

# 温低化に伴う Sandy (2012) の降水強化に及ぼすメキシコ湾流の影響

藤原圭太, 川村隆一, 川野哲也 (九州大)

## 1. はじめに

2012年10月下旬に北米東海岸の都市では、ハリケーン Sandy による甚大な浸水被害が発生した。その主要因は高潮であると報告されている (Blake et al. 2013)。また、10月28日から29日にかけて Sandy は温帯低気圧化(温低化)しており、その影響で Sandy 西縁域では降水活動が特に強まっていた。2日間(10月28日から29日)の積算降水量は300mmを超えているため(図1)、高潮に加えて大雨も浸水被害を助長したと考えられる。

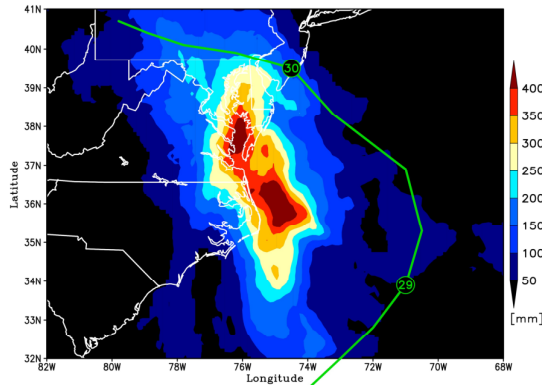


図1. 衛星全球降水マップ(GSMaP)から得られた2012年10月28日から29日の積算降水量。緑線は National Hurricane Center(NHC)に基づく Sandy(2012)の経路である。

Sandy の温低化に関しては、上層擾乱とのカップリングの影響が重点的に調査されている (e.g., Galarnau et al., 2013; Munsell & Zhang, 2014; Kowaleski & Evans, 2018)。実際、温低化時の環境場は北米大陸上に深いトラフが確認できると同時に、高 PV 領域が Sandy 後面に向けて楔状に流入していた(図2)。それ故、この上層擾乱による上昇流の励起が、極端降水に重要であったと考えられている。しかし、極端降水が生じている期間のメキシコ湾流に注目すると、冬季平均値(500 W/m<sup>2</sup>)に匹敵する海面潜熱フラックスが観測されている(図3)。しかしながら、メキシコ湾流からの水蒸気供給の影響は未解明である。そこで、本研究では、Sandy (2012)によりもたらされた北米東海岸の極端降水の発現・増幅に対するメキシコ湾流の影響を調査することを目的とする。この課題に取

り組むために、領域雲解像モデルによる高解像度シミュレーションを実施した。

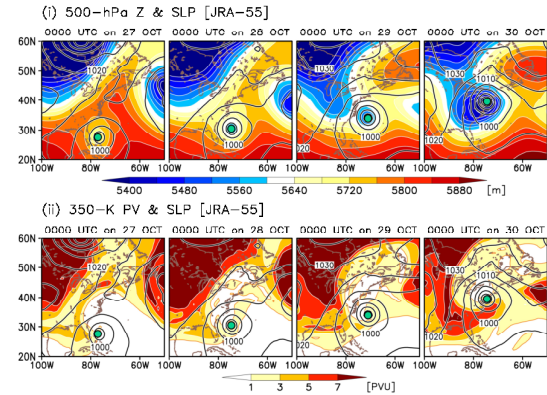


図2. 気象庁再解析データ(JRA-55)に基づく(i) Z500(陰影)とSLP(等値線)、(ii) 350 K 等温位面での PV(陰影)とSLP(等値線)。

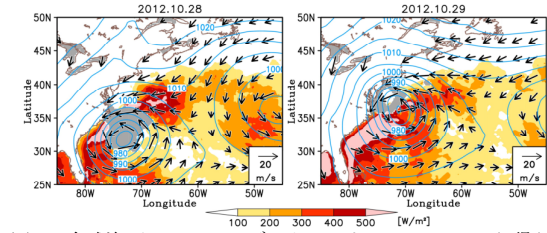


図3. 全球海面フラックスデータセット(J-OFURO3)から得られた日平均海面潜熱フラックス(陰影)と海上風(ベクトル)。JRA-55の日平均SLP(等値線)も併せて描いている。

