	積乱雲、積雲	4
2018年6月20日	積乱雲	1
2018年7月3日	積乱雲	1
2018年7月22日	積乱雲	1
2018年8月22日	積乱雲	1
2018年9月30日	波状雲	2
2019年6月27日	積乱雲	2
2019年9月22日	積乱雲	1
2020年1月8日	積乱雲	1

ーダーのデータも参考にして評価した。

3. 竜巻親雲のパターン

図1にスーパーセルの事例を示す。スーパーセルはいずれも台風に伴って発生していたが、2014年7月10日の事例(湯浅・佐々 2016)がアウターレインバンド上のものであったのに対し、図1に示した2016年10月5日の事例(湯浅・佐々 2017)は、温低化しつつある台風の暖域に形成された収束線上に発生したスーパーセルであった。物部レーダーはPRFが最大で2000Hzであるため、ドップラー速度にノイズが多く、竜巻に伴う渦は明瞭ではないが、メソサイクロンの存在は認められる。レーダーから見て北側の強エコー域は降雨減衰により実際の親雲より狭い領域が表示されている可能性があるが、長辺20km程度の規模をもつものであることがわかる。

図2は昨年の四国例会で報告した台風の接近に伴う事例(佐々・西井 2019)であるが、台風のアウターレインバンドのさらに外側に形成された、台風の動径方向に平行に配列した波状雲の一部が竜巻親雲となった事例を示す。細い帯状の形態と比較的低高度までしか発達していない対流雲であるが、強エコー域の南西端には明瞭な渦の存在が認められる。渦の規模は1km未満でメソサイクロンと呼ぶにはやや小さく、この波状雲の特徴や移動方向と渦の配置

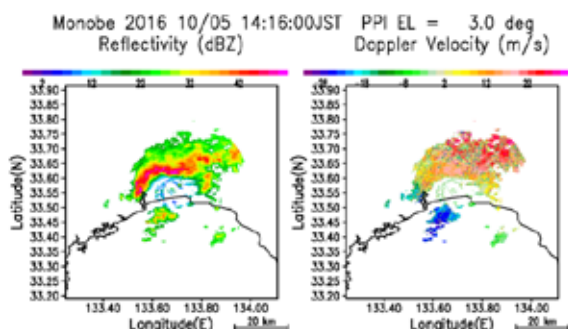


図1 物部レーダーで捉えた2016年10月5日の竜巻親雲の様子

などからもこの親雲はスーパーセルに分類されるものではないと考えている。

図3は土佐清水市で発生した竜巻親雲の事例を示す。この事例では地形遮蔽のため低仰角ではよく見えていない親雲の全体像を示すため仰角6度のデータを示している。移動方向は、上記2事例を含む須崎市から安芸市にかけての海岸線沿いの事例が北東方向であるのに対し、この事例は土佐湾から西北西に移動して上陸している。竜巻親雲は西方に進行する小規模な対流雲から構成される一群の降水システム内に埋め込まれた孤立積乱雲と考えられるが、親雲の東端には竜巻の存在を示すフックエコーが明瞭に認められた。

図4は高知空港から漏斗雲のみが観測され、被害は報告されていない事例を示す。いくつかの積乱雲から構成されるクラウドクラスターは全体としては長辺20km、短辺6kmほどであ

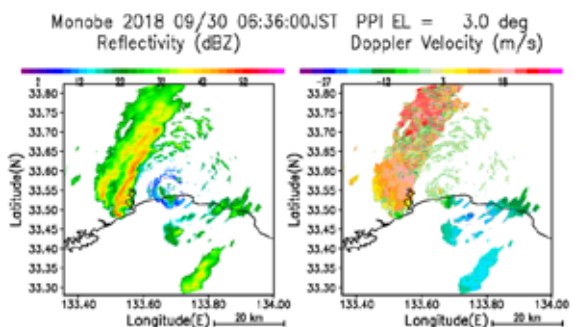


図2 物部レーダーで捉えた2018年9月30日の竜巻親雲の様子

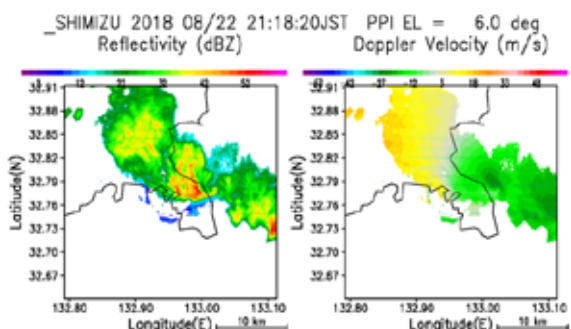


図3 土佐清水レーダーで捉えた2018年8月22日の竜巻親雲の様子

るが、西端に降水域と非降水域の境界が明瞭に認められる。ドップラー速度ではノイズが多くてやや渦の存在を示しづらいが、図中の矢印で示した3箇所のノッチが渦の存在に対応するものではないかと考えている。このうち、海上の2箇所は、当時写真撮影された漏斗雲（非公開）の位置とほぼ対応するものと思われる。

ここでは、特徴を代表する4事例のみを示した。観測された事例の大半はノンスーパーセル孤立積乱雲であったが、図3に示すように多くの事例ではメソサイクロンではなく、竜巻渦そのものによる WER やフックエコーが認められた。これらの特徴を機械学習により自動検知することができれば、竜巻接近を確実に示す情報を提供できるものと期待している。

4. 竜巻親雲の特性

表1に示したように一部積雲と思われるものも含まれるが、ここでは竜巻親雲を通常の積乱雲とスーパーセル、波状雲の3種類に分類した。親雲の水平規模として長辺と短辺の大きさを求めた結果を図5に示す。通常の積乱雲の中にはアスペクト比が3を超える細長いものもあるが、大半は水平規模が10km未満の長辺と短辺に差がないものであった。これに対し、スーパーセルタイプは圧倒的に規模がおおきいことがわかる。幅が狭いスーパーセルは図1に示した事例で、降雨減衰によって見かけ上幅が小

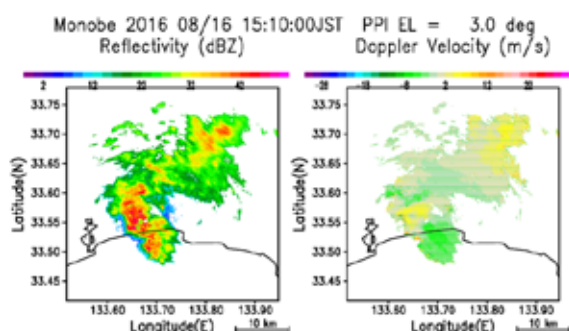


図4 物部レーダーで捉えた2016年8月16日の漏斗雲親雲の様子

さくなっているが、弱エコー域まで評価すると10km程度はあると思われる。波状雲はスーパーセルに匹敵する長辺をもつものもあったが、幅はいずれも通常の積乱雲と同等であった。

図6は親雲の長辺の長さに対して移動速度をプロットしたものである。移動方向は図3に示した土佐清水市の事例が西方向、図4に示した事例が東方向である他は、いずれも北北西方向から北、または北東方向であった。台風に伴う事例は南東風に関連して北北東が多く、低気

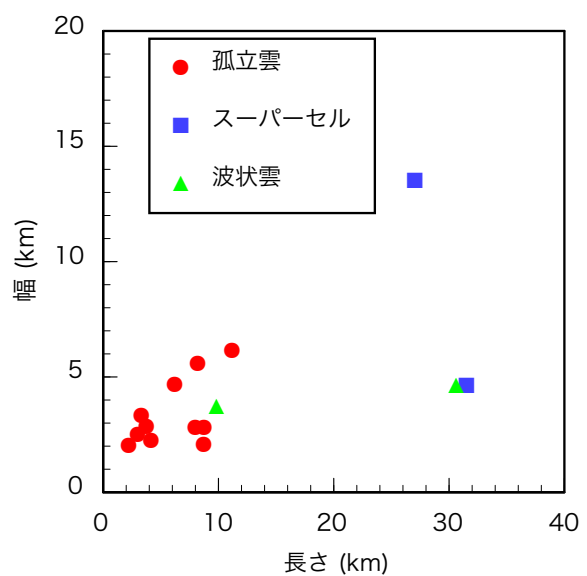


図5 竜巻親雲の長さとお幅

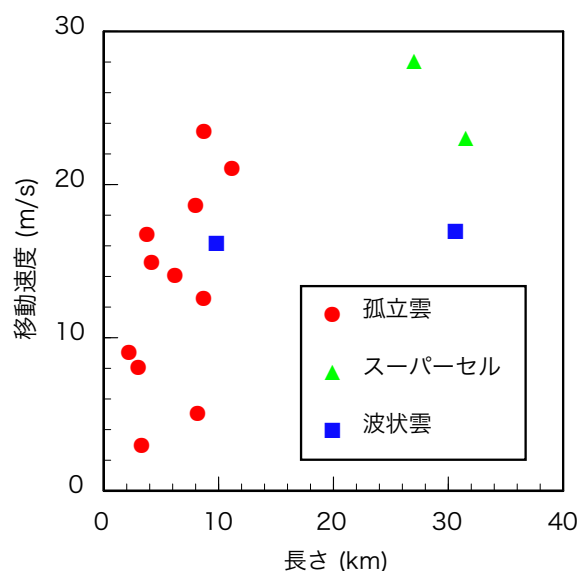


図6 竜巻親雲の長さとお移動速度の関係

圧に伴う事例は北東方向が多かった。移動速度が 10m/s に満たない事例は海上竜巻か上陸しても被害の痕跡を残さない弱いものであった。一方、スーパーセルはそもそも鉛直シアーの大きい環境下で形成されるため、移動速度が大きい。通常の積乱雲でもスーパーセルに匹敵する移動速度を持つものもあるが、これらが竜巻の強さとどの程度関係しているかは今後詳細に調べる予定である。波状雲も台風外縁の旋回流によって移動しているため、比較的大きい移動速度を持っている。全体的にみると、わずかながら水平規模と移動速度の間には正の相関があるように見える。

図7は、竜巻親雲の移動方向を上向きとした時に、親雲の重心位置から見てどの位置に渦が存在するかを示したものである。2014年7月10日の事例は親雲一つに竜巻が存在しているため、プロットが一点増えている。ほぼ停滞している海上竜巻の場合は親雲の中心近くに渦が存在するが、ほとんどが進行方向に向かって背後に渦が位置していることがわかる。このことは、観天望気が直前の避難に有効であることを示している。すなわち、空が暗くなるなどの積乱雲接近の兆候により避難行動を取れば、竜巻に遭遇する時間を確保できることになる。

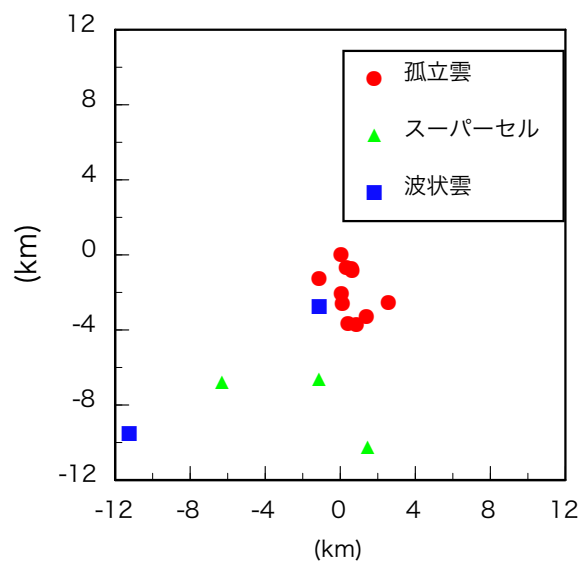


図7 竜巻親雲の中心から渦の位置関係

5. まとめ

今回統計処理をした数は15個と多くはないが、親雲の性状により規模や移動速度に大きな特徴があることがわかった。また、竜巻は親雲の後方に存在することが明らかになった。これらの特性は今後のパターン分類の基準となるパラメータの一部として機械学習のデータとして用いることにより、レーダーデータにより竜巻強度も含む情報を十分なリードタイムを持って提供できるものと期待している。

謝辞

レーダーネットワークは総務省受託研究SCOPE(受付番号165009001)の委託により整備された。また、本研究はJSPS 科研費18H01682の支援を受けた。ここに謝意を表す。

引用文献

1. 杉村昌俊, 佐々浩司, 2013, 土佐湾で観測された渦の統計的解析, 日本気象学会関西支部四国例会講演要旨集132号, 12-15.
2. 湯浅惣一郎, 佐々浩司, 2016, 台風201408号のアウトターレインバンド内で発生した竜巻, 第24回風工学シンポジウム論文集, 109-114.
3. 湯浅惣一郎, 佐々浩司, 2017, 台風201616号に伴う高知の多重渦竜巻, 京都大学防災研究所研究集会講演論文集28K-05「複合要因により強化する台風災害の実態解明と減災に向けて」, 78-81.
4. 佐々浩司, 西井章, 2019, 平成24年台風24号に伴い発生した竜巻親雲の構造, 日本気象学会関西支部四国例会講演要旨集148号, 6-9.
5. 佐々浩司, 西井章, 2017, 2017年9月11日に高知県沿岸部で発生した複数の竜巻, 日本気象学会関西支部四国例会講演要旨集142号, 9-12.

