

CReSS-NHOES を用いた爆弾低気圧の再現実験—中緯度海洋が低気圧発達へ与える影響

平田英隆・川村隆一（九大院・理）・加藤雅也・篠田太郎（名大・地球水循環）

1.はじめに

東アジアは急速に発達する温帯低気圧（爆弾低気圧）の頻発域のひとつである。爆弾低気圧は強風、大雨・大雪、高波を引き起こすことによって、寒候期の日本の人間活動、ライフライン、農業生産などへ影響を与える。そのため、爆弾低気圧の発生・発達メカニズムの適切な理解は重要である。

多くの先行研究は温帯低気圧の急発達には傾圧不安定のみならず水蒸気の凝結に伴う潜熱解放の効果も重要であることを指摘している（e.g., Kuo et al., 1991; Reed et al., 1993; Kuwano-Yoshida and Asuma, 2008）。また、複数の研究は低気圧発達中に西岸境界流（e.g., 黒潮/黒潮続流, メキシコ湾流）から大気へ供給される熱・水蒸気が大気安定度の低下や低気圧システム中での潜熱加熱の増加を介して温帯低気圧の発達を促進していることを指摘している（e.g., Nuss and Kamikawa, 1990; Takayabu et al., 1995; Takano, 2002）。気候学的な観点から、北西太平洋域において爆弾低気圧の発達経路が黒潮/黒潮続流域に集中する傾向があることから、温帯低気圧の急発達に対する暖流の効果の重要性が指摘されている（Chen et al., 1992; Yoshiike and Kawamura, 2009; Iizuka et al., 2013）。このように、複数の研究において暖流域から蒸発した水蒸気が温帯低気圧の急発達へ寄与することが指摘されているが、どのようにその水蒸気が低気圧中心近傍へ流入し、そして潜熱解放することで低気圧の発達を促進しているのかはいまだ未解明な部分が多い。その原因のひとつとして、観測の制約もあり低気圧中心近傍付近のメソ構造の理解が不十分であることが考えられる。

そこで本研究の目的は、(1) 黒潮/黒潮続流域から蒸発した水蒸気が温帯低気圧の急発達

に対してどのような働きをするのかを調査すること、(2) 低気圧システム（Warm/Cold Conveyor Belt や地表付近の前線構造など）と関連して、その水蒸気がどのように低気圧中心付近へ輸送され潜熱解放を誘起するのかを明らかにすることである。本研究では、日本周辺において近年で最も急発達した 2013 年 1 月中旬の事例に注目した。この低気圧は日本の南岸を移動し、黒潮続流域で急発達した事例である。

2.モデルの設定と再現性

爆弾低気圧のシミュレーションに非静力学大気-海洋-波浪結合モデル、Cloud Resolving Storm Simulator (CReSS)-Non-Hydrostatic Ocean model for the Earth Simulator (NHOES) を用いた。この結合モデルは、雲解像度モデル CReSS (Tsuboki and Skakibara, 2002; Tsuboki and Skakibara, 2007)、非静力学海洋モデル NHOES (Aiki et al., 2006; Aiki et al., 2011)、波浪モデル (Donelan et al., 2012) から構成されている。計算領域は 110°E - 179.3°E , 12°N - 60°N 、水平解像度は緯度 0.05° $\times$ 経度 0.05° である。初期時刻は低気圧が最大発達率を示す約 2 日前の 2013 年 1 月 12 日 12UTC とした。鉛直層数は大気側が 45 層、海洋側は 100 層である。初期値・境界値データは大気側に気象庁提供の Global Spectral Model (Japan Meteorological Agency, 2013) のデータ、海洋側には JAMSTEC 提供の Japan Coastal Ocean Predictability Experiment 2 (JCOPE 2) (Miyazawa et al., 2009) を使用している。また、Donelan et al. (2012) の波浪モデルを CReSS と NHOES に結合することで波浪による海面粗度の変動などを考慮している。

CReSS-NHOES によるシミュレーション結果

は対象とした低気圧の発生初期から成熟期までの海面更正気圧 (SLP) の空間分布をよく再現している (図略). 経路や発達率に関しては再解析データと比較すると若干のずれがあるが, 低気圧の基本的な特徴を良く再現していることから, シミュレーション結果を詳細に解析することで暖流からの水蒸気供給が温帯低気圧の発達へ与える影響について調査する.

