

冬季日本周辺で起きる爆弾低気圧の長期的変化

岩尾 航希*

Long-term changes in characteristics of bomb-cyclones around Japan in winter

Koki Iwao*

Long-term changes in characteristics of bomb-cyclones around Japan from the former years (1979-1992) to the latter years (1993-2007) were investigated in winter (November – February), using analysis data of Japanese 25-year Reanalysis / JMA Climate Data Assimilation System (JRA/JCDAS). It was found that the frequency of the “bomb”, in which the deepening rate of central sea level pressure was the maximum in the lifetime of each cyclone and the deepening rate was over a criterion, was increased to the east of Japan in the northwestern Pacific and decreased over the north Pacific. Similar changes were identified in the frequency of heavy precipitation. Moreover, energy budget analyses were conducted for two composited anomaly fields constructed for bomb-cyclones in the former years and the latter years. The comparison between them indicated that the change in the development rate of bomb-cyclones was attributed to the change in the energy supply from the condensational heating.

キーワード：爆弾低気圧，長期的変化，気候変動，異常気象

Keywords : Bomb-cyclone, Long-term change, Climate change, Extreme weather

1. はじめに

日本を含む北西太平洋域は、北西大西洋域と並んで、冬季北半球で最も移動性高低気圧（擾乱）の活動が活発な地域である⁽¹⁾。これらの地域はストームトラックと呼ばれ、実際、地上天気図において低気圧が頻繁に通過する領域として知られている。

移動性低気圧（温帯低気圧）のなかでも急激に発達するものは「爆弾低気圧」⁽²⁾と呼ばれ、近年マスコミを通じてしばしば耳にするようになった。図1に2004年12月に発生した爆弾低気圧の例を示す⁽³⁾。12月4日9時に東シナ海上にあった1004hPaの低気圧中心は12月5日9時には仙台の東海上に移動しており、中心気圧は976hPaと台風並みに発達している。この低気圧の通過により、日本中大荒れの天気となり、徳島県穴喰町では216mm/日の降水量を記録、関東では山越えの西風によるフェーン現象が加わり、埼玉県熊谷市で26.3℃の夏日となった⁽³⁾。

この低気圧が爆発的に発達した一つの要因として、4日9時に見られる台風27号の影響が考えられる。台風が低気圧の前面に暖かい空気を送り込むことにより、そこで上昇流が生じ、低気圧を発達させる運動エネルギーを発生させる。また、台風は暖かい空気と共に水蒸気も低気圧に送り込む。上昇流に伴い凝結した水蒸気は雨を降らせるとともに大気

を加熱し、これも低気圧を発達させるエネルギー源となる。これらはそれぞれ傾圧的エネルギー変換と凝結による潜熱エネルギーの解放といわれ、ともに低気圧発達の代表的なメカニズムである。

日本周辺（北西太平洋域）における爆弾低気圧についてはYoshida and Asuma (2004)⁽⁴⁾に詳しい。彼らは再解析データを用いて冬季の爆弾低気圧を追跡し、その特徴や発達時の環境場、発達のメカニズムについて、軌道別にまとめた。その結果、太平洋上で発生・発達する爆弾低気圧が最も急激な発達をし、その発達には、対流圏中層での傾圧性と水蒸気の凝結が強く関与することを示した。

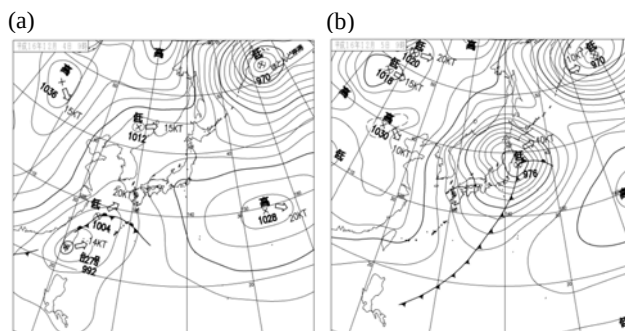


図1 (a) 2004年12月4日9時と(b)2004年12月5日9時における天気図⁽³⁾

Fig. 1 Meteorological chart at 9 JST on (a) 4th and (b) 5th December 2004.