## 2. 実験設定

Sandy の数値実験には、領域雲解像モデル Cloud Resolving Storm Simulator (CRSS; Tsuboki and Sakakibara 2002) を使用した。計算領域は北西大西洋域(図3aの領域)、水平解像度は0.04°に設定した。大気の初期値・境界値には気象庁 GSM, 海面水温には NCEP OISST V2 を与えた。計算期間は、2012年10月24日00UTC - 31日12UTCとした。

## 3 結果

CRSSにおけるSandyの経路は、上陸直前に北寄りに再現されている(図4a)。温低化時の強度は過発達傾向にあるが、28日以降の強化は再現できている(図4b)。また、衛星観測では、29日頃にメキシコ湾流上に位置するSandy西縁域の対流・降水活動が強化されている様子が見られているが、CRSSでも基本的な特徴は捉えられている(図5)。

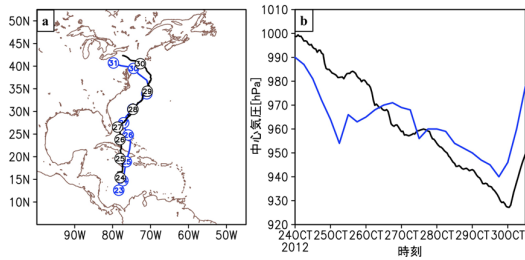


図 4. Sandy(2012)の(a)経路と(b)強度変化. 青線はNHCのベストトラックデータ, 黒線はCReSSの結果である.

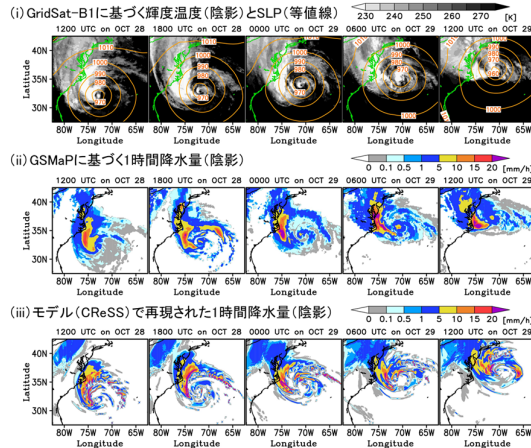


図 5. 観測から得られた(i)輝度温度, (ii)1時間降水量と(iii)CReSSで再現された1時間降水量の空間分布図.

### 3-1. 温低化時の Sandy の前線構造について

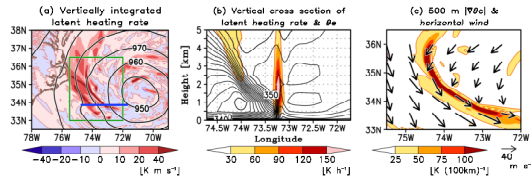


図 6. (a) 29日00UTCにおける鉛直積算潜熱加熱率(陰影)とSLP等値線の分布図. (b) 鉛直積算潜熱加熱率が最大となる地点の潜熱加熱率(陰影)と相当温位(等値線)の高度-経度断面図(図6aの青線). (c) Sandy西縁域(図6aの緑枠内)の高度500mにおける相当温位の水平勾配(陰影)と水平風(ベクトル).

ここでは Sandy 西縁域の降水が特に強まった 29日00UTCに注目する. このとき, Sandy 西縁域において鉛直積算潜熱加熱率が最大を示す地点では, 相当温位が西側へ傾いており, 高度500m付近の寒冷な空気が潜熱解放の活発な領域の直下に楔状に流入する様子が確認できた(図6b). また相当温位勾配も100K/kmを超えており, 非常に明瞭な前線構造を有している(図6c).

そこで, 前線形成に寄与すると考えられる2種類の空気塊に注目して後方流跡線解析を実施した. 空気塊は, 『①高度500mに

おける相当温位勾配の顕著な領域の西側約20-40kmの範囲』と『②Sandy西縁降水域の高度1.5kmにおける潜熱加熱率が30K/hを超える領域』に配置した. 後方流跡線解析の積分期間は29日00UTCから27日12UTCである. 空気塊①は, カナダ東方の高緯度からメキシコ湾流を避けるように Sandy の西側前線帯の寒気側に流入している(図7). 西側前線帯の降水形成に寄与する空気塊②のうち, 約48%が Sandy 本体に沿った経路を取り, 約32%が Sandy の東側で屈曲し, Sandy 北側の大気境界層内を経由していた(図8). 空気塊②の后者は, ちょうどメキシコ湾流の海面蒸発が活発な領域を通過しており, 強い気団変質を受けていることが予想されるため, その変質過程を詳細に調査した.