3.再現された爆弾低気圧の発達要因

図 1a は最大発達率の時刻 (2013 年 1 月 14 日 15UTC), その 15 時間前 (2013 年 1 月 14 日 00UTC) と 30 時間前 (2013 年 1 月 13 日 09UTC) における 320-K 面のエルテルの渦位, 鉛直積分した水蒸気フラックスと SLP を示す. 発達初期から最大発達率に達した時刻にかけて, 高渦位を伴う対流圏上層のトラフが下層低気圧へ西側から接近しているのが上層擾乱と下層低気圧のカップリング発達 (e.g., Hoskins et al., 1985) がこの低気圧の発達要因の 1 つになったと考えられる. また, 低気圧発達期間中には南方から低気圧へ向かう

水蒸気フラックスが卓越している. 水蒸気の凝結による潜熱解放は低気圧の急発達に影響を与えるので (e.g., Kuo et al. 1991), これらの水蒸気移流の効果も本低気圧の急発達の一因になったと考えられる.

図 1b は海面からの潜熱フラックス, 10-m 水平風と SLP を示している. 低気圧が発達している間, 黒潮/黒潮続流から大気へ多量の水蒸気供給が生じている. 最大発達率の時刻には, 低気圧の北西象限で水平気圧傾度が大きく, 地表風が極端に強まる. この領域に対応して潜熱フラックスが局所的に増加している. また低気圧の発達に伴い, 低気圧の北象限では cold conveyor belt (CCB) (e.g., Schultz, 2001) と呼ばれる寒冷かつ乾燥した東よりの風が卓越する. この低気圧事例では低気圧の中心が暖流の南端に沿って移動するので, ちょうど CCB が暖流に重なることで暖流から水蒸気が蒸発するのに好適な条件を満たしていた可能性がある. 上述した南方からの水蒸気移流だけではなく, 中緯度暖流域から蒸発した水蒸気も低気圧中心近傍へ流入することで, 低気圧の急発達へ影響を与えた可能性がある.

