

東アジアにおける夏季地上気圧の長期トレンドと 熱帯太平洋海面水温変動との関係

永 田 玲 奈^{*1}・三 上 岳 彦^{*2}

Long-term trends in summer sea level pressure over East Asia and its relation to sea surface temperature variability in the tropical Pacific

NAGATA Rena and MIKAMI Takehiko

abstract

Long-term trends in summer sea level pressure (SLP) over East Asia and its relation to sea surface temperature (SST) variability in the tropical Pacific are investigated for the period 1901-2000, using the Hadley Center sea level pressure dataset (HadSLP2) and the extended reconstructed SST (ERSST). In June and July, SLP shows increasing trends over the subtropical western Pacific and the Okhotsk Sea, indicating the strengthened North Pacific subtropical high and Okhotsk high. The two highs likely become strengthened due to the increase of SST over the eastern tropical Pacific. In August, the Okhotsk high alone strengthened. The SLP trends show a wave-train pattern from the coastal region of the Barents Sea to the Okhotsk Sea. A possible factor for the strengthened Okhotsk high in August may be eastward Rossby wave propagation from the coastal region of the Barents Sea suggested by Ogi et al. (2004).

Keywords : Sea level pressure, Long-term trends, North Pacific subtropical high, Okhotsk high, Sea surface temperature

1. はじめに

東アジアにおける夏季天候の変動は、北太平洋高気圧とオホーツク海高気圧の動向に左右される (Huang and Sun, 1992; 安成, 1997など)。前者の変動に直接影響を与えるのが熱帯太平洋における海面水温 (sea surface temperature: SST) 変動である。熱帯太平洋における SST 変動であるエルニーニョ・ラニーニャ現象は、赤道太平洋西部で上昇し東部で下降する東西循環であるウォーカー循環 (Bjerknes, 1969) に影響を与えており、エルニーニョ現象時にはウォーカー循環の弱まりや東への移動が見られる (Lau and Wu, 2001; Wang, 2002)。ウォーカー循環の変化は北太平洋高気圧の変化を引き起こす (Nagata and Mikami, 2009)。さらにオホーツク海高気圧についてもエルニーニョ・ラニーニャ現象がその強弱に影響していることが指摘されている (Tachibana et al., 2004)。

温暖化の進行に伴い、熱帯太平洋において西部よりも中・東部の SST 上昇が大きくエルニーニョ状態となることが気候モデルにより示されており (IPCC, 2007)、この SST パターンの変化に伴い北太平洋高気圧が強化することも指摘されている (Kimoto, 2005; Kurihara et al., 2005)。また、北太平洋高気圧の強化に伴い梅雨前

キーワード：地上気圧、長期トレンド、北太平洋高気圧、オホーツク海高気圧、海面水温

*1 人間文化創成科学研究科研究院研究員

*2 帝京大学教授

線上の降水増加が懸念されている (Kimoto, 2005; Kurihara et al., 2005)。実際、Nagata and Zaiki (2008)は1901-2000年の100年において夏季の西日本の日本海側で強い降水が増加傾向であることを指摘している。

地上気圧の長期変動については、西森・安成 (1996) が東アジア・西太平洋域の1900-1988年における作用中心の長期変動を示し、オホーツク海高気圧の盛衰や小笠原高気圧の発達や張り出しの長期変動を明らかにしている。

上記に示した先行研究の多くは、東アジア循環場の長期変動についての大気大循環モデルを用いた研究である。しかしながら、東アジアにおける猛暑・冷夏や夏季モンスーン変動の将来予測には、モデルによる研究と並行して観測データに基づき東アジアにおける夏季大気循環場の長期傾向を明らかにすることが不可欠であると考えられる。