* 共通教育科
〒866-8501 熊本県八代市平山新町 2627
Faculty of Liberal Studies,
2627 Hirayamashinmachi, Yatsushiro, Kumamoto 866-8501

近年このような極端な気象現象が注目されるようになったのは、一つには温暖化の影響に対して世間が興味を持つようになってきたからと言える。同様の興味は多くの研究者も有しており、実際数多くの研究がなされてきている。二酸化炭素が増加したときの気象への影響を調べる主な試みとして、コンピューター内に気候モデルを作成し、その中で二酸化炭素を増加させたシミュレーションを行い、生じる変化を調べる方法がある。移動性擾乱についても同様な方法で研究が行われており、これまで、ストームトラックの極向きシフト、移動性低気圧の減少、その中でも強いものの増加、などが述べられている⁽⁵⁾⁻⁽¹⁰⁾。

しかし、このような変化が実際に起こっているのか確認した研究例は少ない。McCabe et al (2001)⁽¹¹⁾は NCEP/NCAR⁽¹²⁾の再解析データを用いて 1959-1997 年に関して調べ、モデル結果と整合的な結果を得た。しかし、再解析データは一般に 1979 年以降が正確と言われており (衛星データを取り込むようになった)、データの質の面からもまだ研究の余地がある。本研究では、気象庁作成の JRA25/JCDAS⁽¹³⁾データを用い、1979-2007 年の冬季に発生した爆弾低気圧についてその変化を調べる。そして得られた変化に対して、エネルギー収支解析を行い、原因の究明を行う。

2. 解析方法

2.1 爆弾低気圧のトラッキング

気象庁作成の再解析データ JRA25/JCDAS は、東西×南北に $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ グリッド、鉛直には 1000hPa から 100hPa までに 12 層、時間間隔は 6 時間で与えられている。このデータセットの海水面気圧データをもとに低気圧を客観的に追跡 (トラッキング) し、爆弾低気圧の軌道 (トラック) データを、11 月から 2 月の冬季について作成した。

低気圧の中心は周囲 8 格子点の気圧の平均より 0.3hPa 以上低い点として定義し、6 時間後の低気圧中心のうち最も近いものを同じ低気圧と見なす。しかし、最も近い低気圧が 500km 以上離れている場合、低気圧は消失したものとする。このようにして低気圧を追跡し、24 時間以上追跡が可能であった低気圧についてのみ解析を行う。なお、標高が 1500m 以上の陸上においては、外挿による偽の低気圧が生じる可能性があるため、先行研究に倣い解析から除外している。

また、爆弾低気圧は中高緯度において 24 時間で 24hPa 以上中心気圧が減少する低気圧と定義されているので⁽²⁾、中心気圧の減少率、

$$-\frac{p(t+12) - p(t-12)}{24} \frac{\sin 60^\circ}{\sin \phi(t)} \quad (1)$$

が、最大で 1.0 以上のものとする。ここで、 p は海水面気圧、 t は時間、 ϕ は緯度を示している。

図 2 は 2007 年 11 月から 2008 年 2 月の間に北緯 15 度以北で検出された爆弾低気圧のトラックを全て示している。前述したように、爆弾低気圧のトラックが北西太平洋域と北西大西洋域に集中しているのが分かる。このことは、両地域が共に西風ジェットのコア領域であることや、黒潮や

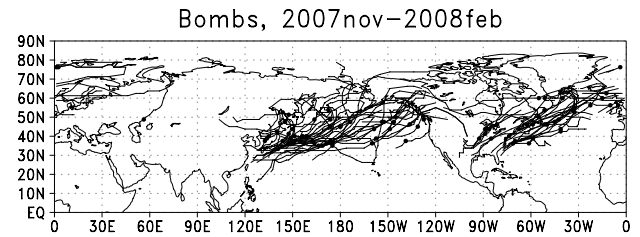


図 2 2007 年 11 月から 2008 年 2 月における爆弾低気圧のトラック。各トラック上の●は減少率が最大となった場所を表す。

Fig. 2 Tracks of bomb-cyclones occurring from November 2007 to February 2008. Solid circles on each track indicate the locations where the cyclones recorded the maximum deepening rate of central pressure.

メキシコ湾流が顕著な領域であることとも関係する⁽¹⁾。

2.2 エネルギー収支解析

爆弾低気圧発達のエネルギー源を調べるため、エネルギー収支解析を行う。まず時間フィルターを用い、6 時間間隔データを周期 10 日以上の基本場成分 (以下、バーで表示) と、基本場からの偏差として見積もられる 10 日以下の移動性擾乱成分 (以下、ダッシュで表示) に分ける。そして移動性擾乱の発達に注目し解析を行う。なお、ここで用いる式は Kosaka and Nakamura (2006)⁽¹⁴⁾を参考としている。

