

将来気候における十勝川流域の大雨事例に寄与する力学的・熱力学的効果

DYNAMIC AND THERMODYNAMIC EFFECT ON HEAVY RAIN EVENTS
AT TOKACHI-RIVER BASIN IN FUTURE

北海道大学大学院工学院 ○学生員 鈴木章弘(Akihiro Suzuki)
北海道大学大学院工学院 正員 星野剛(Tsuyoshi Hoshino)
北海道大学大学院工学院 正員 山田朋人(Tomohito J. Yamada)

1. 背景

1.1 気候変動と極端豪雨

気候変動に関する政府間パネル第5次評価報告書¹⁾では気候システムの温暖化はもはや疑う余地がないと言われ、湿潤、乾燥した地域間、季節間で降水量の差が増大すると示唆されている。近年、日本各地で豪雨災害が頻発しており、北海道でも観測史上最大を更新した豪雨災害が発生した。2014年9月には胆振石狩地域を中心として集中豪雨が発生し、北海道で初となる大雨特別警報が発令された。また、2016年8月17日から23日の1週間に台風7,11,9号が北海道に上陸し、29日から前線に伴う降雨、その後に台風10号が北海道に接近し、北海道各地で記録的な大雨となった。図1では、8月29日から9月4日の積算降水量を示す²⁾。この事例において観測史上最大値を更新したアメダス雨量観測所は道内で89地点にも上り、糠平温泉郷では期間中で978mmの積算降水量を記録した³⁾。この記録は過去30年間のアメダス札幌観測所の月平均降水量が最も多い9月の降水量135mm/monthと比較してもはるかに大きい値であった⁴⁾。

1.2 降水特性の変化の分析

このような降水特性の変化に対して、Emori et al.(2005)⁵⁾は、水蒸気を上空に輸送する力学的指標となる500hPa高度の鉛直上向き流(以降、鉛直流)の日平均値と、同日の日降水量を用いて、降水量の変化の要因を「力学的影響」と「熱力学的影響」に分けて説明した。「力学的影響」とは鉛直流の変化によって引き起こされる降水量の変化であり、「熱力学的影響」とは鉛直流の変化以外、例えば、大気下層の水蒸気量の増加によって引き起こされる降水量の変化である。図2では、上空へ輸送される水蒸気量を f 、鉛直流を w_{500} 、下層大気の水蒸気量を q_v として「力学的影響」、「熱力学的影響」のイメージを示した。

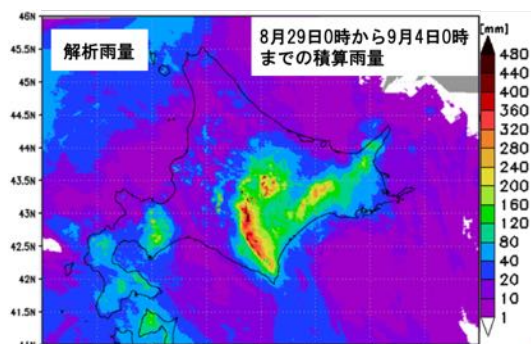


図1. 2016年8月29日0時から9月4日0時の解析雨量による積算雨量。(小林ら(2017)²⁾)

1.3 気温と極端降水の関係

Yamada et al.(2014)⁶⁾は、札幌と東京に着目した解析において、極端降水時の降水強度と地上気温には正の相関があり、降水強度は地表面気温と飽和水蒸気圧の関係式(Clausius-Clapeyron関係)に従った特徴を有していることを指摘した。この結果は、前述した「熱力学的影響」、また図2の「熱力学的影響」における下層大気の水蒸気量が増加すると鉛直流特性が変化せずとも降水量が増大することに関係すると考えられる。

1.4 降雨に与える地形的影響

2016年の台風10号による豪雨に関して Nguyen-Le et al.(2017)⁷⁾は、台風が引き起こした風が日高山脈で強制的に上昇させられ、図1にも見られるような山脈沿いの大きな降雨(地形性降雨)を引き起こしたと示唆している。また、山田ら(1995)⁸⁾は山地での地形の影響により降雨特性が変化し、特に風上側斜面での同一降雨事例において、標高と降雨量が比例関係であることを示している。さらに、今回の我々の結果では、地形性降雨は降雨特性の変化に影響を与えているという結果が得られた。

