

ハリケーン Sandy (2012) の温帯低気圧化に伴う降水強化におけるメキシコ湾流の熱力学的役割

藤原圭太、川村隆一、川野哲也 (九州大・院・理)

1. はじめに

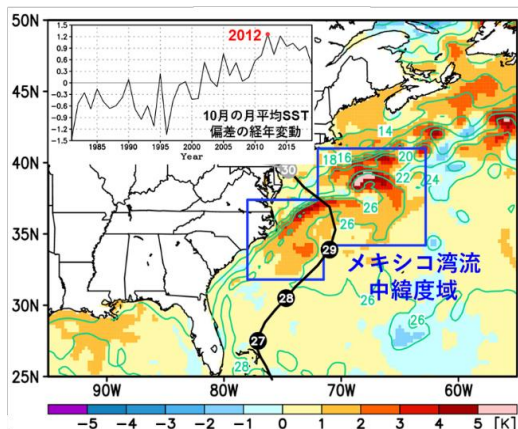


図1：2012年10月24日における海面水温 (SST) 分布 (等値線：2°C間隔) と偏差 (陰影)。ハリケーン Sandy の経路も併せて描いている。丸印は各日 0000 UTC における Sandy の位置を表す。図の左上には、メキシコ湾流中緯度域で領域平均した10月の月平均 SST の経年変動 (単位:°C) を示している。気候値は、1981年から2019年までの平均値としている。

2012年10月下旬に大西洋で発生したハリケーン Sandy は、温帯低気圧化 (温低化) に伴う大雨を北米東海岸にもたらした。北米東海岸の積算降水量は 400 mm に達し、中緯度域としては極端な雨量を記録した。この極端降水に対して先行研究では、上層擾乱と Sandy とのカップリングに着目した解析が重点的に実施されている (例えば、[1]や[2])。

一方で、当時のメキシコ湾流中緯度域では、海面水温 (SST) の過去最高値が観測されていた (図1)。Sandy の温低化時の大雨に対するメキシコ湾流の極端高温の影響を議論した研究は、意外にもほとんど存在しない。その数少ない Sandy とメキシコ湾流に関する先行研究例の中で、[3]は温低化時の前線形成に対して、[4]は温低化時の降水活動に対して、メキシコ湾流の活発な熱フラックスの重要性をそれぞれ指摘している。しかしながら、①メキシコ湾流から蒸発する水蒸気が温低化する Sandy の降雨域にどのように輸送されるのか、または、②2012年10月のメキシコ湾流の高 SST が、実際にどの程度降水の増幅や前線形成に寄与していたのか、に關

しては明らかではない。上述の研究課題の解明は、気候の変化が顕著である中緯度域における、熱帯低気圧の温低化と暖流との関係性、その結果生じる極端事象のメカニズムの更なる理解に貢献できるだろう。

本研究では、課題①および②を調査するために、領域雲解像モデル (CReSS) を用いた水平解像度約 4 km の高解像度数値実験を実施する。

2. 実験設定

計算領域は、北西大西洋の東西約 5500 km、南北約 4700 km の範囲である。計算期間は、2012年10月24日 0000 UTC から30日 1200 UTC までとした。大気の初期値・境界値には、気象庁 GSM/GPV の6時間値を使用した。モデルの SST には、NOAA OISST v2 の日平均値を与えた。なお、SST 分布は初期値固定としている。

上述の実験設定に基づく標準実験 (CTL run) に加えて、SST 改変実験を併せて実施した。SST 改変実験では、図1の青枠で示されているメキシコ湾流中緯度域の SST 偏差を取り除き、SST 気候値を与える (CLM run)。その他の海域の SST や計算条件は CTL run と同一である。