雨滴粒度分布計 Parsivel を用いた人工降雨と自然降雨の特徴と比較

*中 陽・村田 文絵 (高知大学理工学部)

1. はじめに

雨滴粒度分布は、リモートセンシングで雨を測る際に不可欠な情報である。しかし、いまだ雨滴の大きさと気候との関係や降水雲の特徴との関係は分かっていない。また、雨滴粒度分布を知ることは、豪雨の形成過程を知る手がかりを与える。

一方高知大学では、人工降雨装置を使って大雨による斜面崩壊の実験が行われている。実験では降水強度に注目しがちだが、雨滴粒度分布も自然のものに近くなければ現実的な結果は得られない。

本稿では、雨滴粒度分布計を用いた自然降雨の解析結果と人工降雨実験で得られた解析結果と比較し、それぞれの特徴を明らかにすることを目的とする。

2. 使用データ

雨滴粒度分布を得るためにOTT社の光学式雨滴粒度分布計 Parsivel を使用した。それぞれ 32 クラスの粒径と落下速度のマトリックスにおける雨滴数の分布を観測する。観測地点は、高知県牧野植物園 (北緯 33 度 32 分 47.7 秒、東経 133 度 34 分 40.4 秒) で、連続的に観測した 2018 年 7 月から 2019 年 6 月までの一年間のデータを用いた。時間分解能は 1 分である。

人工降雨は、高知大学笹原研究室が所有する人工降雨装置に Parsivel を設置し実験を行った (図 1)。雨を降らせるノズルが 2 つあり、ノズル間の水平距離は約 1m であった。2 つのノズルの中央真下約 1m 下の位置に Parsivel の観測領域を設置した。ノズルの水量は水圧計で制御される。水圧は 0.01~0.02MPa、0.05MPa、0.1MPa、0.2MPa、0.3MPa の 5 段階で変更し実験した。

また降雨頂高度との関係を調べるため、気象庁全国合成レーダーデータの最寄りのグリッド値 (北緯 33 度 33 分、東経 133 度 34 分 48 秒) の降雨頂高度を用いた。ここで、Parsivel は 1 分ごとの時間分解能に対し、全国合成レーダーは 10 分ごとの分解能



図 1 実験の様子。雨を降らせるノズルは 2 個あり (図中の赤丸)、中央の装置が Parsivel である。

であるため、比較の際 Parsivel のデータを 10 分ごとの平均値に直し使用した。

雨滴粒度分布の導出は、松井 (2014) より以下の式で求めた。まず粒径クラスごとの雨滴数密度を求める (式①)。ここで n_{ij} は速度クラス j と粒径クラス i の雨滴数、 A (mm^2) は観測面積、 Δt (s) は時間、 D_i (mm) は粒径クラス i に対応する直径、 ΔD_i (mm) は粒径クラス i に対応する直径クラス間隔、 V_j (m/s) は速度クラス j に対応する落下速度である。この時、 $N(D_i)$ ($\text{mm}^{-1}\text{m}^{-3}$) は粒径クラスごとの雨滴数濃度を示す。

$$N(D_i) = \sum_{j=1}^{32} \frac{n_{ij}}{A \cdot \Delta t \cdot V_j \cdot \Delta D_i} \quad \dots \text{①}$$

本稿では雨滴粒度分布のパラメータとして中心粒径 D_m と一般化切片パラメータ N_w を用いた。 D_m (mm) は、粒径分布の高次モー

メントの定義式 (式②) の3次と4次のモーメントより求められる (式③)。

$$m_n \equiv \int_0^{\infty} D^n N(D) dD \quad \dots \text{②}$$

$$D_m = \frac{m_4}{m_3} \quad \dots \text{③}$$

一方 N_w ($\text{mm}^{-1}\text{m}^{-3}$) は次の式で求められる。

$$N_w = \frac{4^4}{\pi \rho_w} \left(\frac{W}{D_m^4} \right) \quad \dots \text{④}$$

ここで ρ_w は水の密度 (g/m^3)、 W は雲水量 (g/m^3) であり、式⑤で求められる。

$$W = \frac{\pi \rho_w}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_i) D_i^3 \Delta D_i \quad \dots \text{⑤}$$

3. 結果

3.1. 人工降雨

図2 (a) (b) は0.05MPaと0.2MPaにおける雨粒の直径と落下速度をそれぞれ11分間と10分間のデータを用いて1分あたりの平均分布を示す。図中の実線は下記の式⑥で表される雨粒と落下速度の経験式 (Atlas

et al. 1973) である。

$$w(D) = 9.65 - 10.3 \exp(-0.6D) \quad \dots \text{⑥}$$

ここで式⑥の $w(D)$ は落下速度 (m/s)、 D は雨粒の直径 (mm) である。どの水圧でも式⑥の速度に達しないものが多く存在する。また、水圧を強くしていくと、分布が直径の幅が狭く、速度の幅が広くなるように遷移する。加えて直径2mmを超える雨粒はほとんど見られない。

3.2. 自然降雨

図2 (c) (d) は夏と冬に観測された各3か月の雨粒の直径と落下速度を降雨時の1分あたりの平均分布を示す。自然降雨は人工降雨に比べて幅広い粒径の雨粒が観測される。また雨粒の落下速度は粒径が大きいほど、式⑥の経験式より低い傾向があるものの、全体として式⑥に近い分布を示す。夏

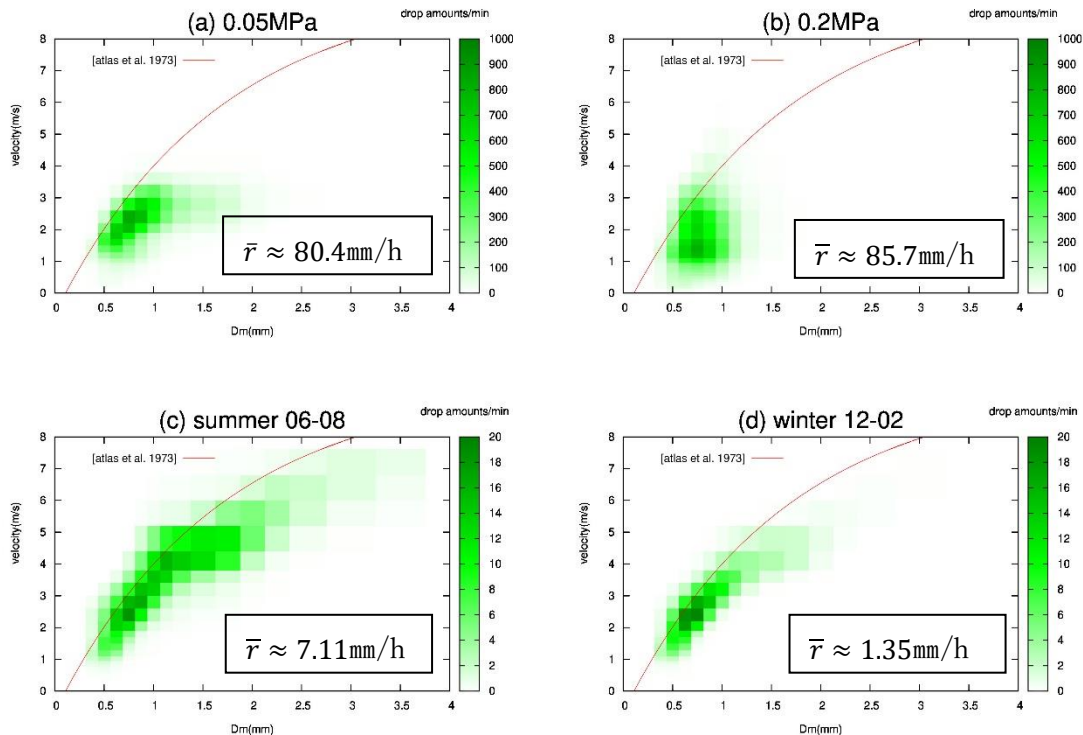


図2 横軸を雨粒の直径、縦軸を雨粒の落下速度とした1分間平均値のマトリックス。(a) は水圧0.05MPaの実験結果、(b) は水圧0.2MPaの実験結果、(c) は2018年7月8日、2019年6月の夏季、(d) は2018年12月、2019年1月2月の冬季を示す。 \bar{r} は各期間の平均降水量である。赤の実線は式⑥で求まる落下速度を示し、陰影は粒の多さを表す。

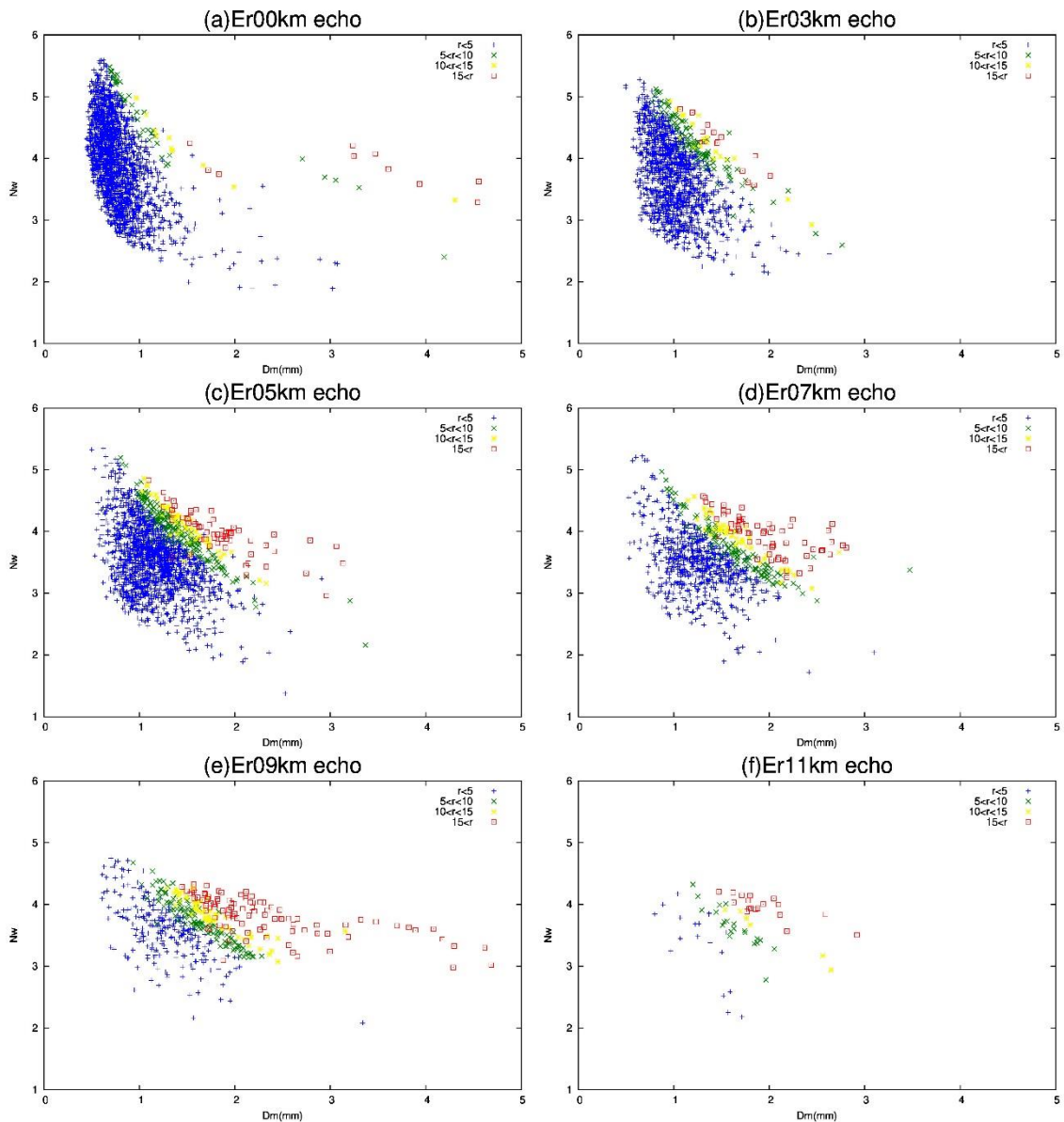


図3 降雨頂高度ごとに分けた D_m - N_w 図。横軸 D_m (mm) は粒径分布の中心値 (式③)、縦軸 N_w ($\text{mm}^{-1} \text{m}^{-3}$) は雨滴数 (式④) の対数を表す。左上から降雨頂高度 (a) 0 km、(b) 3 km、(c) 5 km、(d) 7 km、(e) 9 km、(f) 11 km の場合を示す。色は降水強度 r を示しており、青、緑、黄、赤の順に、 $r < 5 \text{ mm/h}$ 、 $5 \text{ mm/h} < r < 10 \text{ mm/h}$ 、 $10 \text{ mm/h} < r < 15 \text{ mm/h}$ 、 $15 \text{ mm/h} < r$ の場合をそれぞれ示す。

と冬を比較すると、冬は $0.5 \text{ mm} \sim 1.0 \text{ mm}$ に集中しているが、夏は $0.5 \text{ mm} \sim 2.0 \text{ mm}$ まで比較的幅広い範囲で数多く観測されている。更に、この集中している範囲では式⑥で求まる落下速度に近い。

次に、全国合成レーダーから得た降雨頂高度ごとに分類し、各降雨頂高度で10分間平均した D_m - N_w 空間の散布図を図3に示す。

降雨頂高度 0 km では、ほとんどが 5 mm/h より小さい降水強度で、 D_m は 1 mm 未満がほとんどを占める。降雨頂高度が高くなると D_m が大きいものの割合やより強い降水強度が増える。また、降水強度は左下から右上に向かって強くなる。

4. 考察

4.1. 人工降雨と自然降雨の比較

測定された人工降雨の落下速度は自然降雨に比べて小さかった(図2)。防災科学技術研究所(防災科研)の降雨実験装置の結果では、人工降雨の落下速度は式⑥の関係に近かった(真木ら2005)。防災科研のノズルは地上から16mの高さにある。本研究の結果は、高さ不足によって雨粒が終端速度に達することなく観測領域に落ちてきたためと考えられる。

測定された雨粒の分布は、低圧時は雨粒の大きさがばらつくのに対し、高圧時は雨粒の落下速度にばらつきがみられた。高圧時はノズルからの噴出角度が大きくなるため、降水領域が広い一方、鉛直方向の初速が小さい雨粒が多くなる。低圧時は噴出角度が狭く、鉛直方向の速度が比較的均一になる。また降水領域が狭く、雨粒の併合が起こりやすいため、大きい雨粒の数が多くなる。

また実験を通して雨粒の大きさが1mm以下の範囲で考えると、水圧が0.01~0.02MPaや0.05MPaの場合の分布が自然降雨の分布の形と似ていた。つまりこの装置で雨を再現したいのであれば、比較的弱い圧力で運用すると雨滴粒度分布は自然降雨に近いものが得られる。

4.2. 自然降雨の特徴

夏はほかの季節と比較して大きな雨粒が多く観測された。また降雨頂高度が5kmより下では、降水強度が5mm/hより小さく雨粒の直径が1mm付近のものも多く存在している。一方、降雨頂高度が7kmや9kmの場合では、降水強度が5mm/hより小さいものの観測回数が減り、雨粒の直径が大き(1.3mm~1.5mm付近)になっている。これらは季節や降水雲によって雨の形成過程が異なることを示している。