1.5 本研究の目的

上記の背景から本研究では、図3で示す2016年の台風による豪雨で大きな被害を受けた北海道十勝川流域での大雨事例を対象として、過去将来間の降水量変化を「力学的影響」「熱力学的影響」に分けて解析し、降水量変化の要因と特徴を考察する。その際に、局所的集中豪雨の影響や地形性降雨の特性を捉えるために、後述する地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベースを元にした、高時空間解像度の力学的ダウンスケーリングの結果を用いて解析を行う。

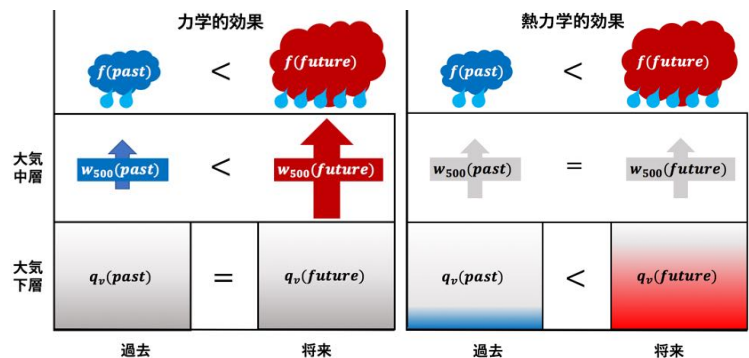


図2. 降水量変化に伴う「力学的影響」と「熱力学的影響」における大気下層の水蒸気量 q_v 、と大気中層の鉛直流 w_{500} のイメージ。

2. 解析データ

地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(以降, d4PDF)は, 水平解像度 60 km の全球気候モデルと, 日本域での水平解像度 20 km の領域気候モデルを用いた気候変動アンサンブル実験データである. 過去実験は過去の観測に基づく条件で 60 年間で 50 回(アンサンブル), 将来実験では地球温暖化により気温が 4 度上昇すると想定した条件で 60 年間で 90 回計算し, 過去 3000 年, 将来 5400 年分の計算を行なっている.

短時間集中豪雨等の極端降水を引き起こす積乱雲は Oranski のスケール分類から 2~20 km のメソスケールに属し, その寿命は 30 分から 1 時間程度と言われている⁹⁾. そのため, 上述した Emori et al.(2005)の解析手法を極端降水現象に適用する場合, 積乱雲の時空間スケールに適した解析データを用いる必要があると考えられる. そのため, d4PDF の計算結果を元に気象庁非静力学モデル(以降, JMA-NHM) を元に水平解像度 5km での力学的ダウンスケーリングを行なった. 山田ら(2017)¹⁰⁾は空間解像度 20 km の数値計算気象モデルの結果と 5 km の力学的ダウンスケーリングの再現結果を観測値と比較して, 5 km の結果の方が短時間集中豪雨の再現性が良く, また山地での集中豪雨を良く再現したことを確認している.

本研究では十勝川流域における大雨事例を解析対象とした. ここで言う大雨事例とは「十勝川流域における年最大 72 時間降水量を記録した 72 時間を含む 4 日間」と定義し, JMA-NHM の過去 3000 年, 将来 5400 年の計算結果から, 上位約 20%の過去 656 事例, 将来 1080 事例を今回の比較対象とした.

3. 解析手法

本研究で参考にした Emori et al.(2005)の手法を説明する. ある一地点における, ある年の鉛直流 ω の強さ毎の発生頻度 Pr_{ω} を図 4-(a)に示すように算出し, それと共に図 4-(b)に示すような鉛直流の強さと平均降水量 P_{ω} との関係性を算出する. 同じ強さの鉛直流の発生頻度と

$$\bar{P} = \int_{-\infty}^{\infty} P_{\omega} Pr_{\omega} d\omega. \quad (1)$$

平均降水量を掛け, 全ての鉛直流の強さで積算すると, その年の平均降水量 $\bar{P}$ を式(1)で求めることができる.

過去将来間における鉛直流の発生頻度の変化 δPr_{ω} による平均降水量の変化を「力学的影響」, 鉛直流の強さ毎の平均降水量の変化 δP_{ω} による降水量の変化を「熱力学影響」と定義した. それらを積算することで年平均降水量の変

$$\delta \bar{P} = \int_{-\infty}^{\infty} P_{\omega} \delta Pr_{\omega} d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} \delta P_{\omega} Pr_{\omega} d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} \delta P_{\omega} \delta Pr_{\omega} d\omega. \quad (2)$$

$$\delta Pr_{\omega} = Pr_{\omega}(f) - Pr_{\omega}(p). \quad (3)$$

$$\delta P_{\omega} = P_{\omega}(f) - P_{\omega}(p). \quad (4)$$

化 $\delta \bar{P}$ を式(2)で求めることができる.