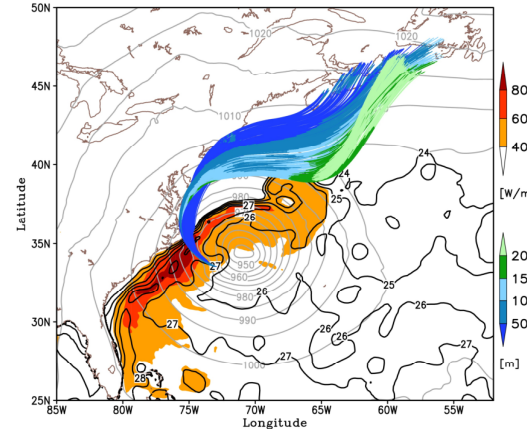


図 7. Sandy 西縁前線帯の寒気側に位置する空気塊①の後方流跡線解析の結果. 流跡線の色(青-緑系統)は空気塊の高度を表す. また, 29日00UTCのSLP(灰色の等値線), 流跡線解析の積分期間で時間平均した潜熱フラックス(陰影), モデルに与えた海面水温分布(黒色の等値線)も併せて描いている.

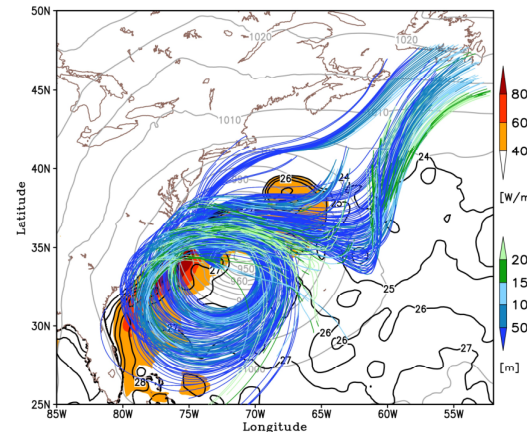


図 8. 図7と同様であるが, Sandy 西縁前線帯の降水形成に寄与する空気塊②に対する後方流跡線解析の結果.

### 3-2. Sandy 北側を吹送する気流について

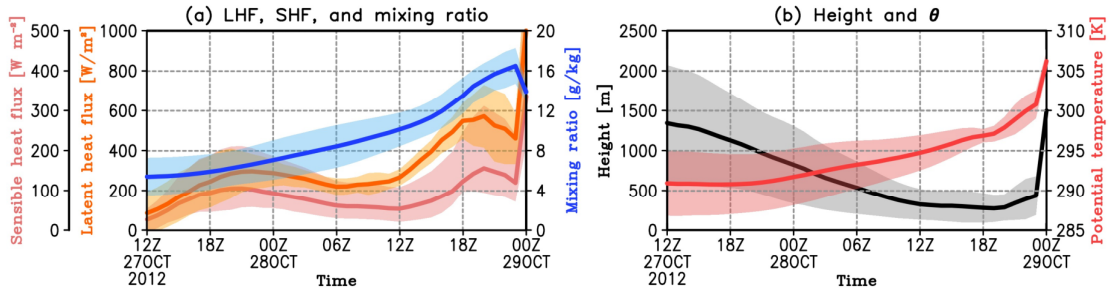


図9. 空気塊②のうち Sandy 北側を吹送する空気塊の変質過程。(a)は潜熱フラックス(LHF; 橙線), 顕熱フラックス(SHF; 薄赤線), 混合比(青線), (b)は高度(黒線), 温位(赤線)の時間的推移を表す. 太線は注目している空気塊の平均値, 陰影は $\pm 1\sigma$ の範囲を示す.