一方で降雨頂高度が高いときに降水強度5mm/h未満の降水がみられたり、降雨頂高度が低いときに15mm/hを超える降水が見られたりした。これは降雨頂高度が降水強度と必ずしも対応しないことを示している。

5. まとめ

本稿では高知大学の人工降雨装置で再現される人工降雨の特徴を自然降雨と比較し

て調べた。また自然降雨の季節変化と降雨頂高度との関係を調べた。

人工降雨では雨粒の落下速度が終端速度に届かないものが多く観測された。また、直径が大きい粒は水圧が増すごとに少なくなり、同時に速度分布の幅は大きくなる。加えて2mm以上の粒はあまり観測されなかった。これらは実験装置の物理的な制約を示しているものと考えられる。一方で水圧が0.01~0.02Mpa、0.05Mpa時で雨粒の大きさ1mm以下の範囲での分布が自然降雨の分布と似ていることが分かった。自然降雨を再現するなら、比較的低下で降水を起こす方が再現性は高くなると言える。

自然降雨では季節ごとに雨滴粒度分布の傾向が変わり、特に夏は比較的直径の大きい雨粒の観測数が多くなった。また降雨頂高度ごとに分けた雨滴粒度分布からは、降雨頂高度5kmより下の降雨頂高度を持つ降水は D_m が1mm程度で、降水強度は5mm/hより小さいものが多く存在する。一方、降雨頂高度7kmや9kmの降水は、 D_m はやや大きくなり、降水強度が強いものが増加した。

謝辞

気象庁全国合成レーダーは京都大学生存圏データベースより取得しました。Parsivelの設置は高知県牧野植物園に、実験は高知大学の笹原克夫教授をはじめとする笹原研究室の方々にご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- ATLAS, D., R. C. SRIVASTAVA AND R. S. SEKHON, 1973. DOPPLER RADAR CHARACTERISTICS OF PRECIPITATION AT VERTICAL INCIDENCE, REV. GEOPHYS. 11, 1-35.
- 真木雅之, 森脇寛, 佐藤照子, BRINGI V. N., SCHÖNHUBER MICHAEL, 播磨屋敏生, 2005; 防災科学技術研究所大型降雨実験施設の雨滴粒径分布, 北海道大学地球物理学研究報告, 68, 31-50
- 松井希奈, 2014; 五台山と繁藤の雨滴粒度分布の比較, 高知大学卒業論文
- 深尾昌一郎, 浜津亨助, 2005; 気象と大気のレーダーリモートセンシング 京都大学学術出版会 P. 143-148

2005-2019 年の四国における線状降水帯の抽出とその特徴

*宮原大輝・村田文絵(高知大学)

1. はじめに

日本で多くの災害を引き起こす集中豪雨の多くは組織化された積乱雲によるものあり、特に激しい降水域が線状に伸びて長時間停滞する線状降水帯は近年関心が高い。過去に多くの事例解析や全国的な統計解析によって集中豪雨の研究が行われてきた。例として、全国的な集中豪雨の統計解析(津口・加藤 2014)や、線状降水帯の過去の発生事例からの発生条件の決定(Kato2020)などが挙げられる。ここでは四国の線状降水帯に焦点を当て、客観的な抽出を行い、その特性を解析した。

2. 使用データと解析対象

解析には気象庁 1km メッシュ全国合成レーダー(以下レーダーデータ)、気象庁メソ数値予報モデル初期値(以下気象庁MSM)、気象庁地上天気図を使用した。レーダーデータは主に線状降水帯の抽出に、MSM は環境場の解析、地上天気図は総観場の分類に使用した。解析対象領域は四国領域(132.0E~135.0E、32.6N~34.6N)の陸地で、解析期間は 2005 年から 2019 年の 15 年間とする。

3. 線状降水帯の客観的抽出

線状降水帯は次の手順で抽出する。はじめに、四国領域を 144 に分割した格子内で降水強度 30mm/h 以上の強雨が解析されたグリッドが 20 点以上存在する状態が 2 時間以上継続するものを停滞する強雨域として抽出した。そのうち平均降水強度が 20mm/h 以上の領域が線形(縦横比 3:1 以上)であり、四国の陸地にかかるものを線状降水帯と定義した。なお、時間的・空間的に連続してい

るものは同一事例として主観的に排除した。以上の手法で抽出した線状降水帯の例を図 1 に示す。

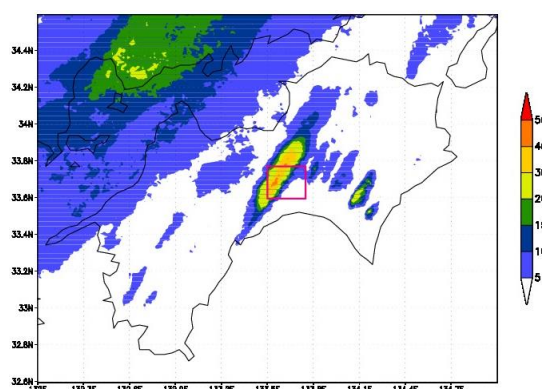


図 1a 抽出した線状降水帯の例①
2018/7/6 14:00~7/7 15:00 (JST)

4. 結果

4.1 線状降水帯の抽出数

上記の手法で線状降水帯の抽出を行った結果、151 事例が抽出された。年別(図 2a)で見ると、最多は 2018 年の 18 事例、最少は 2017 年の 3 事例であった。月別(図 2b)で見ると、9 月が 34 事例で最多であり、5~10 月が全体の 90%以上を占める。

4.2 線状降水帯の特性

抽出した線状降水帯の特性を簡単に示す。

①強雨域の走向(16 方位)

南西-北東が 71 事例で最多であり、全体の約半数を占めた。次いで南-北、南南西-北北東の 19 事例、西南西-東北東の 16 事例と続いた。

②発生頻度分布

抽出した線状降水帯の発生分布を解析した(図3)。太平洋側、特に中部から東部に集中している。南西—北東方向の事例は太平洋側中部に特に多い、南—北方向の事例は東部山地に多いなど、現れやすい強雨域の走向には地域性がある(図略)。

③時刻別発生事例数

本研究で抽出した線状降水帯の発生時刻を3時間ごとに判断し、総数をまとめた(図4)。解析の結果、明け方から昼前に多く、昼過ぎから深夜に少ない傾向であった。

④総観規模擾乱

線状降水帯発生時の総観場を吉崎・加藤(2007)の手法で、擾乱と強雨域の距離に着目し、地上天気図から分類した。分類した結果、遠隔の台風・熱帯低気圧、停滞前線によるものが半数以上を占めた。

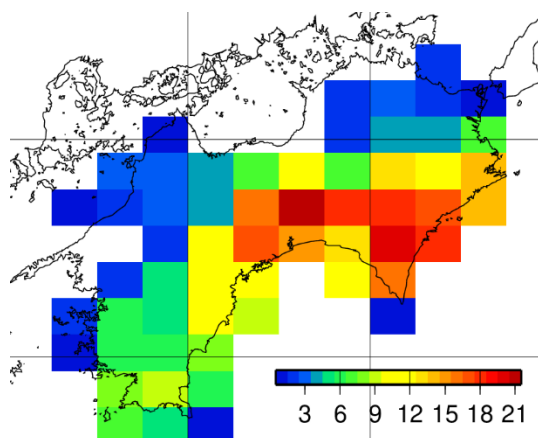


図3 線状降水帯の発生数の分布

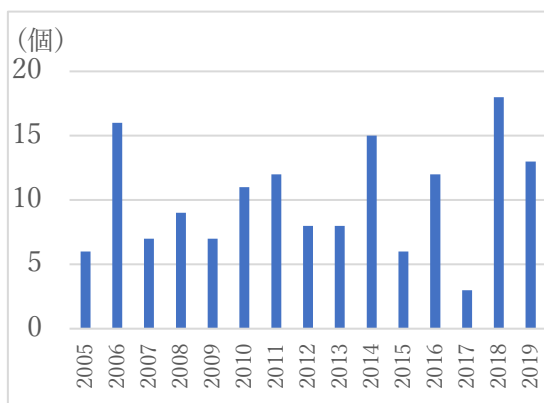


図2a 線状降水帯抽出数(年別)

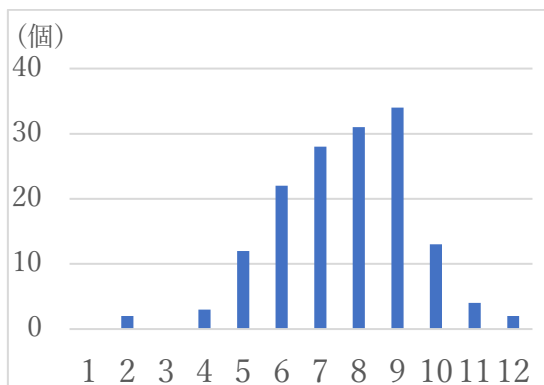


図2b 線状降水帯抽出数(月別)

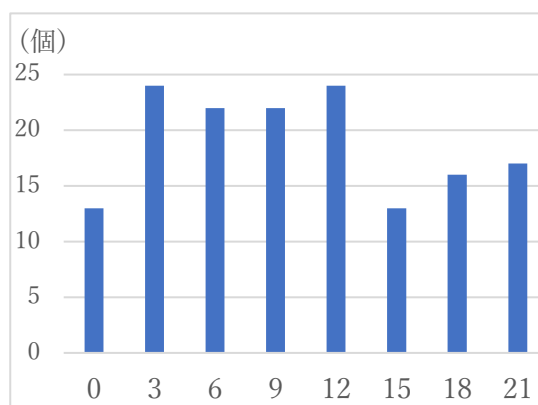


図4 (線状降水帯の時刻別発生数)
横軸は JST

4.3 環境場の解析

4.3.1 風向・風速

500hPa、850hPa、925hPaの風向・風速を線状降水帯の発生の有無別に比較して解析した。風速は850hPa、925hPaの下層で線状降水帯の発生時に大きく(図5)、風向は線状降水帯の発生時は南寄りの割合が大きくなる傾向がある(図略)。

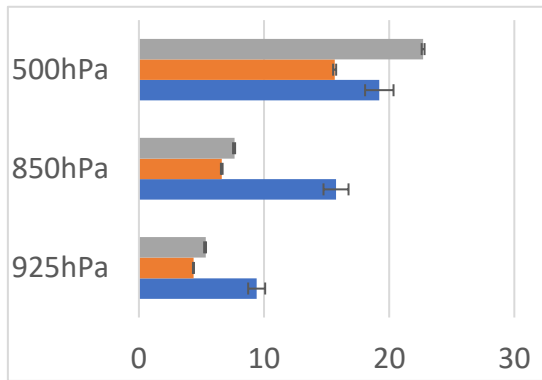


図 5 各高度での風速(m/s) 色分けしたグラフは上から順に解析全期間、暖候期(4~10月)、線状降水帯発生時の平均。エラーバーは母平均95%信頼区間を示す。

4.3.2 Kato(2020)の線状降水帯発生条件との比較

本研究で抽出した事例のうち、強雨域が3時間以上停滞した主要な線状降水帯22事例を対象に環境場の指標の解析を行った。その後、全国の線状降水帯の環境場を調査し、発生条件をまとめたKato(2020)と比較した(図6a~e)。

①相対湿度(=RH)

500hPa、700hPaの相対湿度の値を解析した結果、それぞれ平均81.74%、88.47%と非常に湿っており、22事例中500hPaでは13事例、700hPaでは19事例でKato(2020)の条件(500hPa、700hPaでのRHが80%以上)を満たした。

②500m高度と自由対流高度(LFC)の距離(=DLFC)

対流の発生しやすさをDLFCより解析した結果、平均449mであった。22事例中18事例でKato(2020)の条件($DLFC \leq 500m$)を満たしており、対流の発生しやすい環境場であった。

③水蒸気フラックス(=FLWV)

水蒸気の流入量をFLWVより解析した結果、平均 $252g/m^2 \cdot s$ であった。22事例中14事例でKato(2020)の条件($FLWV \geq 200g/m^2 \cdot s$)を満たした。

④SREH

大気鉛直シアをSREHに着目して解析した結果、平均 $276.18m^2/s^2$ であった。22事例中17事例でKato(2020)の条件($SREH \geq 150m^2/s^2$)を満たした。