式(2)の右辺第 1 項は力学的影響, 第 2 項は熱力学的影響, 第 3 項は共変項であり, 共変項は概ね小さく考慮しない. また式(2)の δPr_{ω} , δP_{ω} は式(3), (4)の様を求める事ができる. 変数 f , p は将来と過去の事例を表し, $Pr_{\omega}(f)$, $Pr_{\omega}(p)$ は将来, 過去事例における鉛直流の強さ毎の発生頻度, $P_{\omega}(f)$, $P_{\omega}(p)$ は将来, 過去事例における鉛直流の強さ毎の平均降水強度を表す. Emori et al.(2005)はこれらの式を用いて, 地球全体規模での過去将来間の年平均降水量の変化の要因を分析した.

Emori et al.(2005)では鉛直流の発生頻度は 500hPa 高度での日平均鉛直流(hPa/day)から, 鉛直流の強さ毎の平均降水量は日降水量(mm/day)から求めているが, 本研究では, 3 章で紹介した解析データの 500 hPa 高度での 1 時間毎の瞬間鉛直風速値(m/s), 1 時間降水強度(mm/hr)を使用した.

4. 結果

4.1 一地点での解析例

まずは一地点の解析の結果から, 解析の手順を示す. 一地点の解析では十勝川流域内の中心付近かつ, 今後検証を行う際のことを考え, 図 3 に示す, 北緯 42.9° 東経 143.2° に位置する気象庁アメダス帯広観測所(以降, 帯広アメダス)と同位置のデータを解析した.

図 5 は過去将来の全解析対象事例の鉛直流と降水強度の散布図である. この図から概ね, 鉛直流と降水強度には

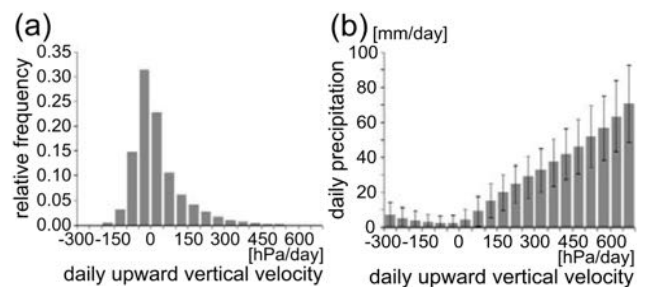


図 4. (a)各鉛直流の強さ毎の発生頻度. (b)鉛直流の強さ毎の降水量の平均値. (エラーバーは標準偏差を表す)(Emori et al. (2005)より)

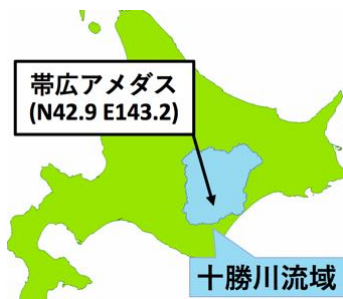


図 3. 解析対象の十勝川流域と, 一地点での解析対象の帯広アメダス.

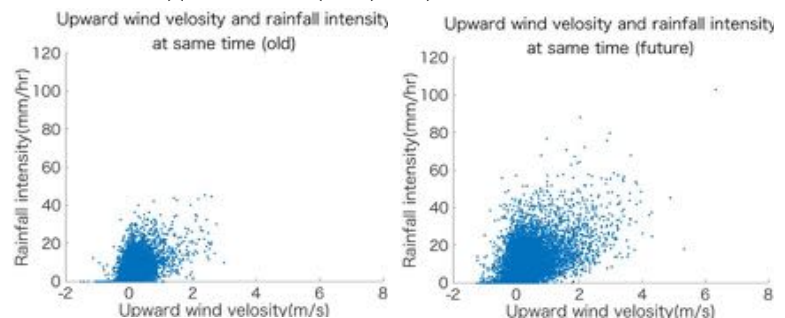


図 5. 帯広アメダス地点における, 過去将来事例の, 同 1 時間の鉛直流と降水強度の関係.