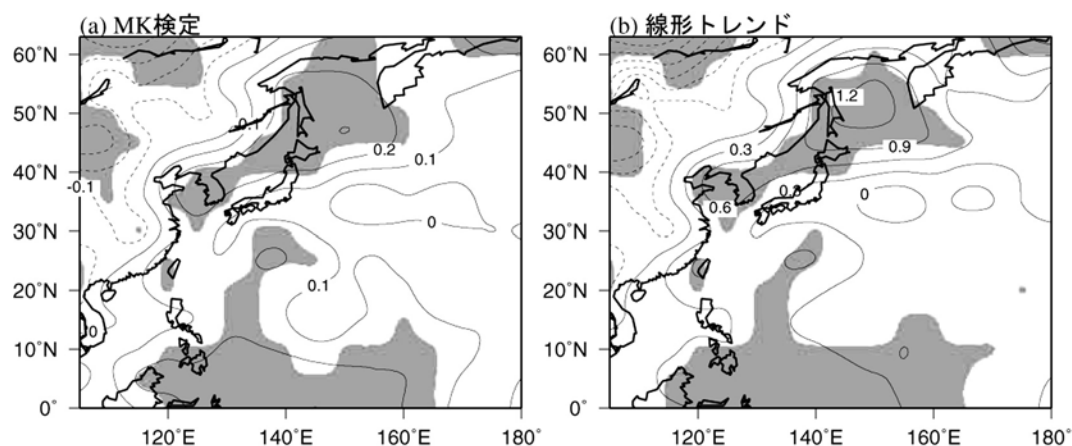
本研究では、夏季東アジアにおける地上気圧の長期トレンドについて解明するとともに、このトレンドと東アジア夏季循環場に大きな影響を与える熱帯太平洋 SST の長期変動との関係について明らかにする。

2. データと解析方法

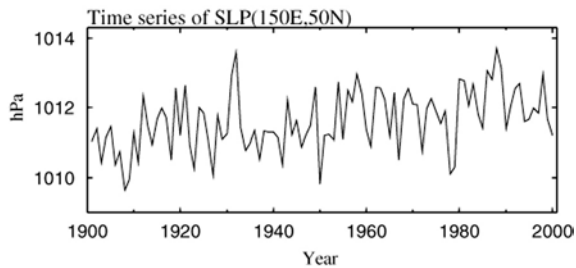
地上気圧データは英国ハドレーセンター (Hadley Centre) の $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ グリッドの HadSLP2 (Allan and Ansell, 2006) を使用した。SST データは $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ グリッドである ERSST (Extended reconstructed SST; Smith and Reynolds, 2003) を使用した。解析対象期間は1901-2000年の6-8月である。トレンドの算出には Mann-Kendall Rank statistic (Kendall, 1938; 以下 MK 検定とする) と線形トレンド (線形回帰分析) を用いた。線形トレンドは線形のみ検出可能であるが、MK 検定は線形・非線形両方のトレンドを検出する。この2つの手法を用いて100年のトレンドについて考察を行う。

3. 夏季東アジアにおける地上気圧のトレンド

第1図に夏季 (6-8月) 平均地上気圧のトレンドを示した。MK 検定では、西部太平洋の熱帯と亜熱帯 (北緯20-30度・東経140度付近)、そしてオホーツク海から北日本・朝鮮半島にかけて有意な地上気圧の上昇が見られる (第1図(a))。一方、東経120度以西・北緯40度以北の大陸では負のトレンド域も認められる。線形トレンドでは、MK 検定と同様のパターンを示している (第1図(b))。第2図に MK 検定・線形トレンドともにトレンドが強いオホーツク海のグリッド (東経150度・北緯50度) における地上気圧の時系列を示した。西部太平洋亜熱帯域とオホーツク海における気圧上昇は北太平洋高気圧とオホーツク海高気圧の強化をそれぞれ示しているものと考えられる。実際、北太平洋高気圧が1980年以降強まっていることは Gong and Ho (2002) や Nagata and Mikami (2009) により示されており、また、Dong et al. (2007) は1970年代以降にオホーツク海にブロッキング



第1図 夏季 (6-8月) 平均地上気圧のトレンド。(a) MK検定, (b) 線形トレンド。等値線間隔は(a) : 0.1, (b) : 0.3hPa/100年。負の値は破線で示した。影域は5%で有意な領域を示す。