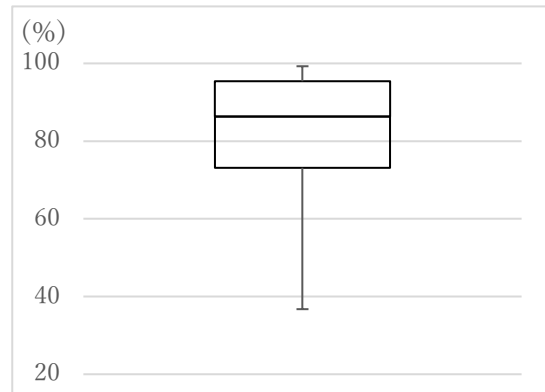


図 6a 500hPaでの相対湿度の箱ひげ図

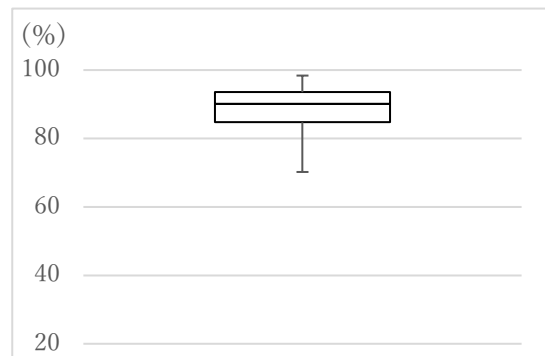


図 6b 700hPaでの相対湿度の箱ひげ図

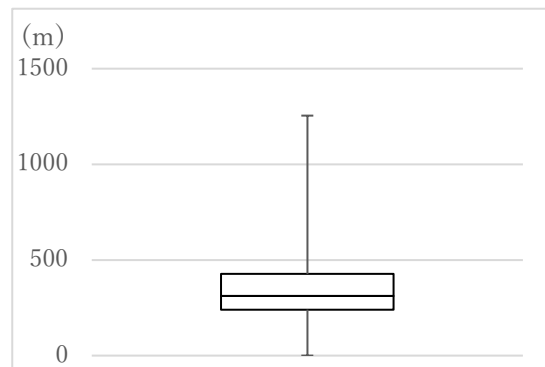


図 6c 500m高度とLFCの距離(=DLFC)の箱ひげ図

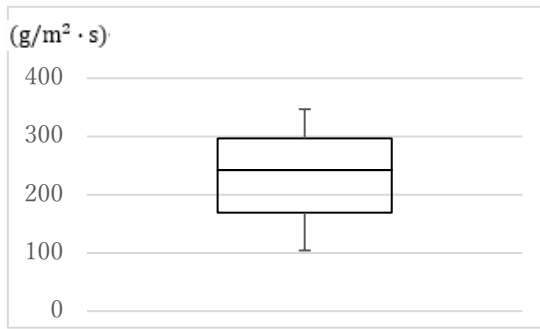


図 6d 水蒸気フラックス(=FLWV)の箱ひげ図



図 6e SREH の箱ひげ図

4.3.3 大気安定度

大気の安定度を CAPE より解析した結果、平均 $286 J/kg$ となった。

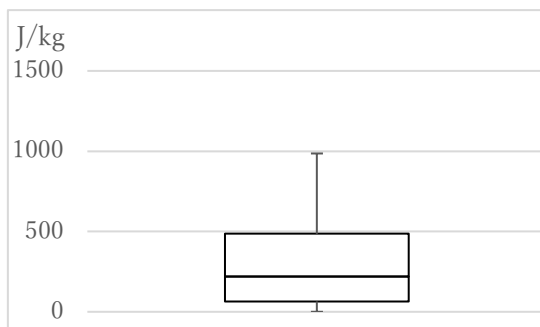


図 7 CAPE の箱ひげ図

5. まとめ

本研究では気象庁全国合成レーダーデータを用いて線状降水帯の客観的抽出を行っ

たのち、気象庁 MSM を用いてその特性解析を行った。本研究では 15 年間で線状降水帯を 151 事例抽出し、以下の特徴が分かった。

- ①5～9 月に 90%以上が発生した
- ②降水帯の走向は南西—北東が半数を占めた。
- ③太平洋側、特に中部～西部に集中していた。
- ④明け方～昼前に高頻度で発生した。
- ⑤総観場は、遠隔の台風・熱帯低気圧と停滞前線によるものが半数以上を占める。
- ⑥下層で南風が強い。
- ⑦RH、DLFC、FLWV、SREH、の全指標で加藤 (2020) の線状降水帯発生条件を満たした。

今後は以下の課題に取り組み、四国の集中豪雨特性をより明らかにしていく。

- ①解析する環境場の指標の追加
- ②豪雨発生時と発生前の環境場の比較
- ③豪雨発生時と非発生時の環境場の比較
- ④豪雨特性の四国内での地域性の調査

謝辞

気象庁 1km メッシュ全国合成レーダー、および気象庁数値予報モデル GPV は京大大学生存圏データベースより取得致しました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 鵜沼・村田文絵 (2012) ; 四国における停滞性の線状降水帯の統計的抽出, 天気 59 (2), 119-125
- 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, 天気第 61 (6) 456-
- 図解説中小規模気象学 (2017) 気象庁
- Kato, T. 2020: Quasi-stationary band-shaped precipitation systems, named “senjo-kousuitai”, causing localized heavy rainfall in japan. J. Meteor. Soc. Japan, 98 (3), 485-509

2020年1月27日に発生した大分県南部および高知県西部の短時間強雨

一 広志 (日本気象予報士会四国支部)

1. はじめに

筆者が居住する四国地方において、各地方気象台で記録された観測史上1位から10位までの日最大1時間降水量の発現時期は夏季と秋季に集中している。この時期に発生する短時間強雨の多くは、梅雨前線、秋雨前線、台風などによる活発な水蒸気輸送に起因している。一方、大気中に含まれる水蒸気量が少ない冬季においては短時間強雨の発現は少なく、降水強度も弱い。例として高知における日最大1時間降水量の観測値を挙げると、最大となる1998年9月24日の高知豪雨では129.5mmに及んでいるが、1月の最大値は1975年1月22日に観測された36mmにとどまっている。現地気圧、気温、相対湿度の平年値を用いて算出される平均的な状態を表わすと考えることが可能な絶対湿度の値は、最大となる8月は 19.9g/m^3 、最小の1月では 4.5g/m^3 で、最寒月における大気中の水蒸気量は最暖月の1/4以下にとどまっていることがわかる。このように、大気中の水蒸気量からも冬季には短時間強雨が発生し難いことが推察されるが、2020年1月27日には大分県と高知県で 100mm/h のオーダーに達する短時間強雨が発生した。本稿はこの短時間強雨の成因について、水蒸気輸送、地上風の収束・発散、降水量の増幅に地形が及ぼす影響のそれぞれの観点から明らかにすることを目的とする。

2. 降水の発現状況

佐伯 AMeDAS における27日12時から同24時までの10分間降水量の推移に着目すると、16時頃までは $0.5\sim 1.0\text{mm}/10\text{min}$ の弱い雨が断続していたが、その後降水イベントは活発化し、18時30分から19時20分にかけては $10\text{mm}/10\text{min}$ を上回る降水量を観測しており、最大1時間降水量は 117.5mm 、同10分間降水量は 34.0mm となっている。この2つの値は1月の全国での最大値を更新している。降水イベ

ントは20時30分頃には終息している。

窪川 AMeDAS における同期間の10分間降水量の推移を見ると、短時間強雨のピーク以前の14時から20時にかけてもまとまった降水が認められる。降水イベントはその後弱まったが22時頃より再び活発化し、23時10分までの1時間に 74.5mm の降水量を観測している。

気象官署および AMeDAS に「国土交通省水文水質データベース」で開示されている観測点のうち、降水イベント期間に欠測がないものを加えた観測網による佐伯地方の15時から20時までの積算降水量の分布に併せ、窪川周辺における12時から24時までの積算降水量の分布について述べると、佐伯地方においては多降水域は沿岸部に南北方向に形成されている。窪川周辺では船戸 AMeDAS から窪川にかけての領域が多降水となっており、この多降水軸以西の観測地点については四国脊梁山地に近づくにつれて降水量が減少する傾向が認められる。

3. 総観場の状況

21時の地上天気図によると、高知県西部の南方沖合の太平洋上に 996hPa の低気圧があり、北海道と東北地方を除く日本列島は気圧の谷となっている。

同時刻における大気の成層を把握するため、鹿児島、福岡、潮岬における相当温位の垂直分布に着目した。3地点ともに 900hPa 面以下の下層においては、高度とともに相当温位は低くなっており、対流不安定となっている。対流不安定となっている領域は、鹿児島の $700\sim 800\text{hPa}$ 面、潮岬の $600\sim 700\text{hPa}$ 面にもそれぞれ認められる。

大分県の佐伯地方で降水のピークとなっていた19時における九州東部から近畿地方にかけての領域における地上の絶対湿度と、この値と1月の平年値を用いて算出した平均的な状態を表わすと考えられる値との比の分布状況に着目した。高知県南西

部の清水では 13 g/m^3 を上回っており、紀伊半島から四国地方を経て九州東岸にかけての領域で南北方向の傾度が大きくなっている。平年値を用いた平均的な状態を表わすと考えられる値は、九州東部から近畿においては各観測点ともに $4\sim 5 \text{ g/m}^3$ であり、ほぼ均質な水蒸気分布を示す。これより、紀伊半島から九州東岸にかけての領域における地上の水蒸気量は平年値に基づくものの2倍以上に及んでいることがわかる。

4. 考察

(1) 水蒸気輸送

まず、大気の垂直方向における大雨発生地を指向する水蒸気輸送量の分布状況を明らかにするため、21時における鹿児島島の南風成分による輸送量、福岡の北風成分による輸送量、潮岬の東風成分による輸送量のそれぞれについて指定気圧面毎に算出した。特筆すべき事項として、潮岬の $850\sim 925\text{hPa}$ 面において $200 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}$ を上回る水蒸気が東風成分によって輸送されていることが挙げられる。この値は、平成 29 年九州北部豪雨において朝倉での降水イベントが活発化する前の 2017 年 7 月 5 日 9 時の福岡での $700\sim 925\text{hPa}$ 面の西風成分による輸送量 ($150\sim 190 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}$) を上回っている。潮岬の $850\sim 925\text{hPa}$ 面における水蒸気量と東風成分に着目すると、絶対湿度は $6\sim 8 (\text{g/m}^3)$ 、東風成分は $30\sim 33 (\text{m/s})$ であり、東寄りの暴風が水蒸気輸送量の増大に寄与していることがわかる。

次に、地上風による大雨発生地への水蒸気輸送について述べる。佐伯を指向する水蒸気輸送量の観測地点別内訳（延岡の南風成分、大分の北風成分、宿毛の東風成分、清水の東南東成分）と佐伯の降水量の推移に着目した。宿毛の東風成分、清水の東南東成分による水蒸気輸送量は短時間強雨の発生前から降水イベントの終息後まで $100\sim 200 (\text{g/m}^2 \cdot \text{s})$ で推移している。この 2 地点の絶対湿度は $10\sim 14 (\text{g/m}^3)$ 、東風成分は $7\sim 14 (\text{m/s})$ である。佐伯の南方に位置する延岡では北風成分が発現していることにより大雨発生地を指向する水蒸気輸送は形成され

ておらず、北方の大分においては北風成分による佐伯地方を指向する水蒸気輸送が形成されているものの、輸送量は $50 (\text{g/m}^2 \cdot \text{s})$ 前後で宿毛、清水における値に比べ一桁小さい。

高知県の窪川を指向する室戸岬の東風成分による水蒸気輸送量と窪川の降水の推移について述べると、水蒸気輸送量は 12 時～21 時までは $150\sim 200 (\text{g/m}^2 \cdot \text{s})$ 、21 時以降は $200 (\text{g/m}^2 \cdot \text{s})$ 以上の値を示している。絶対湿度は $10\sim 12 (\text{g/m}^3)$ で、東風成分は $14 (\text{m/s})$ 以上に及び、この値は 21 時から 28 日未明にかけては $20 (\text{m/s})$ を上回っている。水蒸気輸送量のピークは東風成分の最大とほぼ対応し、降水イベントの終了後に発現している。

(2) 地上風の収束・発散

収束・発散は近似的に次式にて与えられる。

$$\text{収束・発散} = \frac{U1-U2}{dx} + \frac{V1-V2}{dy} \quad (\text{s}^{-1})$$

ここに、

- U1 : 東側の観測点の西風成分 (m/s)
- U2 : 西側の観測点の西風成分 (m/s)
- dx : 上記 2 点間の東西距離
- V1 : 北側の観測点の南風成分 (m/s)
- V2 : 南側の観測点の南風成分 (m/s)
- dy : 上記 2 点間の南北距離

この式によって得られた値が正の場合は発散、負の場合は収束となる。地上風の収束・発散の算出にあたり、AMeDAS 観測網による以下の領域を設定した。

- ・佐伯については、東西方向：竹田～宿毛 (121km)、南北方向：延岡～大分 (73km)

- ・窪川については、東西方向：宿毛～室戸岬 (138km)、南北方向：清水～本山 (114km)

佐伯地方においては、収束と降水のそれぞれのピークがほぼ一致して発現している。収束の強化は、竹田における西風成分の増大による。窪川周辺については、21 時過ぎに急激に収束が強まり、その後短時間強雨が発生している。宿毛における西風成分の増大によって収束は強くなっている。収束の強化は、総観規模の低気圧の東進により、大雨発生地の西側

の領域において気圧傾度力によってもたらされる風が東寄りから西寄りに変化することによって生じたものと推察される。

(3) 地形の影響

佐伯地方、窪川周辺ともに東風成分による水蒸気輸送が活発な条件下で短時間強雨が発生していることを踏まえると、東寄りの風が流入しやすく、また、風下にあたる西側の標高が大きく、流入気塊の強制上昇の作用を受ける地形条件の地点で降水量の増幅が生じていることが考えられる。いかなる地形因子が降水量の増幅に寄与しているのかについて明らかにするため、一（2020b）による手法に基づき、当考察で使用した観測地点について、風下側における地形の急峻度、風上側における遮蔽度、南寄りの風の流入のしやすさと強制上昇作用の受けやすさの双方を表わし得ると考えられるこの二者の差の値のそれぞれを説明変数とし、短時間強雨が生じた降水イベント期間の積算降水量との関係について調べた。急峻度ならびに遮蔽度は、観測点を中心に東西方向を基軸とした北側、南側それぞれ 22.5° の合計 45° の範囲を対象とし、国土地理院発行の 1:50000 地形図より考察対象範囲内における風下側の西象限、風上側の東象限それぞれにおいて観測点直近の標高極大点とその高度を読み取り、 \tan^{-1} (観測点直近の標高極大点と観測点の標高差/観測点から直近の標高極大点までの距離)で求めた。風上側の遮蔽度を算出するに当たり、標高の極大点が認められない状態で海上に至っている部分がある観測点については、 $\tan^{-1}(0\text{m}-\text{観測点の標高}/\text{観測点から直近の海面までの距離})$ の負の値とした。

佐伯地方においては、積算降水量は地形の急峻度と遮蔽度の差の値との間に 5%水準の t 検定の結果有意と判定される正の相関関係が認められ、相関係数 r の値は 0.729 に及んでいる。また、遮蔽度との間については 5%水準の t 検定の結果は有意ではないものの、相関係数 r の値は -0.507 を示している。地形の急峻度と遮蔽度の差の値と積算降水量との

間の正の相関関係は、風下側の急峻度が大きく、併せて風上側の遮蔽度が小さい地点ほど多降水になることを意味しており、東風が流入しやすく、かつ強制上昇の作用を受ける程度が大きいため多くの降水量がもたらされていると捉えることが可能である。遮蔽度との負の相関関係は、遮蔽度が小さくなるほど、すなわち東風が流入しやすい地形条件であるほど多降水となっていることを示すと考えられる。