相関関係があること、将来事例では鉛直流も降水強度もより大きい値が存在することが確認できる。

図6は過去将来事例での、降水強度の発生頻度を示しており、降水強度の頻度分布からも、将来ではより大きな降水強度が発生しやすい傾向にあることが確認できる。

図7は式(3)で示した、過去と将来の各鉛直流の強さの発生頻度であり、過去将来間で小さいながらも変化があった。また、図8は式(4)で示した、過去と将来の鉛直流の強さ毎の平均降水強度と最大降水強度であり、将来事例ではより強い上昇流での降水強度の増加が確認できる。ここで、図7、8は図4(a), (b)で紹介した Emori et al.(2005)の結果と同様の特性を示した事が確認された。

そして図7、8の結果を式(2)に適応して解析を行なった。結果として帯広アメダスでは、過去将来間の平均降水強度の変化は+0.35 mm/hour, その中の力学的影響は+0.04 mm/hour, 熱力学的影響は+0.28 mm/hour, 共変項は+0.09 mm/hour であった事から、この地点では降雨は増加傾向にあり、熱力学的影響がより大きく作用していることを確認した。また共変項は全体の降水強度変化には大きく寄与していない事が確認された。3日降水量で比較すると過去事例では 105.1 mm, 将来事例では 131.4 mm であり、3日雨量は平均で約 25 mm 増加する事が確認できる。

4.2 十勝川流域の大雨事例を対象とした面的な解析

一地点での解析を確認した後に、以降は十勝川流域での大雨事例を対象とした面的な解析を行なった。図9は北海道の色別標高図¹¹⁾であり、十勝川流域西側には標高が高く南北に長く連ねる日高山脈の存在が確認できる。

図10は左から過去将来間の降水強度変化を72時間雨量に変換した結果、力学的影響、熱力学的影響である。この結果から将来の十勝川流域の大雨事例では日高山脈周辺部と北海道太平洋側の海岸沿いで降水強度の増加が見られ、特に日高山脈の東側斜面で顕著に降水量が増大し、

それは熱力学的影響の増加のみが原因であるという事を確認した。熱力学的影響は上記の地域以外でも全体的に増加傾向にある事が確認できる。逆に、日高山脈の東側斜面の力学的影響は変化しない、または逆に小さくなるなどの結果となった。力学的影響は北海道太平洋側東部の海岸沿いと、日高山脈の西側斜面の周辺部でのみ増加傾向にある事が確認できる。

図11は過去と将来の大雨事例の平均72時間降水量である。過去将来共に日高山脈周辺部と北海道太平洋側の海岸沿いで強い降水が分布しているが、将来の方が概ね大きな値を示していた。

図12は過去と将来の大雨事例の平均鉛直流である。過去将来共に日高山脈の東側斜面で目立った上昇流、西側斜面で目立った下降流が見られ、概ね同等の値を示していた。ただし、北海道太平洋側東部の海岸沿いと、日高山脈の西側斜面の周囲部で将来において上昇流が大きくなっている事が確認できる。

5. 考察

今回の結果では、過去将来事例共に日高山脈の東側斜面において上昇流、降水強度両方ともに強い値を示していたことから、十勝川流域における大雨事例が発生する多くの場合には東風により日高山脈において地形性降雨が発生している可能性が示唆された。また、過去将来共に日高山脈の東側斜面では同等程度の上昇流であるのに対して、同地域は将来において熱力学的影響により顕著に降水が増大することから、日高山脈のような風を堰き止めるような山地では、過去将来共に鉛直流が強く、将来においても同様に大きな鉛直流がある事が示唆される。その場合には地球温暖化による気温上昇により、常に強い鉛直流により供給される水蒸気量は増大し、気温上昇と比例的に山地での降水は増大する可能性が示唆された。