Sandy の北側の大気境界層内を経由する空気塊の変質過程を図9に示す. 空気塊の平均高度は, はじめ高度 1.5 km 付近にあったが, メキシコ湾流上を吹送するとき (特に 28 日 12 UTC 以降) は, 高度 500 m 以下の非常に低い高度をとっている. そのとき, 空気塊直下の平均海面潜熱フラックスは  $600 W m^{-2}$  に迫っており, メキシコ湾流から蒸発する多量の水蒸気が空気塊へ供給されていることが示唆される. 実際, 空気塊の平均混合比は Sandy 西縁前線帯に流入する前 12 時間の間で約  $7 g/kg$  も増加している. 後方流跡線解析の積分期間 (36 時間) における平均混合比の増加量が約  $10 g/kg$  であることから, メキシコ湾流からの水蒸気供給が空気塊の湿潤化に大きな影響を及ぼしていることが読み取れる. その後, 湿潤空気塊は前線帯の上昇流に捕捉される際に, 混合比を減少させると同時に温位を増加させており, 活発な潜熱解放 (水蒸気凝結) を誘起していることを表している. 以上の後方流跡線解析の結

果から, Sandy の北東側から屈曲して西縁前線帯へ流入する空気塊は, メキシコ湾流から多量の水蒸気供給により湿潤化し, 極端降水の増幅に寄与することが示唆された.

では, 図8と図9で見られた Sandy 北側における気流構造の正体は何であろうか. 図10は, 10月28日の風速と潜熱フラックスの分布図を表す. 温低化時の Sandy は後面と北側に風速の極大域を有しており, その直下のメキシコ湾流では海面蒸発が非常に活発である. そのような特徴は Sandy が強まるにつれてより明瞭になっている. 次に Sandy 北側の気流の3次元構造を調査するために, 風速の極大域付近の高度-緯度断面図を図11に示す. 図11は, 図10の赤線に沿った断面図である. 大気境界層内に風速  $40 m/s$  を超える非常に強い東風が確認できる. その周辺の相当温位には, 緩やかに寒気側に傾斜する構造が見られる. また, その相当温位の勾配に沿って, 南風が滑昇している. 以上の特徴は温帯低気圧における温暖前線のそれ

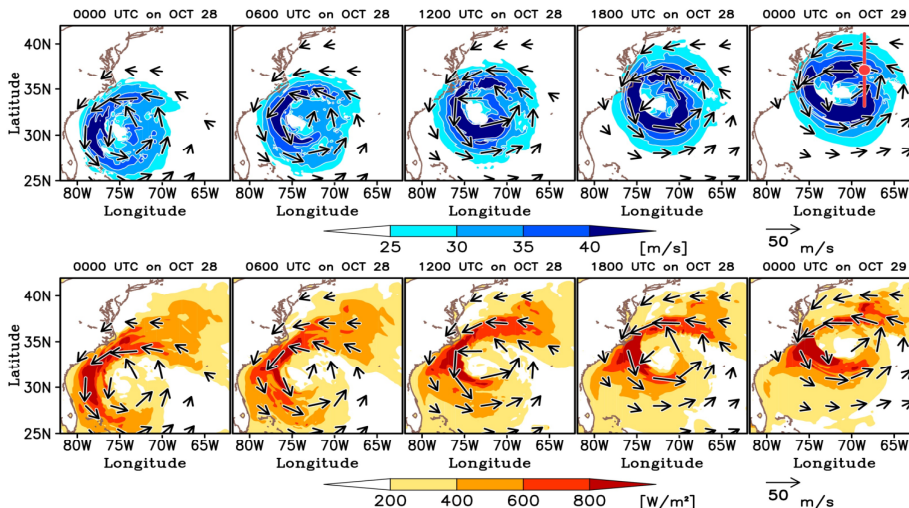


図10. (上段) 高度 500-m における水平風速(陰影)と水平風ベクトル(ベクトル). 赤丸は高度 500-m の水平風速の極大位置を表す. (下段) 海面潜熱フラックス(陰影) 水平風ベクトル(上段・下段:ベクトル).

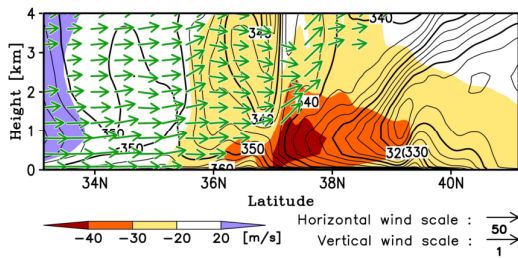


図 11. 29 日 00UTC における緯度—高度断面図. 陰影は東西風速 (暖色系: 東風, 寒色系: 西風), 等値線は相当温位, ベクトルは南北風と鉛直流の合成ベクトルを表す. 南北風の大きさが 30 m/s 未満は描いていない. この断面図は, 図 10 の赤線に沿って作成している.