窪川周辺では、これらの説明変数では降水量の増幅作用を合理的に説明することは出来なかった。多降水域の中心軸は船戸から窪川にかけての南北方向に形成されていると見られることから、四国脊梁山地からこの領域に分岐する南北方向に延びる尾根が東寄りの風を強制上昇させて降水量の増幅に寄与していることが考えられる。国土地理院発行の 1:50000 地形図より船戸から窪川にかけての領域における南北方向に延びる尾根を読み取った。尾根はこの領域における主峰である鈴が森 (1054m) の南方で 3 列に分岐している。これらの標高は 900~925hPa 面の高度と同程度である。佐伯地方についてこれと同じ考え方に基づいて地形図より読み取った尾根も窪川周辺と同じく、東寄りの風をさえぎる南北方向に形成されている。標高は数百 m であり、これも 925hPa 面の高度とほぼ同程度である。以上にに基づき、降水量は海拔高度が数百 m 以下の位置に分布する水蒸気が強制上昇の作用を受けることによって増幅されたものと考えられる。

5. まとめ

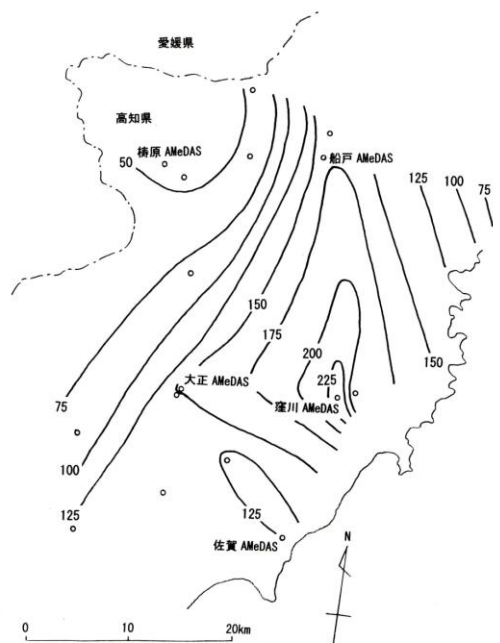
佐伯地方および窪川周辺の短時間強雨は、紀伊半島から九州東岸にかけての領域における地上の絶対湿度が 1 月の平年値より算出したものの 2 倍以上に及んでいる状況下で、強い東寄りの風が収束することによって生じている。地上風の収束は、強雨発生地西側の東風成分が弱まることによって強化されており、総観規模の低気圧の東進に伴う気圧傾度力がもたらす風向の変化に起因するものと推察される。強雨発生時直近の潮岬の 850~925hPa 面

における東風成分は 30m/s を超えており、これによって梅雨期の大雨発現時と同程度の水蒸気輸送量となっていた。

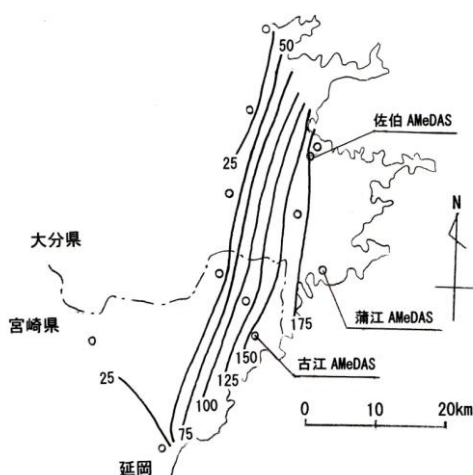
強雨の生成に地形が及ぼした影響について考察すると、佐伯地方においては東風が流入しやすく、かつ風下で強制上昇の作用を受ける度合いが大きい観測点で多降水となる傾向が認められた。降水量の増幅に寄与していると考えられる尾根は佐伯地方、窪川周辺ともに南北方向に形成されており、高度は 925hPa 面と同程度である。これより、海拔高度が数百 m 以下の位置に分布する水蒸気が強制上昇の作用を受けることによって降水量が増幅されたものと考えられる。

参考文献

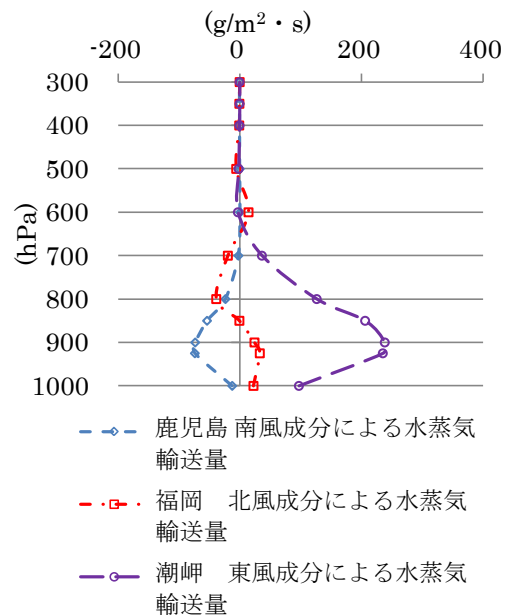
- 一 広志 (2020a) 水蒸気輸送に着目した平成 30 年 7 月豪雨時における愛媛県南予北部の降水の特徴～平成 29 年 7 月九州北部豪雨の事例との比較～. 天気, 67, 175-180
- 一 広志 (2020b) 平成 30 年 7 月豪雨における愛媛県南予地方の大雨の成因と特徴, 愛媛の地理, 26, 印刷中



2020 年 1 月 27 日の 12 時から 24 時までの降水量 (単位: mm)



2020 年 1 月 27 日の 15 時から 20 時までの降水量 (単位: mm)



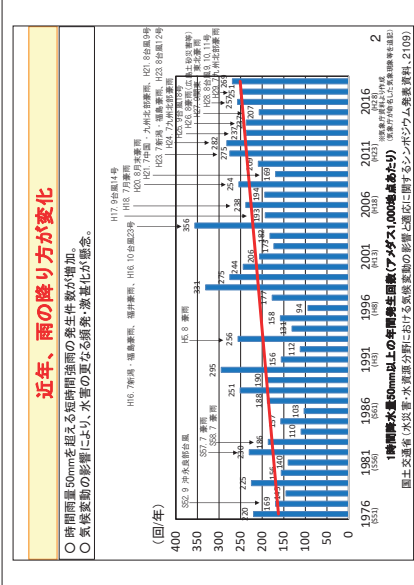
大雨発生地を指向する水蒸気輸送量の鉛直分布 2020/01/27 21時

気候変動と豪雨災害

気候変動と豪雨災害2020年 第2回シンポジウム 特別講演
ウェブ開催 '20/12/18

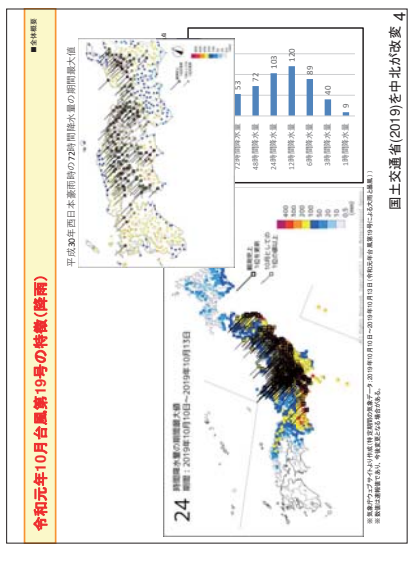
中北 英一

京都大学防災研究所 教授
気候変動/リスク予測・適応研究 連携研究ユニット長
文部科学省 統合プログラム 領域テーマD代表



近年における水害・土砂災害の発生状況

① 2012年7月九州・北九州 北九州豪雨
② 2013年9月 九州 北九州豪雨
③ 2014年8月 九州 北九州豪雨
④ 2015年7月 九州 北九州豪雨
⑤ 2016年7月 九州 北九州豪雨
⑥ 2017年7月 九州 北九州豪雨
⑦ 2018年7月 九州 北九州豪雨
⑧ 2019年7月 九州 北九州豪雨



最近の災害から思うこと

- 地球温暖化の影響が出始めているのでは
- これまでの常識が通用しない。
- 豪雨・より頻発により強風に、初めて
- 西日本豪雨; 強風ではないが、広域で
- 後押ししない、地球温暖化への適応
- 科学的な気候変動予測予測を軸にし
- 治水の基礎体力の増強
- 危機管理の強化
- 自動・共同しての防災力の増強
- ともに時間がかかる、しじわでも温暖
- 化進行の方が早い、今・後押ししない
- い百までその地元の対応が必要!
- では、何を? その地元の対応は?
- 将来予測の共有
- 災害からの教訓
- 水工学・土工学・気象学 研究として扱
- けているものはないか?

文部科学省 共生～統合プログラム

- Kyousei(共生)Program:2002-2006**
 - 地球シミュレーション用の温暖化予測モデルを開発
 - 20km全球出力, 5.2km日本域出力(時間雨量)
- Kakushin(革新)Program:2007-2011**
 - 20km全球出力, 5.2km日本域出力(時間雨量)
 - 自然災害への影響評価が可能に
- Sousei(創生)Program:2012-2016**
 - 最大クラス外力による影響評価も
 - 適応に向け防災リスク評価
 - 自然災害、水資源、生物・生態系
- Togo(統合)Program:2017-2021**
 - 気候モデル～ハザードモデルの統合と高度化
 - 後悔しない適応・評価

文部科学省、統合気候モデル高度化研究プログラムの4つの研究領域と基礎的・研究体制の構築

- 基礎的・研究体制の構築
- 統合気候モデル高度化研究プログラムの4つの研究領域
- 基礎的・研究体制の構築
- 統合気候モデル高度化研究プログラムの4つの研究領域

テーマA,B,C及び実務機関との関係

統合的気候モデルの開発・予測コミュニティ (テーマA, B, C)

実務機関 (気象庁、国土交通省、国土院、国土交通省、国土院、国土交通省)

統合的気候モデルの開発・予測コミュニティ (テーマA, B, C)

実務機関 (気象庁、国土交通省、国土院、国土交通省、国土院、国土交通省)

地球温暖化で地球はどうなるだろう

気候モデルによる科学ベースの将来予測

01 Sep 208X 00UTC

気候学・コンピュータサイエンス・地球工学の融合
文部科学省 統合気候予測モデル高度化プログラム

日本で災害をもたらす三大降雨原因

- 台風**
範囲: 1000km
期間: 1日~数日
大雨川での洪水、大規模被害、土砂災害
2009/08/08 In 台湾
- 梅雨前線(梅雨、秋雨前線)**
範囲: 100km
期間: 6時間~半日
中小河川での洪水、内水氾濫、都市内水氾濫
2014/8/20 In 広島, 2017/7/05 In 九州北部
- 局所的豪雨(ゲリラ豪雨)**
範囲: 10km
期間: 30分から1時間
小河川や下水道内での洪水、都市内水氾濫
2008/07/28 In 徳島川, 2008/08/05 at 墨田川/谷

2060km 格子モデル(NHRCM06)
2km 格子モデル(NHRCM02)
5km 格子モデル(NHRCM05)

地球温暖化で地球はどうなるだろう

気候モデルによる科学ベースの将来予測
(全球気候モデルと領域気候モデル)

- 5km領域気候モデル(RCM) 梅雨豪雨・ゲリラ豪雨災害
- 2km領域気候モデル 梅雨豪雨・ゲリラ豪雨災害
- 20km全球気候モデル(GCM) 台風災害

05 Sep 208X 00 UTC

大アンサンブル実験デザイン d4PDF d2PDF

60km A GCM
日本域 20km
アンサンブル 1951-過去実験
2010

1850年以降の気温
1951-過去実験
2010
将来実験
21世紀中-SSP126

過去に20年に1度あった「年最大日降水量」を+4度の世界では20年に1回程度繰り返すか?

アンサンブルメンバーの増加
20年 x 1メンバー
20年 x 100メンバー
20年 x 1000メンバー

1951~1970 (回/20年)

創生と統合 Program D (2012-2022)

Ultimate Goal
より精度の高い予測の発注
創生モデルによるアンサンブル予測による高精度予測

創生 (2012-2016)
Rakushin (2017-2021)
更新

最大のリスク
超長一生涯の観測データ不足
最大リスクの軽減
観測データ不足
社会インフラの適応

For adaptation decision making
Deterministic, Probabilistic and Beyond
中核 (2012, 2015)

温暖化による日本への影響推測

- 台風:**
 - 日本への到来回数は減る
 - スーパー台風の高頻性は高まる
- 梅雨:**
 - 7月上旬の日100mm以上の割合や集中豪雨の生起回数が増える。
 - 日本海側の豪雨も増えるだろう
- ゲリラ豪雨:**
 - 都市化や下層水蒸気の流入増があり増えるだろう

極端現象に伴う災害発生変動評価

極端現象 (傾斜系、山岳系、沿岸系、都市・低平地)

傾斜系: 傾斜系・水資源・水資源・水資源・水資源 (傾斜系・水資源・水資源・水資源)

山岳系: 山岳系・水資源・水資源・水資源 (山岳系・水資源・水資源・水資源)

沿岸系: 沿岸系・水資源・水資源・水資源 (沿岸系・水資源・水資源・水資源)

都市・低平地: 都市・低平地・水資源・水資源 (都市・低平地・水資源・水資源)