第2図 150°E, 50°Nにおける夏季平均地上気圧の時系列。

高気圧が出現する年が増加していることを示している。また、2つの高気圧が強化している領域の間にあたる東経120度以東の北緯30-40度帯には上昇トレンドが弱い領域と、有意ではないが両検定とも下降トレンドを示す領域が見られ、この領域における梅雨前線の強化を示すものと考えられる。地球温暖化が進んだ場合のシミュレーション結果として、北太平洋高気圧及びオホーツク海高気圧の強化と梅雨前線上の降水増加が報告されている (Kimoto, 2005; Kurihara et al.,

2005)。第1図はこれらのシミュレーション結果に整合しており、彼らの主張を裏付ける結果が得られた。

第3・4図は、6-8月の月ごとの地上気圧のトレンドである。これらを、先に示した夏季の特徴と比較する。6月(第3図(a)・第4図(a))にはMK検定・線形トレンドともに西部太平洋の熱帯・亜熱帯(北緯20-30度)とオホーツク海から北日本・朝鮮半島にかけて上昇トレンド、東経120度以西・北緯40度以北の大陸で下降トレンドを示している点は夏季平均地上気圧の結果(第1図)と一致しているが、6月の方が上昇トレンドは強く顕著である。また、東経120度以東の北緯30-40度帯における上昇トレンドが弱い点も夏季平均と一致している。

7月(第3図(b)・第4図(b))のトレンドは6月と比較すると、MK検定・線形トレンドともにオホーツク海における上昇トレンドは強いが、西部太平洋熱帯・亜熱帯域および北日本・日本海・朝鮮半島にかけての上昇トレンドは弱い。6月と同様に大陸における下降トレンドも認められる。また、東経120度以東の北緯30-40度帯には下降トレンドが見られ、7月にも夏季平均値と同様に西部熱帯太平洋において地上気圧が上昇しており、北太平洋高気圧とオホーツク海高気圧が強まっていることがわかる。

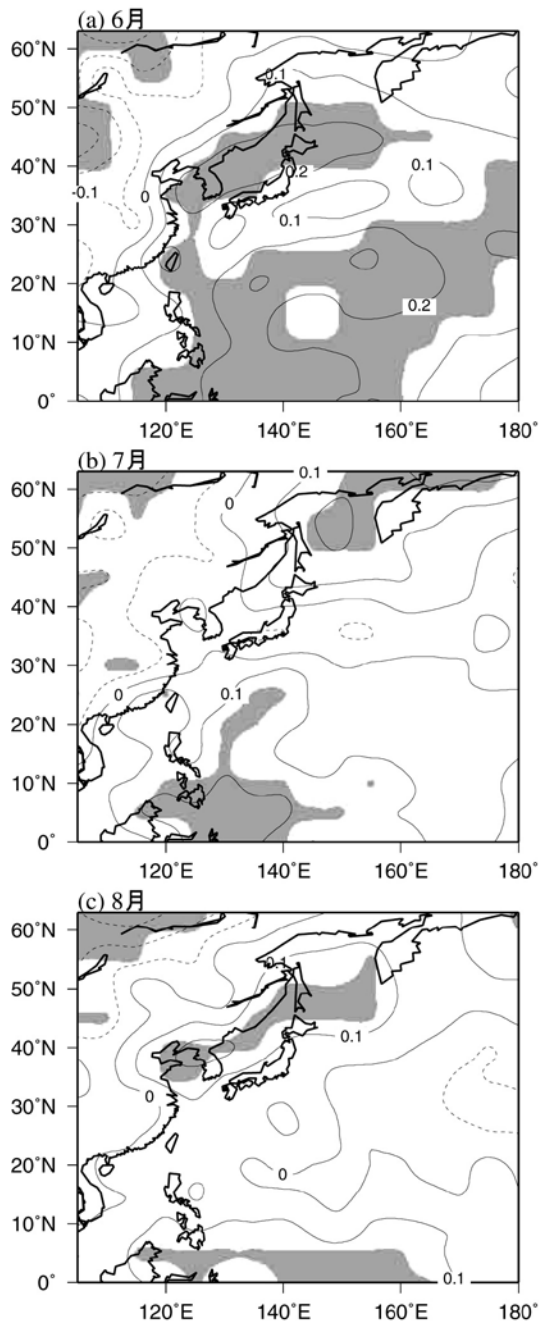
一方、8月(第3図(c)・第4図(c))については、西部熱帯太平洋における気圧上昇(6・7月に比べると弱い)と東経120度以西・北緯40度以北の大陸における下降トレンド、そしてオホーツク海高気圧の強化は確認できたが、北太平洋高気圧の強まりは見られない。