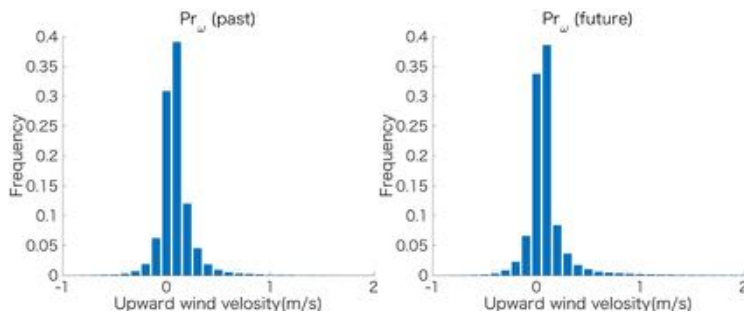


図7. 帯広アメダス地点における、過去将来事例の、各強さの鉛直流の発生頻度。

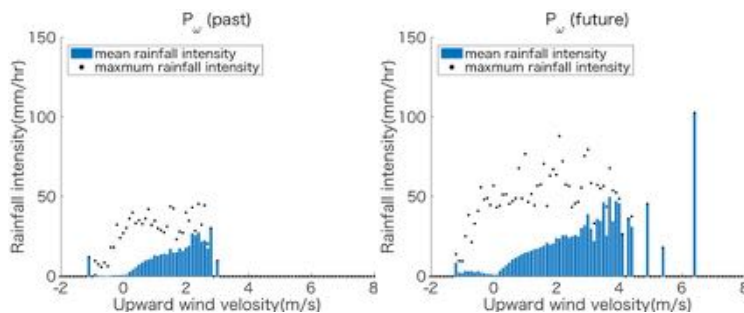


図8. 帯広アメダス地点における、過去将来事例の、鉛直流の強さ毎の平均降雨強度と最大降雨強度。

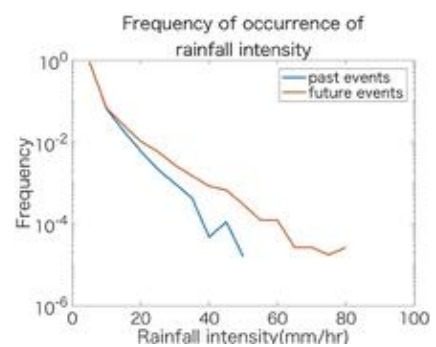


図6. 帯広アメダス地点における、過去将来事例の降雨強度の発生頻度。

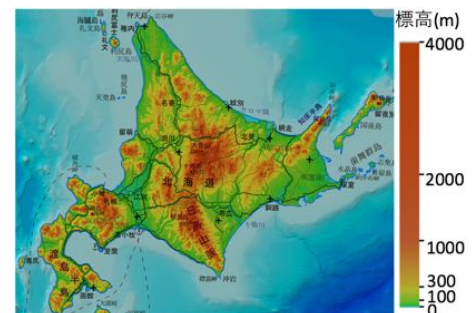


図9. 北海道の標高図（国土地理院より）

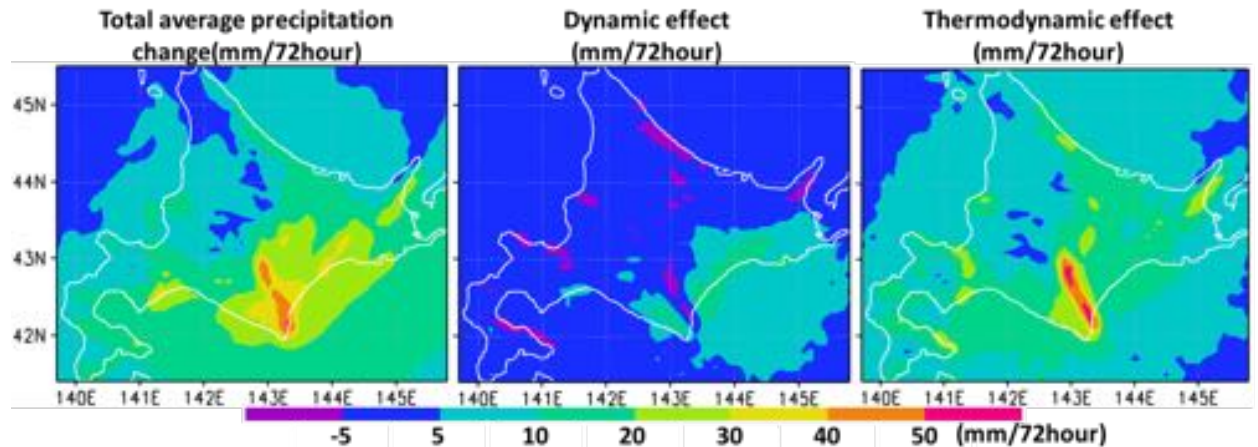


図 10. 十勝川流域の大雨事例における，過去将来間の降水強度変化を 72 時間雨量に変換した結果(左)，力学的影響(中)，熱力学的影響(右)