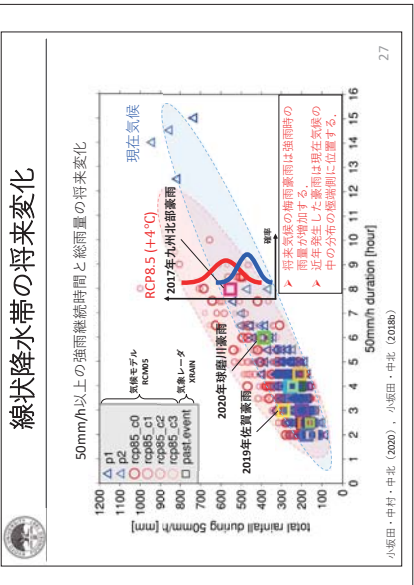
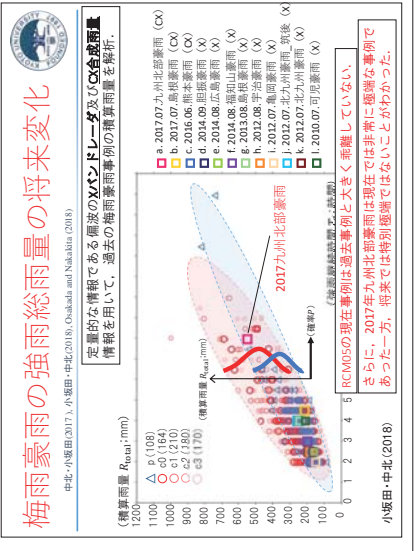
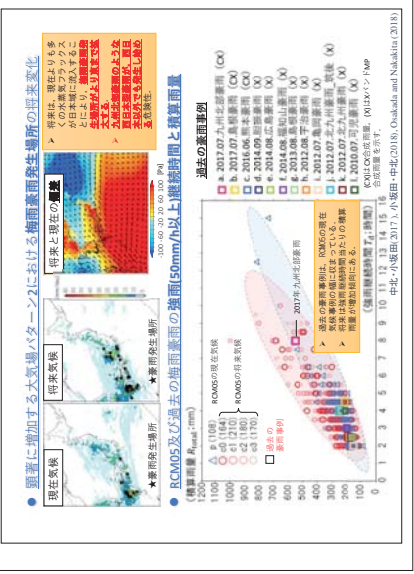
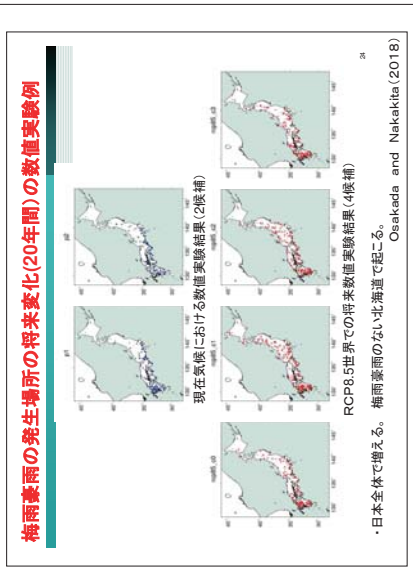
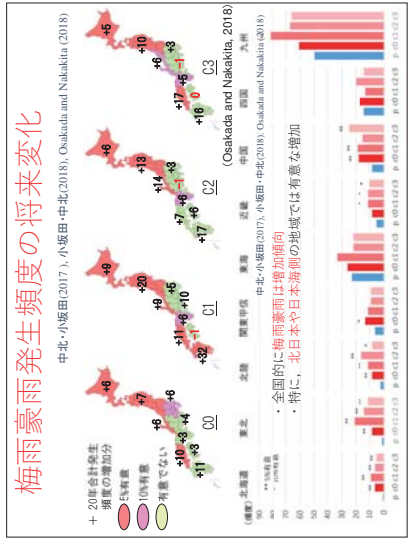
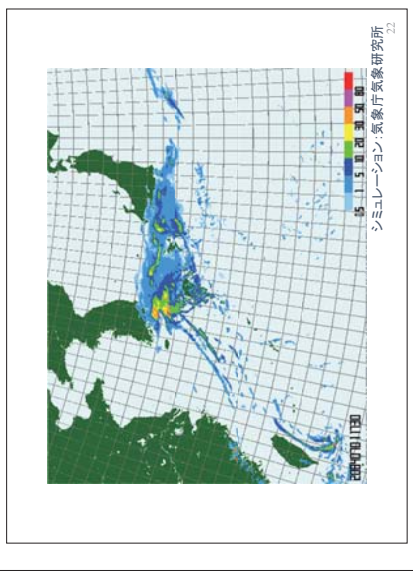
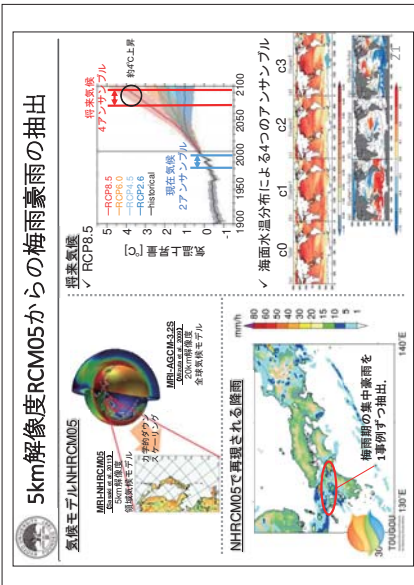
災害発生変動評価

水災害・水資源に関し、我が国ではおおよそ何が推測されているか?

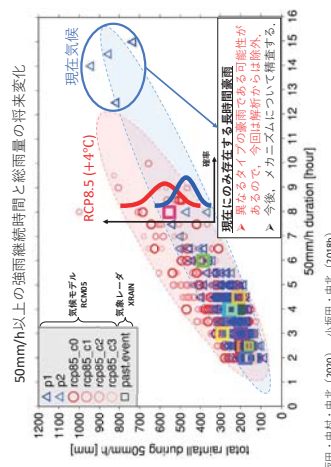
- 100年に一度起こる規模の河川最大流量が全国で増大する
- 10年に一度の少ない規模で起こる河川流量が日本と中部山岳地帯を除く多くの流域で悪化し、融雪水を利用している地域では、融雪ピークの減少やそれが早期化する
- ダム操作の有効性が変化する (洪水時も、渇水時も)
- 西日本太平洋側を中心に、表層前線や、深層前線といふ数10mの深さでかつ水平規模の大きい斜面崩壊の危険性が増大すること
- 100年に一度の前線で起こる高潮・高波が主要湾で悪化する
- 降雪、積雪状況の変化により、水ストレスが増加すること

最近の豪雨災害から思うこと

- 温暖化影響が出だしている
 - 2017年九州北部豪雨は4度上昇の世界で普通
 - 2018年西日本豪雨では温暖化影響なしでは考えられないほどの総水蒸気流入量、総雨量は温暖化のせいでは6~7%増加
- 温暖化の台風への影響予測
 - 発生数は若干減るが、発生するとスーパー台風の可能性大
 - 台風のコアは東にずれ、ゆく
 - 東北でも500~800mmの総降水量
- 気候区の境界での災害
 - 温暖化の影響は気候区境界で見えやすい
 - 計画規模を越えなくても計画規模に近いものももたらされやす
 - 計画規模まで整備が進んでいないところが弱点となる危険性高
- 行政との連携と適応

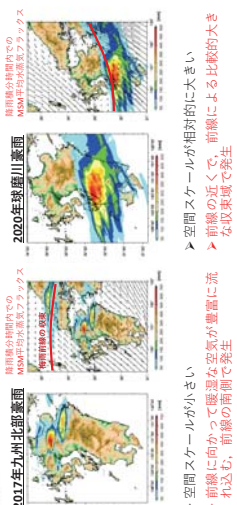


線状降水帯の将来変化



小塚田・中村・中北 (2020)・小塚田・中北 (2018b)

様々な“線状降水帯”

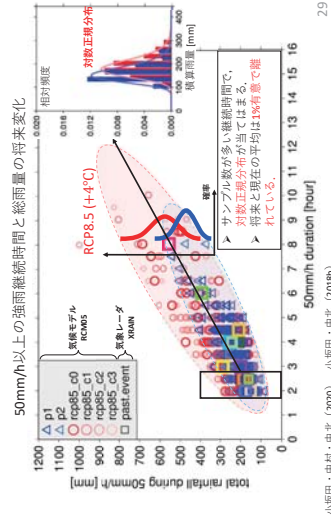


空間スケールが小さい
 前線に比べて、前線より発達した低気圧が原因で発生
 前線に比べて、前線より発達した低気圧が原因で発生
 前線に比べて、前線より発達した低気圧が原因で発生

RCM5事例の分類：
 850hPa面の湿断数値データと地表面水蒸気フラックスの傾きの急激な変化から判断できる。気団の取っ手場を梅雨前線とする。
 ・前線の位置と強雨域が約100km以上離れている場合→小スケール
 ・前線の位置と強雨域がほぼ一致する場合は大スケール

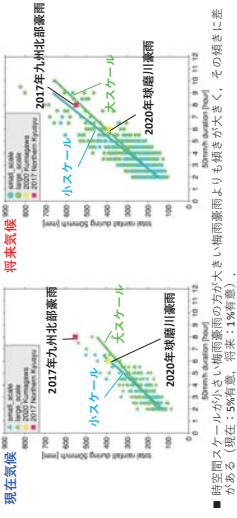
小塚田・中村・中北 (2020)

確率分布の当てはめ



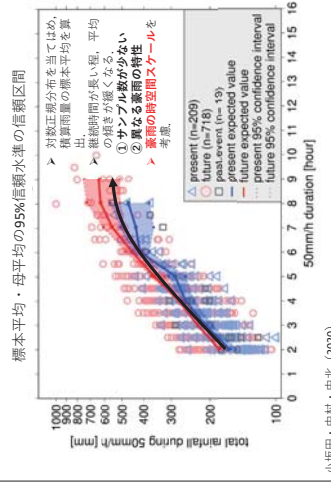
小塚田・中村・中北 (2020)・小塚田・中北 (2018b)

RCM5の梅雨豪雨_スケール別



時間スケールが小さい梅雨豪雨の方が大きい梅雨豪雨よりも傾きが大きく、その傾きに差がある (現在：3%程度、将来：1%程度)。
 各スケールの継続時間は将来長くなり、回帰線の傾きも大きくなる。
 2017年九州北部豪雨は継続時間が長くなることで将来における小スケールの回帰線に近づき、2020年球磨川豪雨も将来の小スケールの回帰線に近づく。
 小スケールの継続時間が長くなるのは全期間ダウンスケールの利点、ddepfの上位ダウンスケールでは小スケールは拾われない可能性？ 小塚田・中村・中北 (2020)

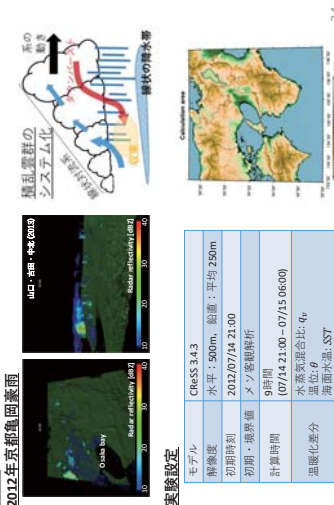
有意差検定



小塚田・中村・中北 (2020)

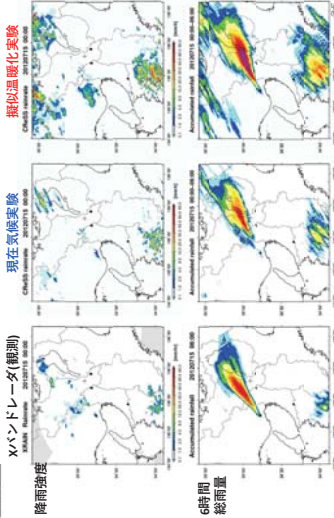
小スケール線状対流系の降雨強度増加のメカニズム解析

雨量増加のメカニズム_擬似温暖化実験



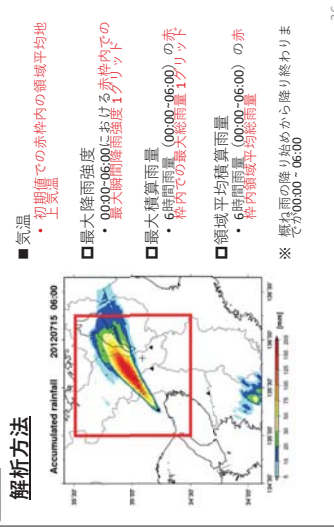
小塚田・中北 (2020)

擬似温暖化計算結果



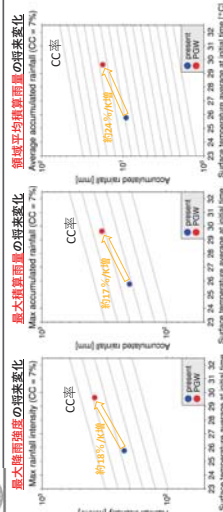
小塚田・中北 (2020)

雨量の増加率とCC-rate



小塚田・中北 (2020)

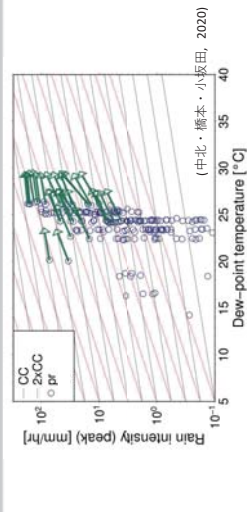
雨量の増加率とCC-rate



- 最大降雨強度、最大積算雨量、領域平均積算雨量の全てにおいて、類似温暖化実験でCC率を上回る雨量の増加が見られた。
- 期間・領域ごとのグリッドで解析した最大降雨強度と最大積算雨量より、領域平均した積算雨量の方が変化率が大きい。
- 今後より解析を行っていく必要があるものの、システムとしての非線形効果が領域平均積算雨量ではより現れた可能性がある。

小坂田・中北 (2020)

類似温暖化実験から得られた孤立積乱雲による降雨強度の変化



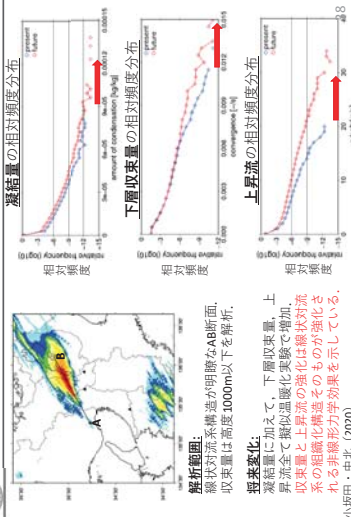
高降雨強度: CO率, 低降雨強度: CC率を上回る。
単なる水蒸気量増加だけでなく、力学的・熱力学的プロセスの変化

最近の豪雨災害から思うこと

- 温暖化影響が出だしている
 - 2017年九州北部豪雨は4度上昇の世界で普通
 - 2018年西日本豪雨では温暖化影響なしでは考えられないほどの総水蒸気流入量、総雨量は温暖化のせいでは6~7%増加
- 温暖化の台風への影響予測
 - 発生数は若干減るが、発生するとスーパー台風の可能性大
 - 台風のコアは真にずれてゆく
 - 真北でも500~800mmの総降水量
- 気候区の境界での災害
 - 温暖化の影響は気候区境界で見えやすい
 - 計画規模を越えなくても計画規模に近いものもたらされやす
 - 計画規模まで整備が進んでいないところが弱点となる危険性高
- 行政との連携と適応

43

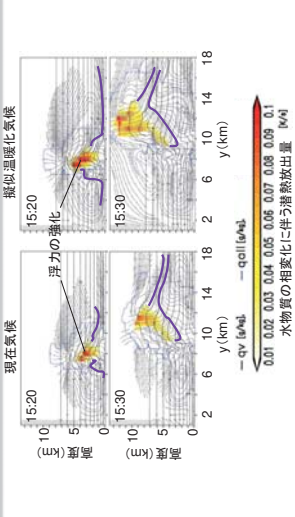
雨量増加への非線形効果



解析断面: 線状降水構造が明確なAG断面。収束量は高度1000m以下を解析。
将来変化: 凝結量に加えて、下層収束量、上昇流量に類似温暖化実験で増加。収束量と上昇流の強化は線状降水系の組織化促進そのものが強化される。非線形力学効果を示している。

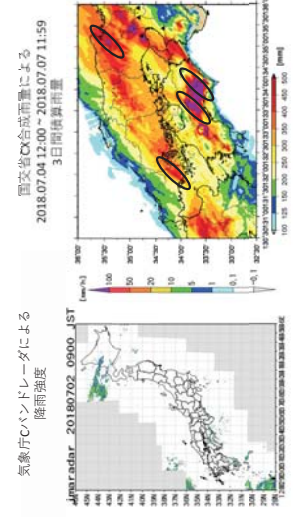
小坂田・中北 (2020)

水蒸気吸い込み量の将来変化



雲のコアに吸い込まれる水蒸気量の増加が考えられる。
(中北・橋本・小坂田, 2020)

2018年西日本豪雨は…?