と矛盾しない. 温暖前線面の直下を吹送する強い東風は, 温帯低気圧のシャピロ・カイザーモデルにおける寒冷コンベヤーベルト (Cold Conveyor Belt; CCB) との類似点も多い. しかし, Sandy の東風の極大が前線面の南側に位置しているなど, 典型的な CCB とは異なる特徴もみられ, Sandy の北象限における下層東風が温帯低気圧の CCB に相当するかは, 慎重に判断する必要がある.

#### 4. まとめ

2010 年 10 月下旬に北米東海岸では, 温帯低気圧化するハリケーン Sandy に伴う極端降水が生じた. 先行研究では, 上層擾乱の影響が重点的に調査されているが, メキシコ湾流の海面蒸発は冬季平均値に匹敵するほど強かった. それゆえ, 北米東海岸の極端降水の発現・増幅の議論にメキシコ湾流からの水蒸気供給の影響を加える必要がある.

領域雲解像モデルによる数値シミュレーションでは, ハリケーン Sandy の経路や強度変化は観測と整合的であった. また, 衛星観測で確認された Sandy 西縁域における降水活動の強化も, モデルは捉えていた. 降水が特に強まり始めた 29 日 00 UTC では, Sandy の西縁域に明瞭な前線構造が確認できた.

そこで, 前線の寒気側に位置する空気塊と前線での降水形成に寄与する空気塊に注目して後方流跡線解析を実施した. その結果, 寒気側の空気塊はカナダ東方に起源を持ち, メキシコ湾流を避けるように移動していた. 一方で, 降水形成に寄与する空気塊は約 48% が Sandy 本体に沿った経路をとり, 約 32% が Sandy の東側で屈曲し, Sandy 北側の大気境界層内を経由していた. 特に Sandy

北側を吹送する空気塊はメキシコ湾流からの多量の水蒸気供給による気団変質を受け湿潤化し, Sandy 西縁前線帯での降水活動を強化していることが示唆された.

後方流跡線解析でみられた Sandy 北側の気流について詳細に解析を実施した. Sandy の温低化に伴って北側の東風が顕著に強化されると同時に, その直下のメキシコ湾流では海面蒸発が増大していた. さらに, その東風は大気境界層内に風速の極大を有しており, ちょうど温暖前線面の直下を吹送していた. これらの特徴は, 温帯低気圧における寒冷コンベヤーベルトと共通点も多い. つまり, Sandy の温帯低気圧化時に生じた寒冷な下層東風が, メキシコ湾流での海面蒸発を強化し, Sandy 西縁域へ多量の水蒸気を輸送したことで, 北米東海岸の極端降水の増幅に寄与したと考えられる.

今後は, 複数の感度実験 (潜熱フラックス改変実験や SST 改変実験) を用いて, 極端降水に対するメキシコ湾流の影響を定量的に評価すると同時に, メキシコ湾流がハリケーン Sandy の温帯低気圧化に伴う構造変化に与える影響も調査する予定である.

#### 謝辞

異常気象研究会 2019 の参加にあたり, 京都大学防災研究所から旅費の補助を受けました. この場を借りてお礼申し上げます. また, 質問やコメント等を寄せていただいた皆様に感謝申し上げます.

#### 参考文献

- Blake et al. (2013), Tech. Rep. AL182012, NOAA/National Hurricane Center, 157 pp.
- Galarneau et al. (2013), *Monthly Weather Review*, **141**, 4296-4321.
- Kowaleski, A. M., and Evans, J. (2018), *Monthly Weather Review*, **146**(12), 4279-4302.
- Munsell, E. B., and Zhang, E. Q. (2014), *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **6**, 38-58.
- Tsuboki, K., and Sakakibara, A. *High Performance Computing*, H.P.Zima et al., Eds., Springer, 243-259.
- Tsuboki, K., and Sakakibara, A. (2007), HyARC, Nagoya University, Japan, and UNESCO, 273 pp.