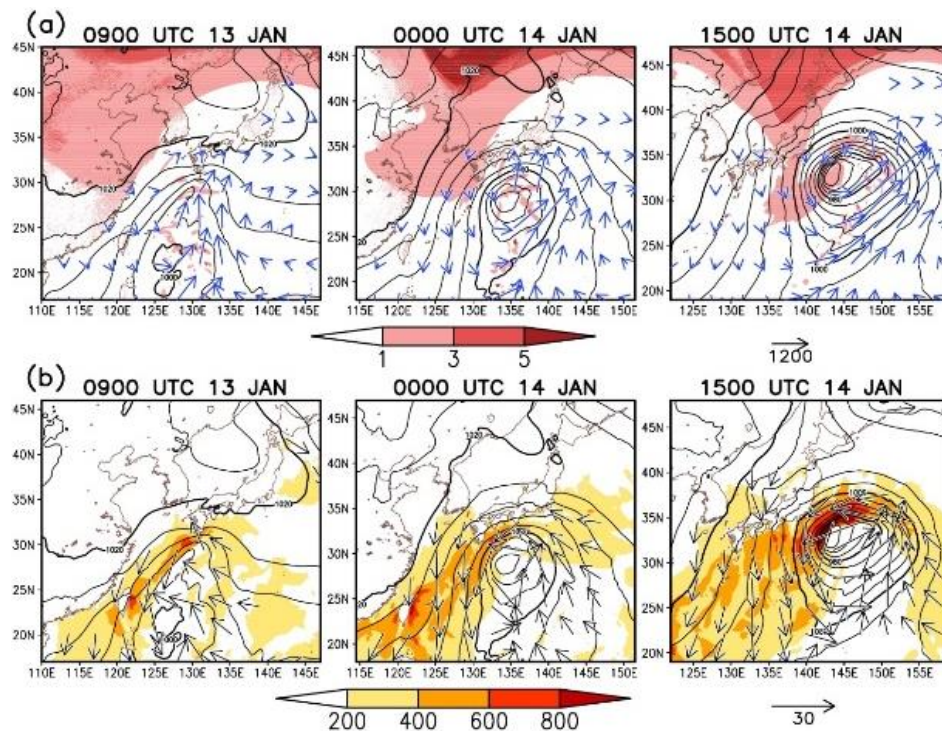


図 1. (a) 2013 年 1 月 13 日 09UTC, 14 日 00UTC, 14 日 15UTC における CReSS-NHOES のシミュレーション結果. 陰影は 320-K 面のエルテルの渦位 (PVU), 等値線は SLP (hPa), ベクトルは鉛直積分した水蒸気フラックス ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) を示す. (b) (a) と同様である. ただし, 陰影は海面からの潜熱フラックス (W m^{-2}), ベクトルは 10-m 水平風 (m s^{-1}) を示す.

4. 低気圧のメソ構造と関連する水蒸気輸送

本節では暖流域から蒸発した水蒸気がどのように低気圧中心近傍へ流入するのか調査する。まず、低気圧中心近傍の低気圧のメソ構造について調べる。図 2a, 2b は 850-hPa 温位の水平勾配, 950-hPa 水平風の発散をそれぞれ示している。図 2c は、地表から 100 hPa まで鉛直積分した *apparent heat source* Q_1 (e.g., Yanai, 1973) の低気圧中心付近の拡大図 (図 2b の緑枠の領域) である。前線構造に注目すると最大発達率を示す時刻には後屈前線, T-bone 型の前線構造が明瞭となる。この地表前線の発展は Shapiro-Keyser モデル (e.g., Shapiro and Keyser, 1990) に類似している。さらに、低気圧中心近傍を拡大してみると、非断熱加熱域に特徴的なメソ構造が見られる (図 2c)。最大発達率を示す時刻には、後屈前線付近と低気圧前面の温暖前線付近にそれぞれ非断熱加熱域の極大域が生じている。これに対応して SLP 分布も非対称となっている。これらの結果から、暖流から蒸発した水蒸気は地表付近の前線で収束し、その直上の非断熱加熱を強化することで低気圧の発達へ寄与していることが考えられる。

しかしながら、スナップショットの結果からでは実際に暖流から変質を受けた空気塊が低気圧中心近傍へどのように取り込まれるのかを特定することはできない。そこで、後方流跡線解析を用いて上記の過程を検証する。ここでは、非断熱加熱の生成と関連する空気

塊の挙動を調査したいので、流跡線解析の始点は最大発達率に達した時刻に高度 2500 m の Q_1 が 10 K/hr を超える全格子にセットした。計算は 1 分間隔で実施した。高度 2500 m は後屈前線付近の Q_1 が極大となる高度である (図略)。

図 3 は流跡線解析によって得られた全空気塊の流跡線と高度の変動を示している。加熱域への空気塊の流入経路は大きく分けて 2 つのタイプが卓越している。1 つはいわゆる warm conveyor belt (WCB) に伴う経路、もう一方は cold conveyor belt (CCB) に伴う経路である。後屈前線付近には CCB に関連して多くの空気塊が流入しており、一方で東側の温暖前線付近には WCB を介して多くの空気塊が流入している。次に各経路をたどった空気塊が暖流からどのような影響を受けたのかを調べるために、最大発達率の時刻において後屈前線, 温暖前線付近それぞれで、2500-m Q_1 が最も大きな値を示した格子の空気塊の特性の時間変動について調べた。図 4a は選択した空気塊の流跡線と最大発達率を示した時刻の SLP, 10-m 水平風, 潜熱フラックスを示している。図 4a の A-F (G-L) は、図 4b, 4c の時刻に対応している。図 4b, 4c は、選択された空気塊と関連する物理量 (空気塊の高度, 水蒸気混合比, 温位と空気塊直下の潜熱フラックス) の時系列を示している。CCB と関連する空気塊は暖流上を通過する時、高度 500 m 以下の大気境界層内を移動している (A-E)。