44

孤立積乱雲の疑似温暖化実験

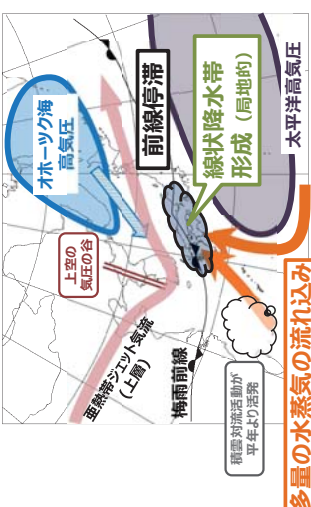
39

ここまでのまとめ

- ◆ 統計分析と線状降水帯の時空間スケール分析
 - 継続時間を条件付きにした場合の積算雨量の確率分布は対数正規分布に従い、**現在と将来でも確率分布が異なる。**
 - 線状降水帯は、大きく2つに分類される
 - A) 前線に付随する空間スケールの大きなタイプ
 - B) 前線から離れた場所発生する空間スケールの小さなタイプ
 - BはAに比べて継続時間が短く、積算雨量が多い傾向にある。
 - 将来ではどちらのタイプでも継続時間が長くなり、積算雨量も多くなる。
- ◆ 局所豪雨の降雨強度増加のメカニズム (小スケール)
 - 将来気候における雨量の増加率はCC率を上回る。
 - 水蒸気量増加による熱力学的効果がなく、線状対流系の組織化構造の強化という非線形力学効果を確認した。

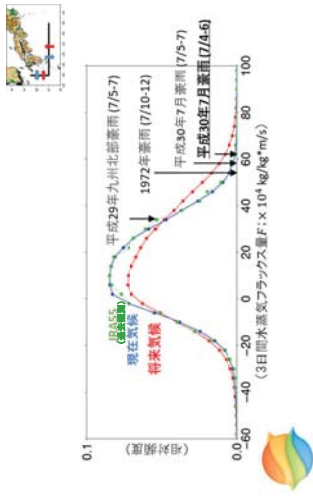
42

西日本を中心とした記録的な大雨 (7月5日から8日) をもたらした大気の流れ

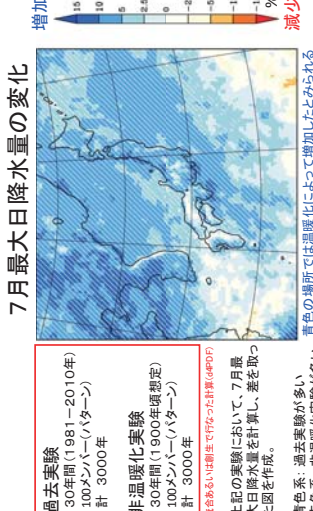


45

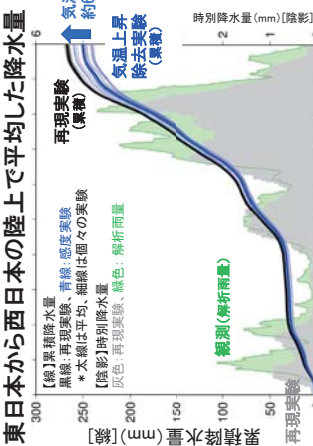
平成30年西日本豪雨の水蒸気浸潤の異常さ



これらでの地球温暖化が大気湿度に及ぼした影響



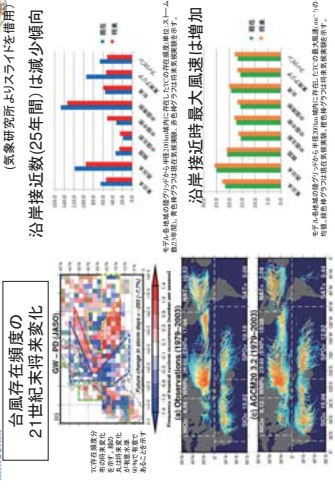
～事例ベースの量的アプローズ～



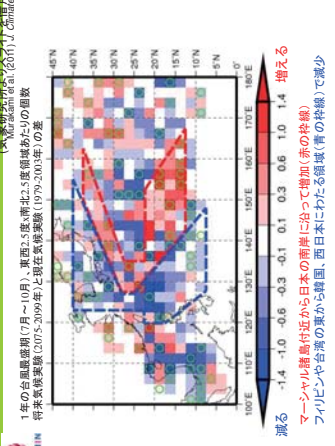
最近の豪雨災害から思うこと

- 温暖化影響が出だしている
 - 2017年九州北部豪雨は4度上昇の世界で普通
 - 2018年西日本豪雨では温暖化影響なしでは考えられないほどの総水蒸気流入量、総雨量は温暖化のせいでは6〜7%増加
- 温暖化の台風への影響予測
 - 発生数は若干減るが、発生するとスーパースタインの可能性があります
 - 台風のコースは東にずれやすく
 - 東北でも500〜800mmの総降水量
- 気候区の境界での災害
 - 温暖化の影響は気候区境界で見えやすい
 - 計画規模を越えなくても計画規模に近いものももたらされやす
- 行政との連携と対応
 - 計画規模を越えなくても計画規模に近いものももたらされやす
 - 行政との連携と対応

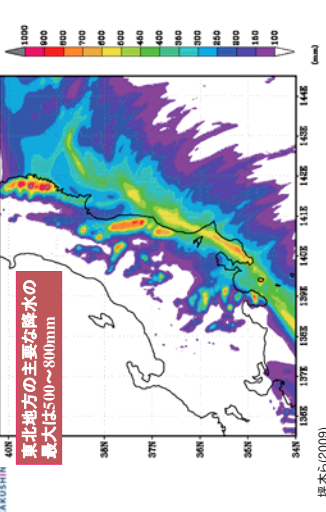
沿岸に接近する台風の将来変化



台風存在頻度は東へシフト (前期モデル)

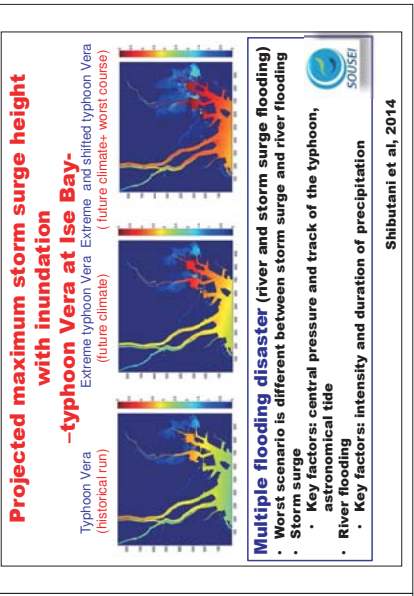
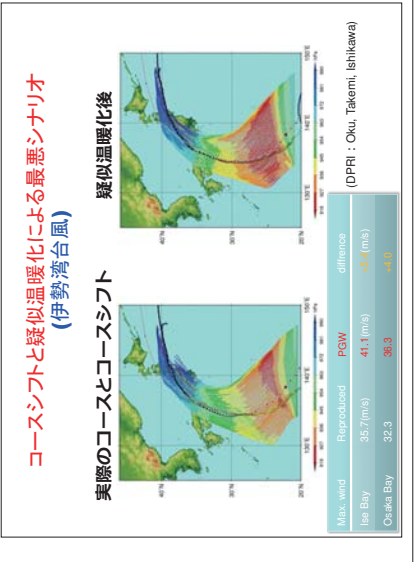
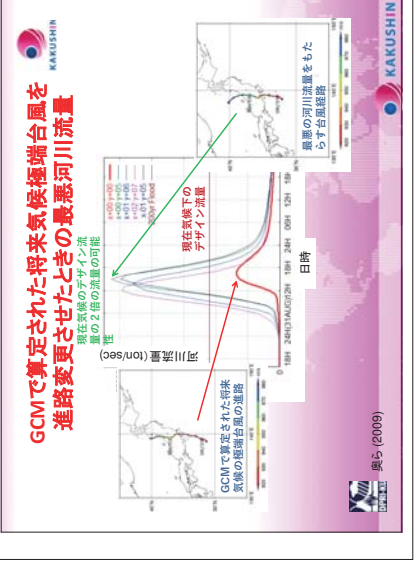
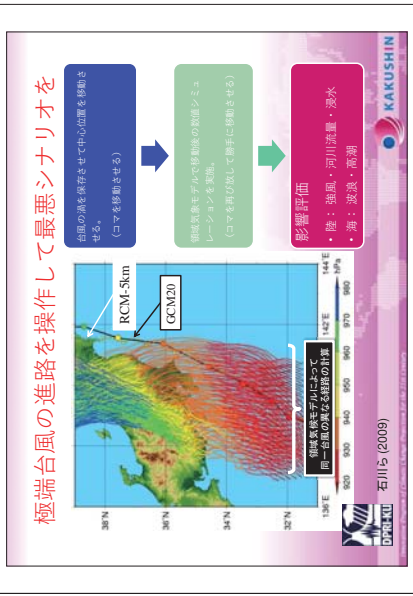
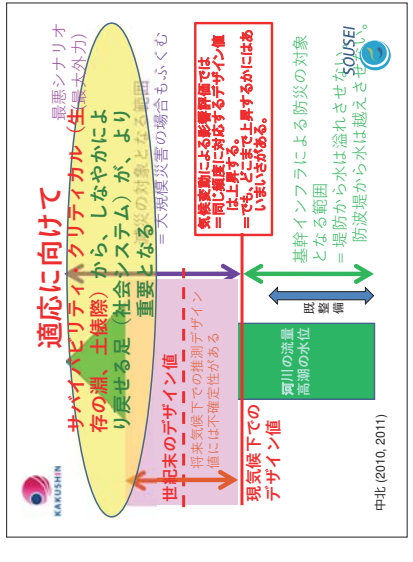
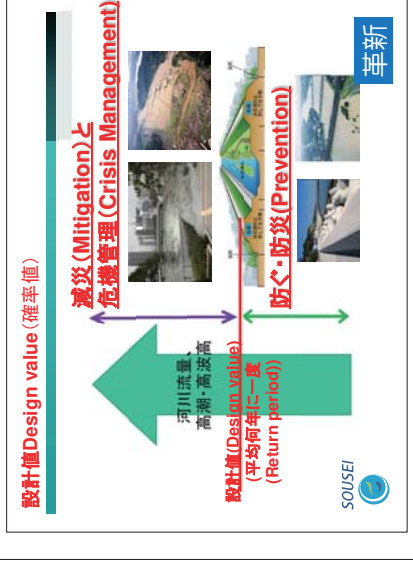
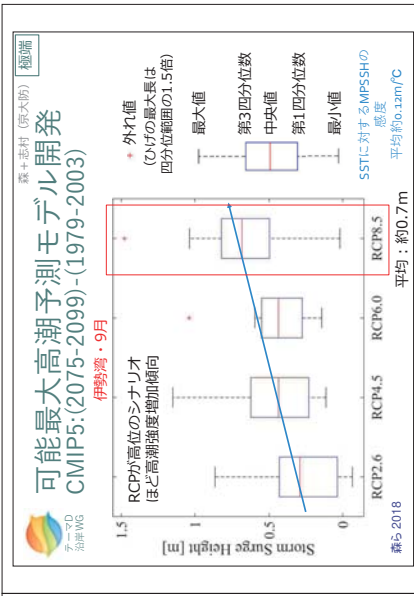
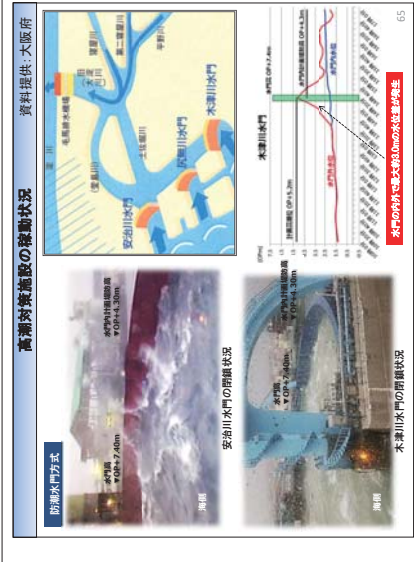
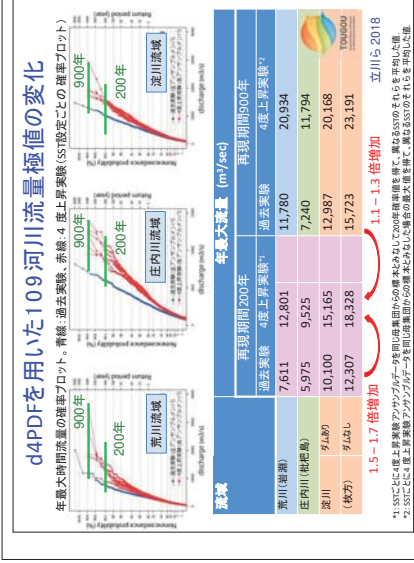