4. 熱帯太平洋SST変動と東アジア地上気圧トレンドとの関係

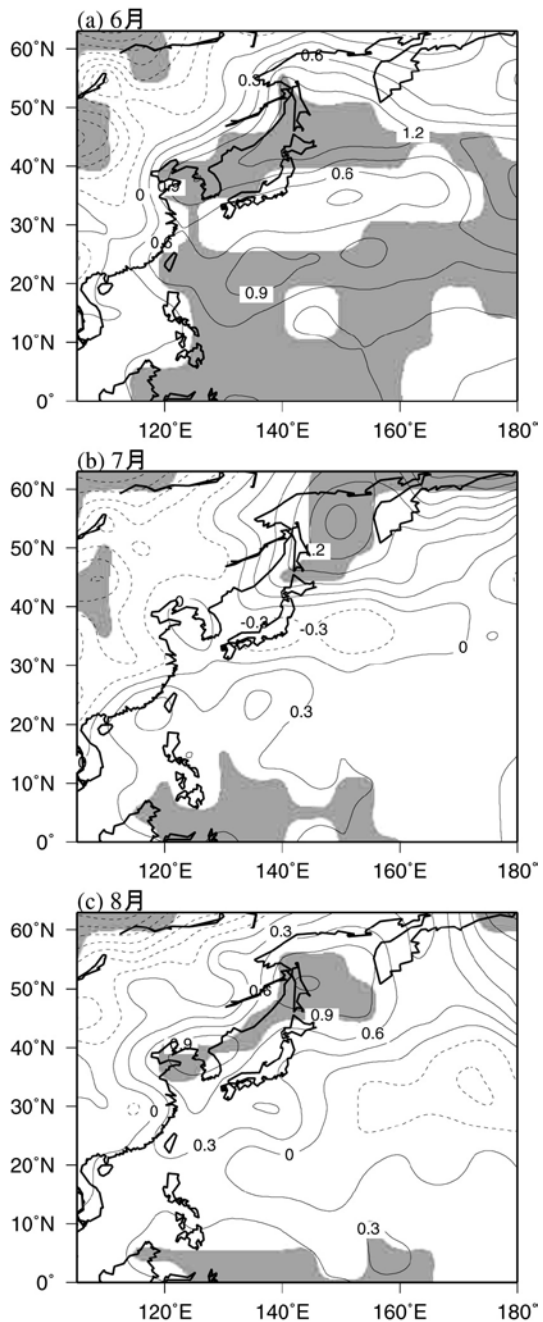
次に、6-8月に見られた北太平洋高気圧・オホーツク海高気圧の強化と熱帯太平洋におけるSST変動との関係を明らかにするため、第5図・第6図に示す熱帯太平洋における地上気圧のMK検定と線形トレンドの結果について検討する。

第3・4図と同様西部熱帯太平洋では6・7月には強い上昇トレンドが見られるが8月のトレンドは弱い。一方、東部熱帯太平洋では、6月には強い下降トレンド域が広がっているが7月には弱まり、8月には有意な下降トレンドは見られなくなる。この結果は、6・7月には熱帯太平洋においてウォーカー循環が弱まっていることを示し、Vecchi et al. (2006)の人的な要因による温暖化に伴い19世紀中ごろよりウォーカー循環が弱まっているとする指摘と一致する。