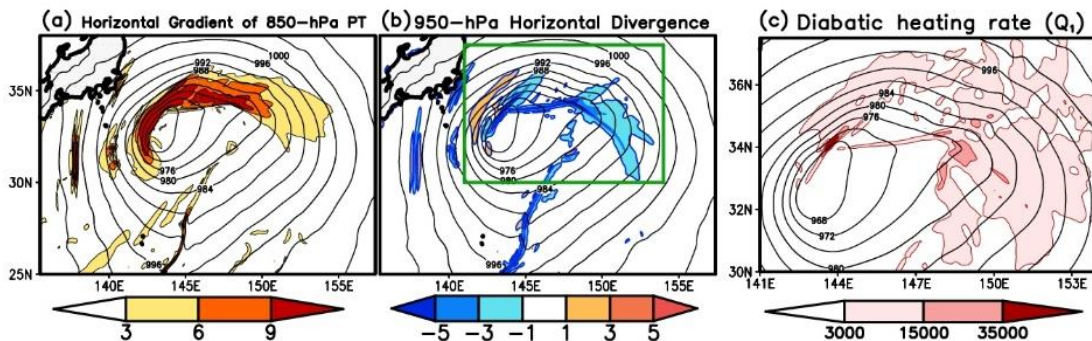


図 2. (a) 2013 年 1 月 14 日 15UTC における CReSS-NHOES のシミュレーション結果。陰影は 850-hPa 温位の水平勾配 ($\times 10^{-5} \text{ K m}^{-1}$), 等値線は SLP (hPa) を示す。 (b) (a) と同様である。ただし、陰影は 950-hPa 水平風収束 ($\times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) を示す。 (c) 低気圧中心付近の拡大図 (b の緑枠)。陰影は地表から 100-hPa まで鉛直積分した Q_1 (W m^{-2}) を示す。

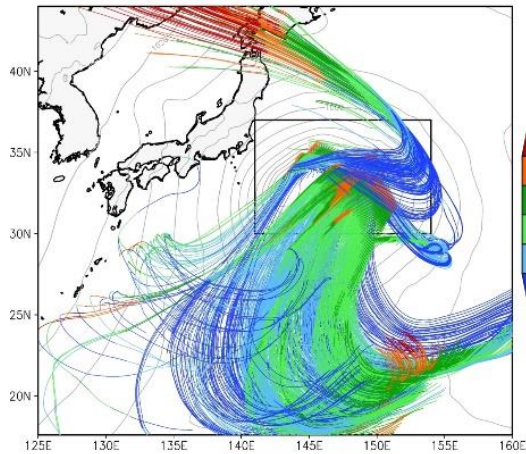


図3. 後方流跡線解析の結果. 線の色は各空気塊の高度 (m) を示す.

このとき, CCB に伴う乾燥した空気塊は直下の暖流から多量の水蒸気を受け取ることができるので, その空気塊は顕著に湿潤化する (D – F). そして, 空気塊は後屈前線付近で収束し, 上昇運動が強制される (F). その結果, 水蒸気混合比の急激な減少と温位の急激な増加が生じている (F). したがって, 暖流から蒸発した水蒸気は CCB を介して後屈前線付近の非断熱加熱を強化することで低気圧発達へ

寄与していることが考えられる. 一方で, WCB と関連する空気塊は亜熱帯付近ですでに湿潤化しているので, 中緯度海洋からの水蒸気供給はほとんどみられない (G-L). ここでは, 代表的な空気塊にのみ注目したが, 他の空気塊も同様な傾向を示した (図略). このように, CCB は暖流から蒸発した水蒸気を効率的に低気圧中心近傍へ流入させる働きがある.