3. 降水量の変化

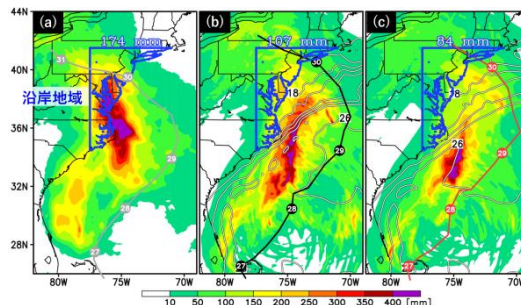


図2：2012年10月27日 0000 UTC から30日 0000 UTC の期間で時間積算した降水量分布。(a) は GSMaP の観測値、(b) は CTL run、(c) は CLM run のシミュレーション結果である。図中には、Sandy のベストトラックと再現経路を併せて描いている。図2bと図2cには SST 分布も等値線で示している。また、青枠で囲まれた陸域は本研究で定義した沿岸地域である。

CTL run と CLM run の Sandy の再現経路に大きな違いは生じなかったが、沿岸地域の降水量の差は顕著である (図 2)。CTL run は、ベストトラックと較べて、やや北寄りにハリケーンの経路をシミュレートしていたため、沿岸地域の降水量 (107 mm) は GSMaP (174 mm) より過小評価している。しかし、CLM run の沿岸地域の降水量 (84 mm) と比較すると、約 27% の雨量増加が確認された。

次に、図 2 の降水量変化を理解するために、Sandy 西縁域の降水と前線構造の時間発展を比較する。CTL run では、27 日から 29 日かけて、Sandy 西側の降水強化が非常に顕著である (図 3a-c)。この特徴は、降水観測からも得られている (図略)。さらに、同期間において、対流圏下層の温位水平勾配 ($|\nabla\theta|$: 下層フロント) も増大している (図 3d-f)。一方で、CLM run では Sandy 西側の降水 (図 3g-i) および下層フロント (図 3j-l) の強化が、CTL run と較べて、抑制されている。29 日 0000 UTC における $|\nabla\theta|$ の最大値は、CTL run では 54 K/100 km、CLM run では 33 K/100 km である。このような Sandy 西縁域の対流圏下層の前線形成の違いが、沿岸地域の降水量の差として反映されたと考えられる。

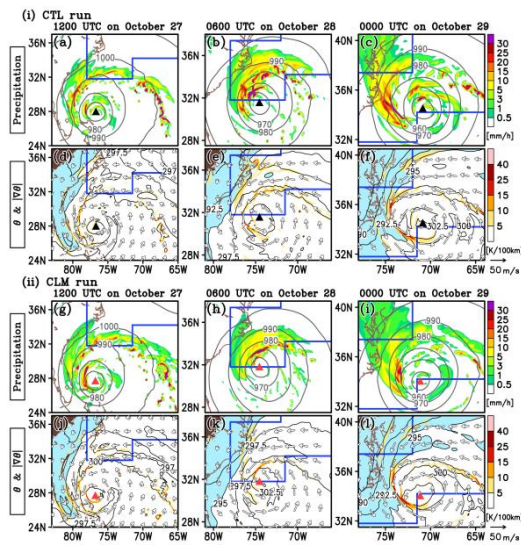


図 3: (a-c) CTL run の 2012 年 10 月 27 日 1200UTC、28 日 0600 UTC、29 日 0000 UTC における 1 時間降水量 (陰影) と SLP (等値線: 10 hPa 間隔)。三角印は Sandy の位置、青枠は CLM run の SST 変化領域を表す。(d-f) (a-c) と同様であるが、高度 500 m における温位水平勾配 (陰影)、温位 (等値線: 2.5 K 間隔)、水平風 (ベクトル)。水色の領域は温位が 295 K 未満の領域を表す。(g-i) (a-f) と同様であるが、CLM run の結果。

4. 前線構造の変化

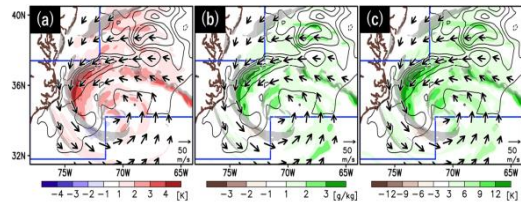


図 4: 10 月 29 日 0000 UTC における (a) 温位、(b) 水蒸気混合比、(c) 相当温位の差 (いずれも CTL run minus CLM run)。CTL run における高度 500 m の水平風 (ベクトル) と温位水平勾配が 5 K/100 km を超える領域 (灰色の陰影) を併せて描いている。黒の等値線は CTL run と CLM run の SST 差 (1°C 間隔)、青枠は CLM run における SST 変化領域を表す。