第1・2表にエルニーニョ現象に関連する太平洋赤道域のSST変動を監視するために設定されている領域であるNINO1+2 (10°S-0, 90°-80°W)・NINO3 (5°S-5°N, 150°-90°W)・NINO WEST (0°-15°N, 130°-150°E)におけるSSTのMK検定と線形トレンドの結果をそれぞれ示した。6・7月には線形トレンドは西部(NINO WEST)・東部(NINO1+2, NINO3)熱帯太平洋全ての領域のSSTにおいて有意な上昇トレンドを示しているが(第2表)、MK検定ではNINO3の7月における上昇トレンドが有意ではない(第1表)。また、MK検定では東部熱帯太平洋よりも西部の上昇トレンドが強いに対して、線形トレンドでは西部よりも東部熱帯太平洋の上昇トレンドが強い。温暖化に伴い、西部よりも東部熱帯太平洋のSST上昇が大きくエルニーニョ状態になることが予測されており(IPCC, 2007)、実際、1970年代後半以降エルニーニョ現象の発生が増加していることが指摘されている(Trenberth and Hoar, 1996)。これらの報告は第2表に示した線形トレンドの結果と一致している。このことから、6・7月には、東部熱帯太平洋のSST上昇に伴いウォーカー循環が弱まり、第5・6図に示したように東部熱帯太平洋で地上気圧が下降し、西部において上昇したと考えられる。

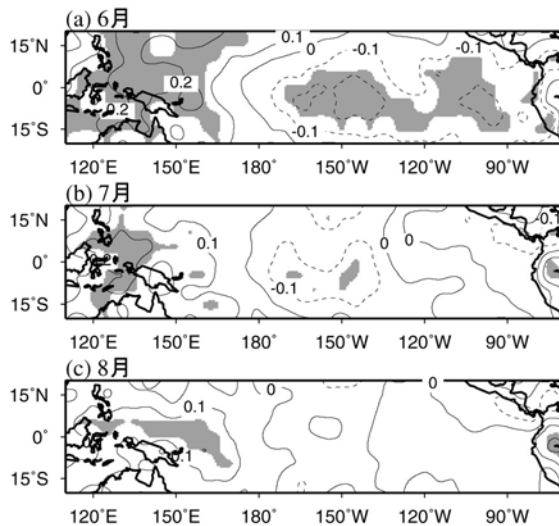


第3図 東アジアの6-8月における地上気圧のトレンド (MK検定)。(a)6月, (b)7月, (c)8月。等値線間隔は0.1。負の値は破線で示した。影域は5%で有意な領域を示す。

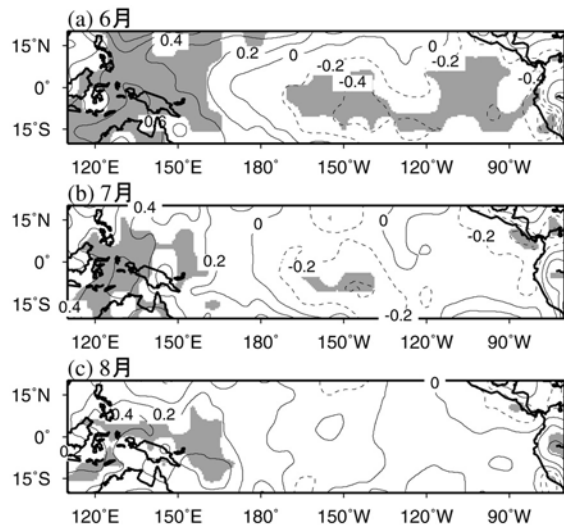


第4図 東アジアの6-8月における地上気圧のトレンド (線形トレンド)。(a)6月, (b)7月, (c)8月。等値線間隔は0.3hPa/100年。負の値は破線で示した。影域は5%で有意な領域を示す。

この東部熱帯太平洋における SST 上昇は、第3・4図で示した北太平洋高気圧とオホーツク海高気圧の強化にも関係している。西部熱帯太平洋（フィリピン付近）の SST が高い場合、この領域の対流活動が活発となりロスビー波列が生成され、日本付近は高気圧偏差に覆われ気温が高くなる。このパターンは Pacific-Japan (PJ) パターンと呼ばれている (Nitta, 1987)。東部熱帯太平洋における SST が高い場合、逆 PJ パターンとなりフィリピン付近で高気圧偏差（つまりこの領域で北太平洋高気圧が強化）・日本付近で低気圧偏差となる。Tachibana et al. (2004)はこの波列はさらにオホーツク海に高気圧偏差を引き起こし、オホーツク海高気圧の強化につながることを示している。このことから、6・7月に北太平洋高気圧及びオホーツク海高気圧が強化した原因は東部熱帯太平洋における SST 上昇によるものと考えられる。