5.まとめと議論

高解像度非静力学大気-海洋-波浪結合モデル CReSS-NHOES を用いて, 黒潮/黒潮続流域から蒸発した水蒸気がどのように温帯低気圧の急発達に影響を与えるのか調査した. 本研究では, 2013 年 1 月中旬に日本の南端に沿って移動し, 黒潮続流域で非常に急発達した爆弾低気圧に注目した. 対流圏下層の前線構造の時間発展は Shapiro-Keyser モデルに類似していた. 最大発達率に達する時刻には後屈前線, T-bone 型の前線構造が顕著となる. このとき, 低気圧中心近傍の非断熱加熱域は複雑なメソ構造を示していた. 非断熱加熱の極大

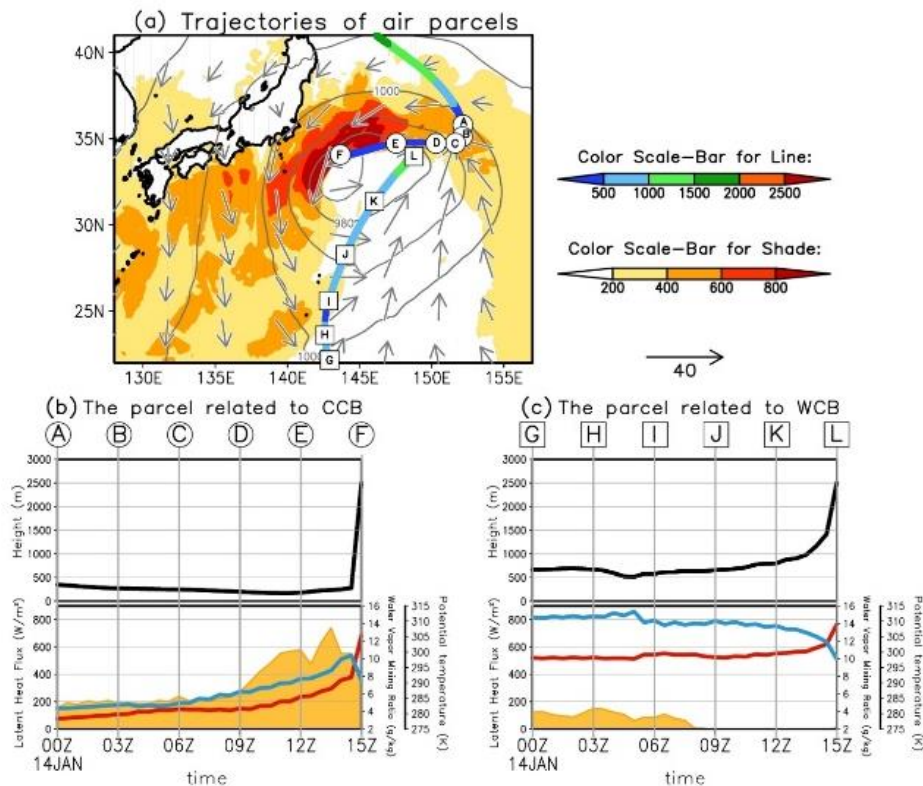


図4. (a) 2013 年 1 月 14 日 15UTC における CReSS-NHOES のシミュレーション結果と選択された空気塊の流跡線を示す. 陰影は海面からの潜熱フラックス (W m^{-2}), ベクトルは 10-m 水平風 (m s^{-1}), 等値線は SLP (hPa) を示す. A-L で示された位置は 図4(b), (c) と対応している. (b) CCB と関連する空気塊の特性の時間変動を示す. 上図は空気塊の存在高度 (m), 下図は空気塊の水蒸気混合比, 温位, 空気塊直下の海面からの潜熱フラックスの時間変化を示す. (c) (b) と同様である. ただし, WCB に伴う空気塊の時間変動を示す.