CTL run と CLM run における前線形成の違いの原因を調査するために、大気境界層内の熱力学的物理量 (温位、水蒸気混合比、相当温位) を、図 4 にて比較する。CTL run と CLM run の差は、Sandy 本体の循環に沿って SST 偏差の極大域から下層フロントの領域にて明瞭である。CTL run の SST 高温偏差に伴う活発な潜熱・顕熱供給は、下層フロント周辺に温暖かつ湿潤な領域を形成する (図 4a と 4b)。それらは、同領域における地表面付近の相当温位の増加に寄与している (図 4c)。

図 5 は、両実験の前線構造の東西鉛直断面図を示している。前線の鉛直構造は、CTL run と CLM run のそれぞれの下層フロントの周辺で南北平均をしている。CTL run では、メキシコ湾流中緯度域の高 SST により形成された温暖な空気が前線面に沿って滑昇することで、高度 4 km 付近にまで $|\nabla\theta|$ の顕著な領域が明瞭である (図 5a)。CTL run の水蒸気混合比と相当温位に関しても、下層フロント東側の大気境界層内と前線面に沿って、やはり湿潤な領域が形成されている (図 5f と 5i)。その結果、対流圏下層から中層にかけて CTL run の対流不安定は顕著となっている。一方で、CLM run における前線構造は対流圏下層に限定されており、顕著な対流不安定の領域は対流圏中層では不明瞭である。

また、 $|\nabla\theta|$ の差に注目すると、差のピークは高度 500 m 付近と高度 3 km 付近に現れている。対流圏下層における $|\nabla\theta|$ の差は、図 3 の下層フロントの強度の違いを反映している。CLM run における下層フロントの弱体化については、図 4a にあるようにメキシコ湾流の高 SST に伴う高温領域の形成の有無が原

因の一つであると思われる。

一方で、高度 3 km の $|\nabla\theta|$ の違いは何を表しているのだろうか。図 6 は、図 5 と同じ東西鉛直断面図であるが、描画している物理量は、 $|\nabla\theta|$ と雲水・雲氷混合比の和である。CTL run では、40 K/100 km を超える $|\nabla\theta|$ の極大が地表面付近に存在することに加えて、高度 3 km 付近にも 15 K/100 km 程度の $|\nabla\theta|$ の極大が現れている (図 6a)。CLM run では、図 5 で示したように、対流圏中層に前線構造は確認されない (図 6b)。つまり、CTL run では、CLM run とは異なり、対流圏下層と中層に明瞭な前線構造 (下層フロントと中層フロント) を持つという二重構造となっている。

この前線の二重構造は、雲水・雨水混合比の極大と良い対応がみられる。CTL run の雲水・雨水混合比は、下層フロントに伴う強い上昇流の場所 ($X = 0$ 付近) と中層フロント周辺の比較的強い上昇流の場所 ($X = -1$ 付近) で大きな値を示している (図 6a)。実際、CTL run においてシミュレートされていた Sandy 西縁域に広範囲に分布する強い降水量は、下層フロントと中層フロントの位置と一致する (図略)。一方で、CLM run では、雲水・雨水混合比の明瞭な極大は下層フロントのみに現れており (図 6b)、降水量の分布においても、下層フロントの西側への降水の広がり是非常に不明瞭であった。