第5図 熱帯太平洋域の6-8月における地上気圧のトレンド（MK検定）。(a) 6月, (b) 7月, (c) 8月。等値線間隔は0.1。負の値は破線で示した。影域は5%で有意な領域を示す。



第6図 熱帯太平洋域の6-8月における地上気圧のトレンド（線形トレンド）。(a) 6月, (b) 7月, (c) 8月。等値線間隔は0.2hPa/100年。負の値は破線で示した。影域は5%で有意な領域を示す。

第1表 NINO域SSTの6-8月におけるトレンド（MK検定）。太字は5%で有意。

	NINO1+2	NINO3	NINO WEST
6月	0.16	0.20	0.56
7月	0.14	0.13	0.46
8月	0.02	0.07	0.47

第2表 NINO域SSTの6-8月におけるトレンド（線形トレンド）。単位は°C/100年。太字は5%で有意。

	NINO1+2	NINO3	NINO WEST
6月	1.12	0.82	0.44
7月	0.95	0.61	0.46
8月	0.31	0.47	0.42

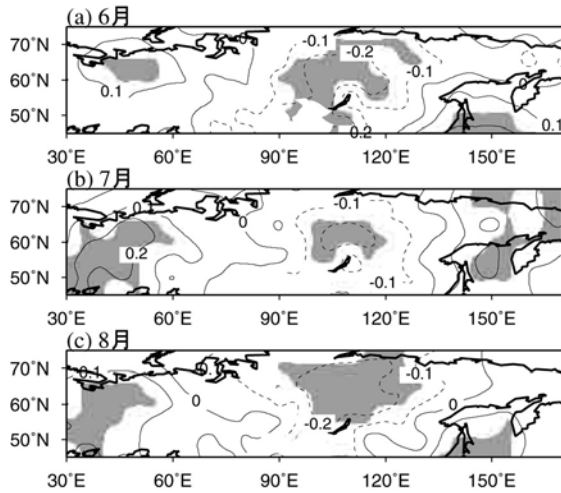
8月には西部熱帯太平洋におけるSST上昇はMK検定・線形トレンドともに有意であるが、東部においては有意なトレンドは見られない（第1・2表）。また、第5・6図に示したように西部熱帯太平洋において地上気圧は有意な上昇を示しているが、東部では有意なトレンドは見られず、第3・4図においてもPJパターンや逆PJパターンは見られない。この月のオホーツク海高気圧の強化は上記に示した熱帯太平洋SST変動の影響ではないと考えられる。この点については次章で詳しく述べる。

5. まとめと考察

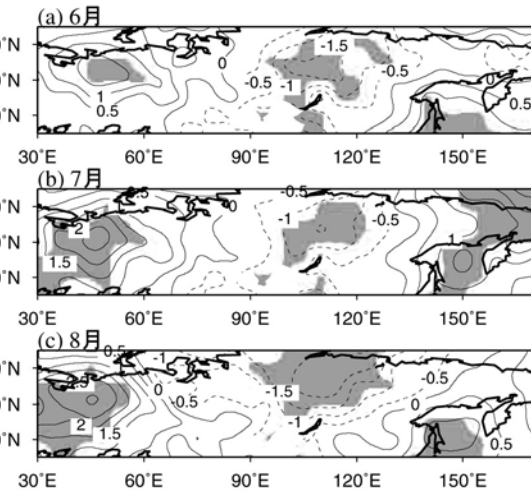
本研究では、Mann-Kendall rank statistic（MK検定）と線形トレンドの2つのトレンド算出方法を用いて、1901-2000年における東アジア夏季地上気圧の長期トレンドについて解析を行い、熱帯太平洋SST変動との関係について考察を行った。以下に得られた結果を示す。