豪雨水系全体のダム群全体で洪水調整



d4PDFを用いた淀川、庄内川および荒川の年最大時間流量の確率分布





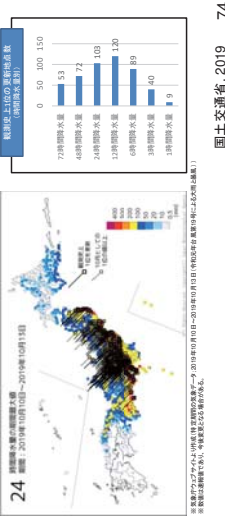
最近の豪雨災害から思うこと

- 温暖化影響が出だしている
 - 2017年九州北部豪雨は4度上昇の世界で普通
 - 2018年西日本豪雨では温暖化影響なしでは考えられないほどの総水蒸気流入量、総雨量は温暖化のせいで6~7%増加
- 温暖化の台風への影響予測
 - 発生数は若干減るが、発生するとスーパータームの可能性大
 - 台風のコースは真にずれてゆく
 - 東北でも500~800mmの総降水量
- 気候区の境界での災害
 - 温暖化の影響は気候区境界で見えやすい
 - 計画規模を超えなくても計画規模に近いものもたらされやす
 - 計画規模まで整備が進んでいないところが弱点となる危険性高
- 行政との連携と適応

73

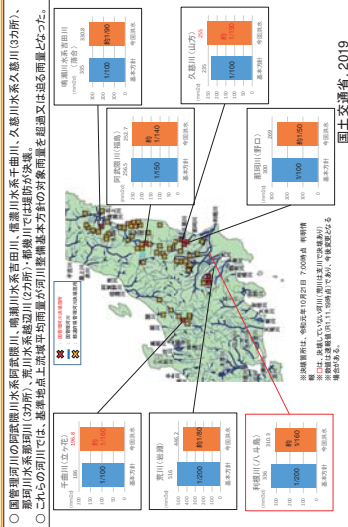
令和元年10月台風19号の特徴(降雨)

- 10月6日に南風低気圧が発達して台風19号は、12日19時頃に大坂で伊豆半島の上陸した。その後、関東地方を通過し、13日12時に日本の東で温帯低気圧に変わった。
- 台風19号の進路は、通過に伴い、広い範囲で大雨、暴風、高波、高潮となった。
- 前については、10日から13日までの総降水量が、神奈川県南西部で1000ミリに達し、東日本を中心に各地で総降水量100mm以上の豪雨を観測するなどの被害となつた。東北地方の多くの地点でも、12、24時間降水量の観測史上1位の値を記録するなどの被害となつた。24時間降水量は103地点、48時間降水量は72地点で観測史上1位を更新した。



国土交通省, 2019

令和元年10月台風19号の特徴(降雨)



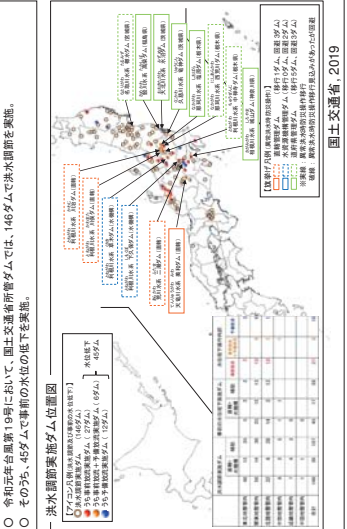
国土交通省, 2019

台風の豪雨災害から思うこと

- 温暖化影響が出だしている
 - 2017年九州北部豪雨は4度上昇の世界で普通
 - 2018年西日本豪雨では温暖化影響なしでは考えられないほどの総水蒸気流入量、総雨量は温暖化のせいで6~7%増加
- 温暖化の台風への影響予測
 - 発生数は若干減るが、発生するとスーパータームの可能性大
 - 台風のコースは真にずれてゆく
 - 東北でも500~800mmの総降水量
- 気候区の境界での災害
 - 温暖化の影響は気候区境界で見えやすい
 - 計画規模を超えなくても計画規模に近いものもたらされやす
 - 計画規模まで整備が進んでいないところが弱点となる危険性高
- 行政との連携と適応

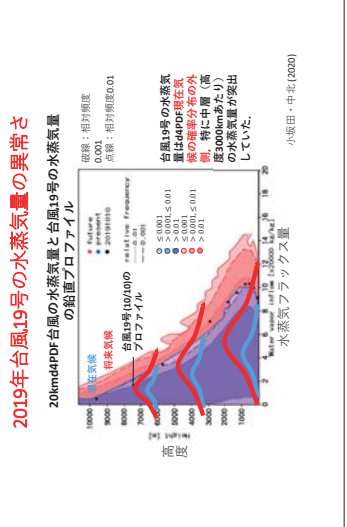
74

令和元年台風19号の防災対策状況



国土交通省, 2019

2019年台風19号の水蒸気量の異常



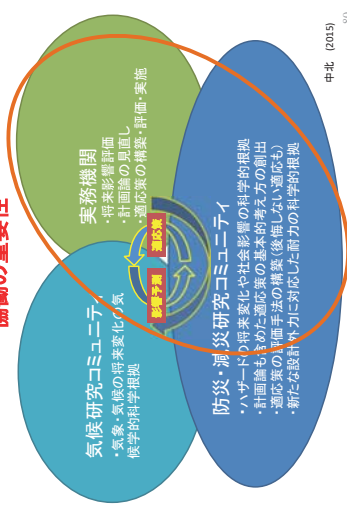
国土交通省, 2019

最近の豪雨災害から思うこと

- 温暖化影響が出だしている
 - 2017年九州北部豪雨は4度上昇の世界で普通
 - 2018年西日本豪雨では温暖化影響なしでは考えられないほどの総水蒸気流入量、総雨量は温暖化のせいで6~7%増加
- 温暖化の台風への影響予測
 - 発生数は若干減るが、発生するとスーパータームの可能性大
 - 台風のコースは真にずれてゆく
 - 東北でも500~800mmの総降水量
- 気候区の境界での災害
 - 温暖化の影響は気候区境界で見えやすい
 - 計画規模を超えなくても計画規模に近いものもたらされやす
 - 計画規模まで整備が進んでいないところが弱点となる危険性高
- 行政との連携と適応

75

気候研究コミュニティ、防災減災研究コミュニティ、実務機関 協働の重要性



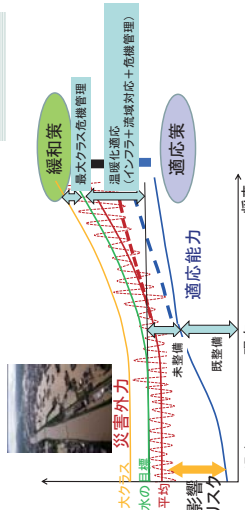
国土交通省, 2019

実務省庁との研究連絡会やシンポジウムでの価値



国土交通省, 2019

適応策の役割



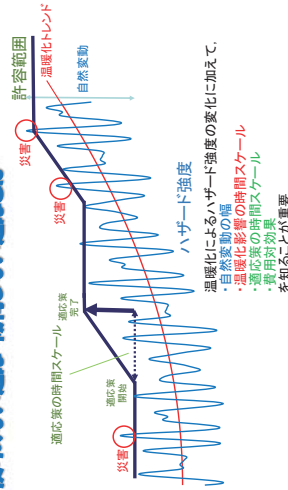
小松(九大, 2012)、三村(茨城大, 2014)に中北が追加(2019)

適応に向けての大切なこと

1. 対策とする河川流量などの設計値を見直す。
2. 気候変動下での最悪ケース群を想定する。
3. 高い不確実性の中で確信しにくい意思決定。
4. 善戦の「しんどう」管理の「しわじわ」定した高頻度化、これが今後、現場のしんどう、脆弱増大に結びついてリアルタイム防衛システムでの安全度を低下させる、そのようなことがないように対応して行く。
5. 川/岸/守ることができた事例も蓄積
6. タム再生、豪雨・流量予測能力の向上と安心できる操作構則
7. 溢量や水不足など、善戦の場しのぎ変化への適応
8. 治水の基礎力(運送インフラ)、危機管理能力、自助共助による小防災・減災力の向上
9. 可建内と外(堤外と堤内)を一体化した治水
10. シリアスに早期に逃げることを、やめたいと感じること。
11. 危険な場所には住まなほいこと。

温暖化に対する順応的適応策の考え方

手戻りのない適応・軽減しにくい適応とは



83

そもそも欠けている考え方はおほいか？

- 災害の形態が変わるのではないか？
- そもそも、自然ベースの流域・河川・沿岸の姿が変わるのではないか？
- どういった早さで？
- これらを科学的に予測する科学技術が重要！
- それに私達はどのように適応して行くのか？(社会、考え方の変化も含め) 一ひとつひとつの適応の総体が地域の適応となる！
- 誰をハッピーにするのか？ 流域住民である！を益々深めてゆかねばならない！

84

研究室の梅雨豪雨に関する参考文献

中北英一、菅谷敏雄、Kishimoto, 木島崇志、気候変動に伴う梅雨期の集中豪雨の発生変化に関する確率論的モデルを用いた定量的研究、土木学会論文集、土木学会誌、Vol.68, No.4, pp.1467-1469, 2012.

中北英一、菅谷敏雄、Kim Samhin、梅雨期集中豪雨発生要因となる大気層特性の気候変動に伴う出現頻度の将来変化予測、土木学会論文集B1(水工学), Vol.171, No.4, pp.1373-1378, 2015.

中北英一、小坂田ゆかり、気候変動に伴う梅雨期集中豪雨と大気層の将来変化に関するマルチスケール解析、土木学会論文集B1(水工学), Vol.174, No.4, pp.1391-1444, 2018. (2018.水工学論文集)

Otsukada Y. and E. Nishikida: Future change of occurrence frequency of Bain heavy rainfall and its linked atmospheric patterns by multiscale analysis, SOLA, The Meteorological Society of Japan, Vol.14, pp.79-85, doi:10.2151/sola.2018.014, 2018.

小坂田ゆかり、中北英一、確率論的モデルによる梅雨豪雨継続時間と豪雨量の将来変化予測と適応策を用いた評価、土木学会論文集B1(水工学), Vol.165, No.4, pp.1191-1201, 2018.

小坂田ゆかり、中北英一、平成30年7月豪雨の積微および地球温暖化による影響評価、土木学会論文集B1, 2019.

88

温暖化影響予測と適応

- 気候モデルによる将来の出力値により、我が国のハザード・水害等の気候変動影響予測が可能となる。
- 「どれくらい?」が不確定だが、シリアスになると予測されていると将来の適応が不可能あるいは困難になる危険性がある。
 - 今すぐ始める! → 社会の適応
- 地球を通過しての気候変動予測も、IPCCのアプローチとしてひとつひとつ進める。
 - まずこの問題を解決することが大事
 - 現在進行している対策も、大気温暖化の特性(気候変動の重要性)
 - 現在進行している対策も、大気温暖化の特性(気候変動の重要性)
- 科学的気候予測をベースに進める(最新インフラの計画)
 - Step by step の適応を計画する。手戻りの少ない適応。
- 最悪の事態も推測した適応(危機管理)を考える。
 - 気候変動下の最悪の状態をどう適応に組み込んで行くかが重要
- 地球・街・町・都市づくりによる適応 (中北, 2010, 2019)



影響評価・適応策創出の仲間です。

写真:宇治川、塔の場

研究室の孤立積乱雲に関する参考文献

中北英一、森元啓太郎・峠 嘉哉、5km解像度領域気候モデルを用いたゲリラ豪雨発生頻度の将来変化推定、土木学会論文集、B1(水工学), 第79巻, No.4, pp.133-138, 2017.

中北英一、橋本雅志、森元啓太郎・小坂田ゆかり、気候変動に伴う大気安定化及び水蒸気濃度がゲリラ豪雨発生頻度に及ぼす影響、土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.5, pp.25-30, 2018. (2019.水工学論文集)

中北英一、橋本雅志・小坂田ゆかり、気候変動に伴う大気安定化と水蒸気濃度がゲリラ豪雨の特性に及ぼす影響、京都大学防災研究所年報、第63号, 2020 (印刷中)。

89

研究室の梅雨豪雨に関する参考文献

小坂田ゆかり、中北 英・中北英一、梅雨期集中豪雨の時空間特性を考慮した強雨継続時間と梅雨雨量の将来変化の統計分析、土木学会論文集B1(水工学), Vol.176, No.2, pp.1-12, 2020.

小坂田ゆかり、中北英一、梅雨期集中豪雨の時空間特性を考慮した強雨継続時間と梅雨雨量の将来変化の統計分析、土木学会論文集B1(水工学), Vol.176, No.2, pp.1-6, 2020.

89



創生・統合プログラムに関する参考文献

- Mizuta, Ryo; Akhiko Murata; Masayoshi Ishii; Hideo Shiogama; Kenichi Hibino; Nobuhito Mori; Osamu Arakawa; Yukiko Imada; Kohji Yoshida; Toshinori Aoyagi; Hiroaki Kawase; Masato Mori; Yasuko Okada; Tomoya Shimura; Toshiharu Nagatomo; Mikko Ikeda; Hirokazu Endo; Masaya Nosaka; Miki Arai; Chiharu Takahashi; Kenji Tanaka; Tetsuya Takemi; Yasuo Tachikawa; Khujanzarov Temur; Yukihiro Nakamura; Tetsuya Takemi; **Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models**, Bulletin of the American Meteorological Society, **2016**.
- Takemi, Tetsuya, Yasuko Okada, Rui Ito, Hirohiko Shikawa, and Eiichi Nakakita. **Assessing the impacts of global warming on meteorological hazards and risks in Japan: Philosophy and achievements of the SOUSEI program**, Hydrological Research Letters, Vol.10, No.4, pp.119-125, **2016**.
- Ishii M., Mori N., d4PDF: **Large-ensemble and high-resolution climate simulations for global warming countermeasures**, Progress in Earth and Planetary Science 7 Article number 58, doi:10.1186/s40645-020-00367-7, **2020**.
- Mori, Nobuhito, Tetsuya Takemi, Yasuo Tachikawa, Hirokazu Tanaka, Tomoya Shimura, Tomohiro Tanaka, Toshimi Fujimi, Yukari Osakada, Adrean Webb, and Eiichi Nakakita, **Recent nationwide climate change 1. Impact assessments of natural hazards in Japan and East Asia**, Weather and Climate Extremes, **2020** (in press).