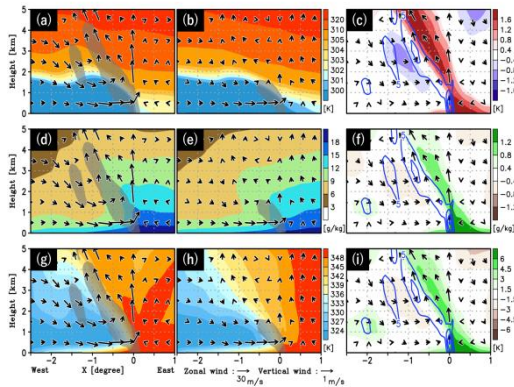


図 5 : (a-c) 10月29日0000 UTCにおける温度 (陰影) と東西-鉛直合成風 (ベクトル) の東西高度断面図。(a) は CTL run, (b) は CLM run の結果である。灰色の陰影は、温度水平勾配が 10 K/100 km を超える領域を表す。各種物理量は、各数値実験の下層フロント周辺で南北平均している。 $X=0$ が下層フロントの軸の位置を示している。(c) は両実験間の温度差 (陰影)、温度水平勾配差 (等値線: 5K/100 km 間隔)、ベクトル差 (いずれも CTL run minus CLM run)。(5d-e) (5a-c) と同様であるが、陰影は水蒸気混合比を表す。(5g-i) (5a-c) と同様である

が、陰影は相当温位を表す。

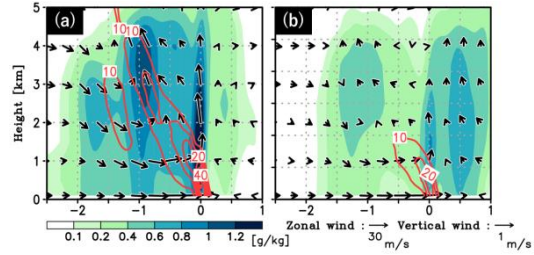


図 6 : 10月29日0000 UTC時点の (a) CTL run と (b) CLM run における下層フロント周辺の雲水・雲氷混合比 (陰影)、温度水平勾配 (等値線: 5 K/100 km)、東西鉛直合成風 (ベクトル) の東西断面図。 $X=0$ が下層フロントの軸の位置を表す。

したがって、北米東海岸に極端降水をもたらした Sandy 西側の降水域の形成には、下層フロントと中層フロントの二重構造が重要であることが強く示唆される。次節では、CTL run における前線の二重構造の発現とメキシコ湾流の高 SST の関係について後方流跡線解析を用いて議論する。

5. 後方流跡線解析

後方流跡線解析では、下層フロントと中層フロントの降水域を形成する空気塊に注目し、10月29日0000 UTCから28日1200 UTCまで積分を実施した。下層 (中層) フロントの空気塊は、下層 (中層) フロントにおける潜熱加熱の極大高度である 1,500 m (4,500 m) において、水蒸気凝結に起因する潜熱加熱率が 36 K/h を超えるグリッドに配置した (それぞれ、図 7a の青枠内と 7b の緑枠内)。

下層フロントおよび中層フロントに流入する空気塊の経路は、二つに分類することが出来る (図 7c と 7d)。一つは、Sandy 本体に沿って反時計回りに移動する経路である (全体の約 70%弱、経路 B と経路 B')。もう一つは、Sandy の東方からメキシコ湾流上の 26°C を超える高 SST の海域を経由して、Sandy 西側の前線帯へ流入する経路である (全体の約 30%強、経路 A と経路 A')。経路 B と B' の空気塊は、Sandy の内部に起源をもっており、はじめから非常に温暖湿潤な状態であった。そのため、経路 B と B' の空気塊は、経路直下の海洋からの熱・水蒸気供給の影響をほとんど受けずに、変質が不明瞭であることが、空気塊の変質過程の調査で明らかとなった (図略)。一方で、経路 A と経路 A' の空気塊は、乾燥した状態でメキシコ湾流上の大