- ①夏季（6-8月平均）東アジアにおける地上気圧は、MK検定・線形トレンドともに西部太平洋の熱帯・亜熱帯域とオホーツク海において上昇トレンドであった。西部太平洋亜熱帯域とオホーツク海における上昇トレンドは北太平洋高気圧およびオホーツク海高気圧の強化を示している。
- ②6-8月の月ごとにトレンドを算出したところ、MK検定・線形トレンドともに全ての月において西部熱帯太平洋で地上気圧の上昇トレンドが見られた。また、6・7月には北太平洋高気圧・オホーツク海高気圧の強化が見られたが、8月はオホーツク海高気圧の強化のみが認められた。
- ③6・7月における西部熱帯太平洋の気圧上昇は東部熱帯太平洋のSST上昇に伴うものであり、これに応じて西部熱帯太平洋からロスビー波が伝播し、北太平洋高気圧・オホーツク海高気圧が強化していた。

6月は線形トレンドにおいて特に東部熱帯太平洋におけるSSTの上昇トレンド強く（第2表）、これに伴いウォーカー循環の弱まりも顕著であった（第5・6図）。6月はこの領域でのSSTの上昇トレンドが強かったた



第7図 バレンツ海沿岸からオホーツク海にかけての高緯度域の6-8月における地上気圧のトレンド（MK検定）。(a) 6月, (b) 7月, (c) 8月。等値線間隔は0.1。負の値は破線で示した。影域は5%で有意な領域を示す。



第8図 バレンツ海沿岸からオホーツク海にかけての高緯度域の6-8月における地上気圧のトレンド（線形トレンド）。(a) 6月, (b) 7月, (c) 8月。等値線間隔は0.5hPa/100年。負の値は破線で示した。影域は5%で有意な領域を示す。

めに、北太平洋高気圧・オホーツク海高気圧ともに強化が顕著であったと考えられる（第3・4図）。一方、6・7月において線形トレンドでは東部熱帯太平洋におけるSST上昇が西部よりも強かったのに対して、MK検定では逆の結果が得られた。このことから、西部熱帯太平洋のSST上昇には線形でない上昇トレンドが生じていると考えられる。

第4章で、8月のオホーツク海高気圧の強化は熱帯太平洋におけるSST上昇によるものではないことがわかった。以下に、8月にオホーツク海高気圧の強化が見られた要因について示す。

第7・8図にバレンツ海沿岸からオホーツク海における地上気圧のMK検定と線形トレンドを示した。6-8月に共通する特徴として、2つの検定ともにバレンツ海沿岸付近で上昇トレンド、シベリアで下降トレンド（第3・4図にも現れている）、そしてオホーツク海で上昇トレンドが見られる。これは、Ogi et al. (2004) や Tachibana et al. (2004) が示したオホーツク海高気圧が強化する際に見られるバレンツ海沿岸からの波列構造と一致する。このことから、8月におけるオホーツク海高気圧の強まりは、バレンツ海沿岸からのロスビー波の伝播によるものと考えられる。Ogi et al. (2004) はバレンツ海付近の暖気のシグナルがロスビー波を励起し、オホーツク海高気圧の変動に影響していることを指摘している。このロスビー波を励起するものはバレンツ海付近のSSTや気温などの変動が影響していると考えられる（Ogi et al., 2004）。今後、ロスビー波を励起する要素とその過程について解明する必要がある。

Ogasawara and Kawamura (2008) は遠隔伝播（テレコネクション）パターンの複合効果は単独のテレコネクションよりも夏季東アジアモンスーン循環への影響が大きいことを示している。6・7月にオホーツク海高気圧が強化した原因は、第4章で示した東部熱帯太平洋におけるSST上昇（逆PJパターン）に加えて上記に示したバレンツ海付近からの波列の影響の複合効果によるものと考えられる。Wakabayashi and Kawamura (2004) は日本とその周辺の夏季異常気象と関係が深いと考えられるテレコネクションパターンを抽出し、その中でEurope-Japan (EJ) 1とEJ 2パターンはオホーツク海高気圧の変動と関係していることを示している。第3・4図では、6・7月に正のEJタイプ1と負のPJパターン（逆PJパターン）の複合による三極構造（オホーツク海とフィリピン北方の北西太平洋に正偏差、日本に負偏差）が見られる（6月の日本付近はマイナスではなく弱いプラスだが）。Ogasawara and Kawamura (2008) では正のEJタイプ1と負のPJパターンの複合は正のEJタイプ2と負のPJパターンよりも三極構造がうまく現れないとしているが、本研究では前者の複合が見られた。