6. まとめ

本研究では十勝川流域における過去，将来の大雨事例間の降水強度の変化を「力学的影響」，「熱力学的影響」に分けて解析した．対象地域は将来においては特に日高山脈周辺で降雨強度が増大し，主に「熱力学的影響」が多くを占めていた事が確認された．日高山脈周辺では過去将来共に鉛直流が大きく，変化が無かったため，将来的にも同様に大きな鉛直流がある事が示唆されるが，その場合には地球温暖化による気温上昇により，常に強く吹く鉛直流により供給される水蒸気量は増大し，気温上昇と比例的に山地での降水は増大する可能性が示唆された．また，十勝川流域での大雨事例が起こる場合，東風による日高山脈における地形性降水が発生するという地域的特性がある事が示唆された．

参考文献

- 1) Intergovernmental panel on climate change: intergovernmental panel on climate change Fifth Assessment Report Climate Change 2013, 2013
- 2) 小林彩佳, 岡地寛季, グエンレズン, 山田朋人: 平成 28 年 8 月北海道豪雨の降雨特性と降雨流出の予測可能性, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 73 号, 2017
- 3) 平成 28 年 8 月北海道大雨激甚災害を踏まえた水防災対策検討委員会: 平成 28 年 8 月北海道大雨激甚災害を踏まえた水防災対策の検討について 参考資料 3, 2016
- 4) 国土交通省: 気象庁ホームページ 過去の気象データの検索 石狩地方札幌 平均値(年・月ごとの値), 2017
- 5) Emori, S. and Brown, S. J.: Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, Vol.32, 2005.
- 6) Tomohito, J. Y. and Murad, A. F., Taiki F., Masaru I., Tomonori, S., Yadu, N. P., Taikan, O.,: Extreme precipitation intensity in future climates associated with the Clausius-Clapeyron-like relationship, Hydrological Research Letters, 8(4), pp.108–113, 2014
- 7) Dzung, N. and Tomohito, J. Y.,: Simulation of tropical cyclone 201610 (Lionrock) and its remote effect on heavy rainfall in Hokkaido, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Vol.73,

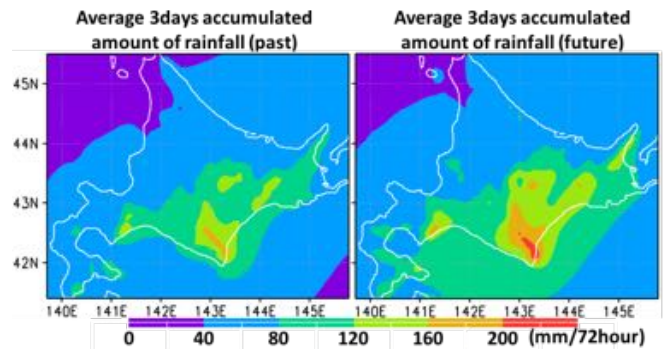


図 11. 十勝川流域の大雨事例における，過去(左)と将来(右)の平均 72 時間降水量。

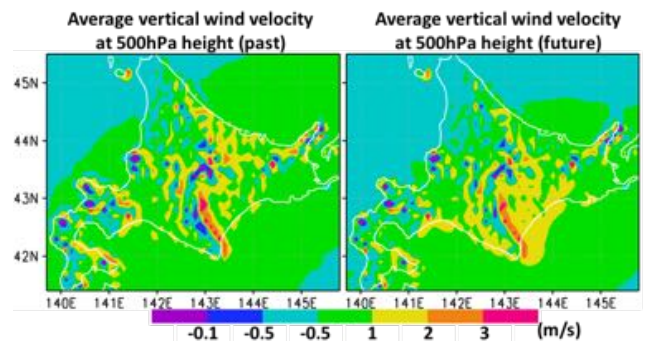


図 12. 十勝川流域の大雨事例における，過去(左)と将来(右)の平均鉛直流。

2017

- 8) 山田 正, 日比野 忠史, 荒木 隆, 中津川 誠, : 山地流域での降雨特性に関する統計的解析, 土木学会論文集, No.527/II-33, pp.1-13, 1995
- 9) 小倉義光: 一般気象学第 2 版補訂版, 東京大学出版会, p159, p208, 2016
- 10) 山田朋人, 星野剛: 第 2 回北海道における気候変動予測(水分野)技術検討委員会資料, 2017
- 11) 国土地理院: 電子国土 Web 色別標高図, <https://maps.Gsi.go.jp/development/ichiran.html>, 2017

謝辞

本研究は MEXT/SI-CAT, 科研費(2624907217)の成果の一部である。