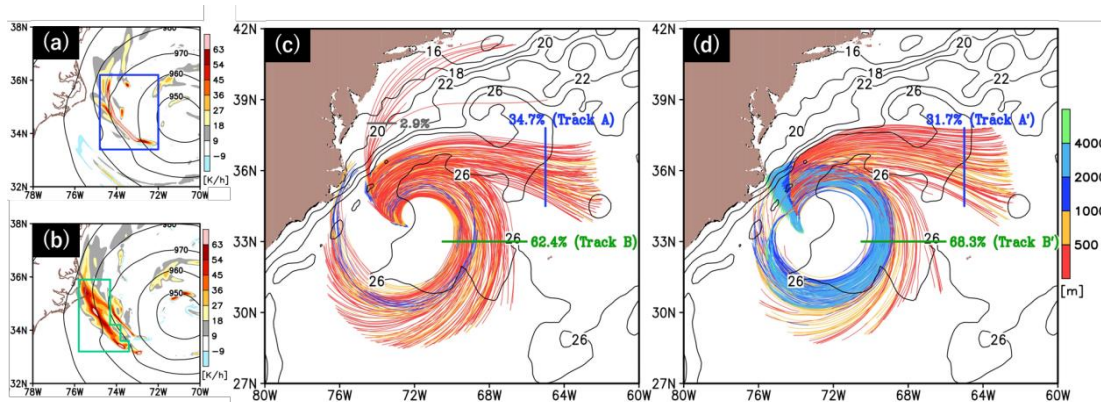


図 7: CTL run でシミュレートされた 10 月 29 日 0000 UTC の (a) 高度 1,500 m と (b) 高度 4,500 m における潜熱加熱率 (陰影) と SLP (等値線: 10 hPa)。図 a の青枠と図 b の緑枠内の潜熱加熱率が 36 K/h を超える領域に空気塊を配置している。(c) 下層フロントと (d) 中層フロントにおける降水域に流入する空気塊の後方流跡線。流跡線の色は空気塊の高度を表す。また、SST 分布を等値線で併せて描いている。

気境界層内を移動するため、暖流からの多量の熱・水蒸気供給の影響を受け、空気塊の顕著な変質が生じていた。

CLM run の下層フロントの空気塊に対して実施した後方流跡線解析においても、経路 A と経路 B の空気塊の挙動は確認された。両実験における経路 A と経路 B の空気塊の変質過程をそれぞれ比較すると、メキシコ湾流上の地表面付近を吹送する経路 A の空気塊において、水蒸気混合比や温位などの値に顕著な差が生じていた。後方流跡線解析の結果は、Sandy 東方起源の空気塊の変質の違いが、Sandy 西側の前線構造の強化・維持に重要であることを示している。

6. まとめ

本研究では、2012 年 10 月のハリケーン Sandy がもたらした北米東海岸の大雨イベントに対するメキシコ湾流の極端高温の影響を調査した。CTL run と SST 改変実験を比較すると、当時のメキシコ湾流の高温偏差は、北米東海岸の降水を約 27%増幅させていたことが明らかとなった。この降水量の増加は、Sandy 西縁域の前線構造に起因するものである。CTL run でシミュレートされた Sandy は、熱低の温低化時に注目される下層フロントに加えて、対流圏中層にも明瞭な前線構造を有していた。この前線の二重構造が、Sandy 西側において強い降水域を広範囲に形成することで、北米東海岸の降水量の増大に寄与したと考えられる。さらに CTL run と CLM run の後方流跡線解析の比較では、Sandy 西

縁域の降水域に流入する 2 種類の空気塊のうち、Sandy 東方から輸送される空気塊がメキシコ湾流の熱・水蒸気供給の影響を強く受けており、CLM run ではそれが顕著に抑制されていたことを示した。この空気塊の割合が約 30%強を占めていたことが、温低化時の Sandy の大雨活動に対するメキシコ湾流の影響を増幅させたと思われる。

また、本稿では紙面の都合上省略したが、Sandy 東方からの乾燥空気の輸送には、カナダ東方のブロッキング高気圧の発達と先行する温帯低気圧の存在が重要となることが、筆者らが併せて実施した総観場の解析および前方流跡線解析から示唆されている。つまり、温低化時の Sandy の極端降水は、先行研究で指摘されていた大陸上の上層トラフに加えて、当時のメキシコ湾流の極端な高 SST と前述の複雑な総観場という条件が重なった結果生じた可能性がある。

今後は、メキシコ湾流の SST 偏差が負に大きく振れていた 1980 年・1990 年代の SST を与えて、今世紀における中緯度海洋の高温化が、Sandy の降雨強度に既にどの程度の影響を与えていたのかを調査する予定である。

参考文献

- [1] Fu et al., 2015. *Journal of Ocean University of China*, **14**, 783-794.
- [2] Kowaleski and Evans, 2016. *Monthly Weather Review*, **144**, 3825-3846.
- [3] Galareau et al., 2013. *Monthly Weather Review*, **141**, 4296-4321.
- [4] Varlas et al., 2019. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **131**, 443-453.