本研究では、長期トレンドに着目して解明を行ったが、今後、東アジア夏季地上気圧の十年規模変動と熱帯太

平洋 SST との関係について解明を行いたい。

謝辞

査読者の方々に貴重なご意見を頂きましたことを感謝致します。本論文では、作図に GMT (The Generic Mapping Tools) を使用した。

参考文献

- Allan, R. and T. Ansell, 2006: A new globally complete monthly historical gridded mean sea level pressure dataset (HadSLP2): 1850-2004. *J. Climate*, **19**, 5816-5842.
- Bjerknes, J. 1969: Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 163-172.
- Dong, W., Y. Wang and M. Dong, 2007: Effects of sea surface temperature anomalies off the east coast of Japan on development of the Okhotsk high. *Acta Meteorologica Sinica*, **21**, 234-244.
- Gong, D. Y. and C. H. Ho, 2002: Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 10.1029/2001GL014523.
- Huang, R. and F. Sun, 1992: Impacts of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 243-256.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Kendall, M. G., 1938: A new measure of rank correlation. *Biometrika*, **30**, 81-93.
- Kimoto, M., 2005: Simulated change of the East Asian circulation under the global warming scenario. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L16701.
- Kurihara, K., K. Ishihara, H. Sasaki, Y. Fukuyama, H. Saitou, I. Takayabu, K. Murazaki, Y. Sato, S. Yukimoto and A. Noda, 2005: Projection of climate change over Japan due to global warming by high-resolution regional climate model in MRI. *SOLA*, **1**, 97-100.
- Lau, K. M. and H. T. Wu, 2001: Principal modes of rainfall-SST variability of the Asian summer monsoon: A reassessment of the monsoon-ENSO relationship. *J. Climate*, **14**, 2880-2895.
- Nagata, R. and T. Mikami, 2010: Response of the summer atmospheric circulation over East Asia to SST variability in the tropical Pacific. *Intl. J. Climatol.*, DOI: 10.1002/joc.1909 (印刷中).
- Nagata, R. and M. Zaiki, 2008: Trends in total and daily precipitation indices in Japan from 1901 to 2000. *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*, **43**, 11-16.
- 西森基貴, 安成哲三, 1996: 東アジア・西太平洋地域における地上気圧場の長期的変動. *地理学評論*, **69A**, 793-816.
- Nitta, T., 1987: Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 373-390.
- Ogasawara, T. and R. Kawamura, 2008: Effects of combined teleconnection patterns on the East Asian summer monsoon circulation: Remote forcing from low- and high-latitude regions. *J. Meteor. Soc. Japan*, **86**, 491-504.
- Ogi, M., Y. Tachibana and K. Yamazaki, 2004: The connectivity of the winter North Atlantic Oscillation (NAO) and the summer Okhotsk high. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 905-913.
- Smith, T. M. and R. W. Reynolds, 2003: Extended Reconstruction of global sea surface temperatures based on COADS Data (1854-1997). *J. Climate*, **16**, 1495-1510.
- Tachibana, Y., T. Iwamoto, M. Ogi and Y. Watanabe, 2004: Abnormal meridional temperature gradient and its relation to the Okhotsk high. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 1399-1415.
- Trenberth, K. E. and T. J. Hoar, 1996: The 1990-1995 El Niño-Southern Oscillation event: Longest on record. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 57-60.
- Vecchi, G. A., B. J. Soden, A. T. Wittenberg, I. M. Held, A. Leetmaa and M. J. Harrison, 2006: Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing. *Nature*, **441**, 73-76.
- Wakabayashi, S. and R. Kawamura, 2004: Extraction of major teleconnection patterns possibly associated with the anomalous

永田・三上 東アジアにおける夏季地上気圧の長期トレンドと熱帯太平洋海面水温変動との関係

summer climate in Japan. J. Meteor. Soc. Japan, **82**, 1577-1588.

Wang, C., 2002: Atmospheric circulation cells associated with the El Niño-Southern Oscillation. J. Climate, **15**, 399-419.

安成哲三編, 1997: 1993年／94年夏の異常気象の解明, 気象研究ノート, (189), 290 pp.