域は低気圧中心の北の後屈前線と低気圧前面の温暖前線付近に位置していた。後方流跡線解析から、後屈前線（東側の温暖前線）付近の加熱の生成には、CCB（WCB）によって輸送された水蒸気の凝結に伴う潜熱解放が関与していることが示された。WCBに関連した空気塊は亜熱帯ですでに湿潤化しているため、中緯度海洋からの水蒸気供給を受けにくい。一方で、乾燥した空気塊を伴うCCBは黒潮/黒潮続流域から多量の水蒸気供給を受ける。そのため、中緯度暖流から蒸発した水蒸気はCCBを介して主に後屈前線の非断熱加熱を強化することで低気圧の発達に寄与している。

これらの結果から以下のようなCCBを介した暖流上における温帯低気圧の急発達に関するフィードバック過程が考えられる。①後屈前線付近の潜熱解放は低気圧の中心気圧の低下を導く。②低気圧発達に伴いCCBはさらに強化されるので、暖流からの水蒸気の蒸発も促進される。③蒸発した多量の水蒸気はCCBによって低気圧システムへと輸送される。その結果、④後屈前線付近での水蒸気収束および非断熱加熱が強化され、低気圧の発達はさらに促進される。一連のフィードバック過程においてCCBは暖流からの蒸発を促進させるのみならず、蒸発した水蒸気を後屈前線付近へ輸送する働きもある。そのため、CCBは低気圧発達と暖流を繋ぐ重要な働きを担っている。上述のフィードバック過程が暖流域での低気圧の急発達を促すプロセスのひとつとして重要である。他の事例に対しても同様なプロセスが成り立つのかどうか、現在検証を進めている。

謝辞

非静力学海洋モデルNHOESは海洋研究開発機構の相木秀則博士によって開発が進められている。この場を借りてお礼申し上げます。本研究集会において貴重な質問、コメントを下さった皆様に感謝致します。本研究はJSPS科研費14J04241, 25242038, MEXT科研費22106005の援助を受けて実施された。

参考文献

- Aiki, H., J. P. Matthews, and K. G. Lamb (2011), *J. Geophys. Res.*, **116**, C03023, doi:10.1029/2010JC006589.
- Aiki, H., K. Takahashi, and T. Yamagata (2006), *Cont. Shelf Res.*, **26**, 1448-1468.
- Chen, S.-J., Y.-H. Kuo, P.-Z. Zhang, and Q.-F. Bai (1992), *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 3029-3035.
- Donelan, M. A., M. Curcic, S. S. Chen, and A. K. Magnusson (2012), *J. Geophys. Res.*, **117**, C00J23, doi:10.1029/2011JC007787.
- Hoskins, B. J., M. E. McIntyre, and A. W. Robertson (1985), *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **111**, 877-946.
- Iizuka, S., M. Shiota, R. Kawamura, and H. Hatsushika (2013), *SOLA*, **9**, 1-4.
- Japan Meteorological Agency (2013), [Available online at <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2013-nwp/index.htm>.]
- Kuwano-Yoshida, A., and Y. Asuma (2008), *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 712-740.
- Kuo, Y.-H., R. J. Reed, and S. Low-Nam (1991), *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 457-476.
- Miyazawa, Y., R. C. Zhang, X. Y. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J. S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou, and K. Komatsu (2009), *J. Oceanogr.*, **65**, 737-756.
- Nuss, W. A., and S. I. Kamikawa (1990), *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 755-771.
- Reed, R. J., G. Grell, and Y.-H. Kuo (1993), *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 1595-1612.
- Schultz, D. M. (2001), *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2205-2225.
- Shapiro, M. A., and D. Keyser (1990), *The Erik Palmen Memorial Volume*. C. W. Newton and E. O. Holopainen, Eds., *Amer. Meteor. Soc.*, 167-191.
- Takano, I. (2002), *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 669-695.
- Takayabu, I., H. Niino, M. D. Yamanaka, and S. Fukao (1996), *Meteor. Atmos. Phys.*, **61**, 39-53.
- Tsuboki, K., and A. Sakakibara (2002), *High Performance Computing*, H. P. Zima et al., Eds., Springer, 243-259.
- Tsuboki, K., and A. Sakakibara (2007), *The textbook for Seventeenth IHP training course in 2007*. HyARC, Nagoya University, Japan, and UNESCO, 273 pp.
- Yanai, M., S. Esbensen, and J.-H. Chu (1973), *J. Atmos. Sci.*, **30**, 611-627.
- Yoshiike, S., and R. Kawamura (2009), *J. Geophys. Res.*, **114**, D13110, doi:10.1029/2009JD011820.