移動性擾乱のエネルギーは運動エネルギー (KE) と有効位置エネルギー (APE) の和で表され、それぞれ、

$$KE = \frac{u^2 + v^2}{2} \quad (2)$$

$$APE = \frac{RT'^2}{2\sigma p} \quad (3)$$

で記述される。ここで u, v はそれぞれ東西、南北風速、 T は気温で、これらのデータは全て気圧 p 面で与えられている。また、 R は気体定数 $287 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ 、 σ は大気 of 静的安定度を表し、 $\sigma = \frac{RT}{c_p p} - \frac{\partial T}{\partial p}$ で計算される。ただし c_p は定圧比熱 $1004 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ である。有効位置エネルギー (APE) とは、温度偏差 T' が存在したときに、上昇・下降を通じて運動エネルギーに変わり得るエネルギーである。

そして移動性擾乱発達のエネルギー源としては、前述した傾圧的エネルギー変換 (CP) と潜熱エネルギーの解放 (CQ) の 2 つに加え、順圧エネルギー変換 (CK) も見積もる。この項も CP と同じく、基本場と擾乱場のエネルギーの変換を表すが、CP と異なり温度の偏差を必要としない。

$$CP = -\frac{f}{\sigma} v' T' \frac{\partial u}{\partial p} + \frac{f}{\sigma} u' T' \frac{\partial v}{\partial p} \quad (4)$$

$$CK = \frac{u'^2 - v'^2}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) - u' v' \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (5)$$

$$CQ = \frac{RT' Q'}{c_p p \sigma} \quad (6)$$

ここで、 f はコリオリパラメーターを表す。 Q は熱の発生・消失を意味するが、ここでは凝結加熱を水蒸気保存の式の残差から見積もった。実際には、これらの項を対流圏全体

にわたり鉛直積分（以下，[]で表示）し，[KE+APE]で表される移動性擾乱のエネルギーの増加が，主にどの項によりもたらされているかを調べる。

3. 結果

3.1 爆弾低気圧の分布と変化

前章で示した方法により，冬季（11-2 月）における爆弾低気圧をトラッキングした結果，北西太平洋域（120E-160W，20N-60N）において，29 年間（1979-2007 年）で 964 の爆弾低気圧を検出した。これらのトラックデータを用いて，爆弾低気圧の分布とその変化を調べる。

図 3(a)は冬季日本周辺において，爆弾低気圧の中心気圧が最も減少（「爆発」）する点の平均的な分布を表している。図 1 の●の数を全ての年（1979-2007 年）について各グリッドで平均し，さらにそれを周囲 9 点平均で平滑化している。爆弾低気圧が「爆発」する頻度は，まず日本海で大きく，日本列島をまたぎ，東北地方の東海上付近で最大となっている。そしてそこから東に向けて緩やかに減少しており，ほぼストームトラックに沿った分布といえる。またここでは示さないが，爆弾低気圧の頻度は 1 月に最も大きくなっ

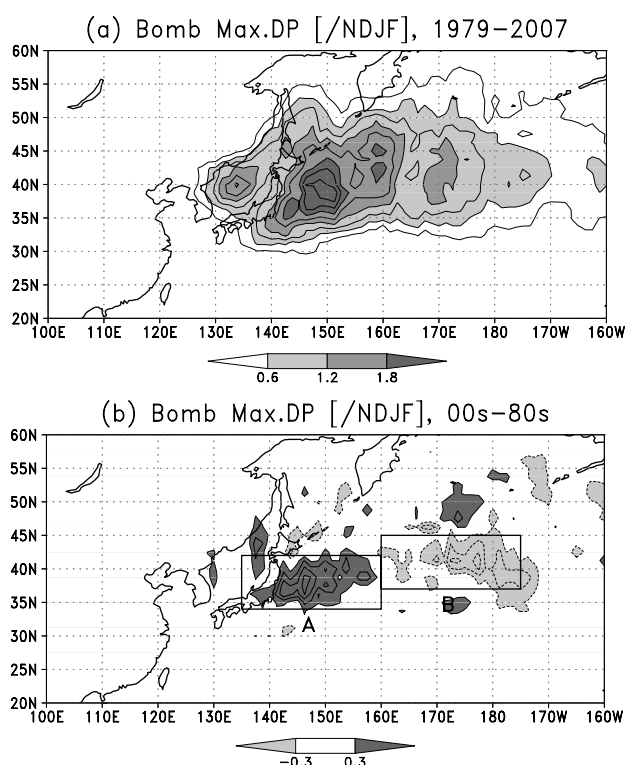


図 3 爆弾低気圧が最も発達する点の頻度分布。1 冬（11-2 月）あたりの頻度で表している。(a) は 1979 年から 2007 年の平均，(b) は近年（1994-2007 年）から過去（1979-1992 年）を引き去った分布。

Fig. 3 Frequency distribution of the maximum deepening point of bomb-cyclones for a winter (November to next February), for (a) the average between 1979 and 2007 and (b) the change from the former years (1979-1992) to the latter years (1994-2007).

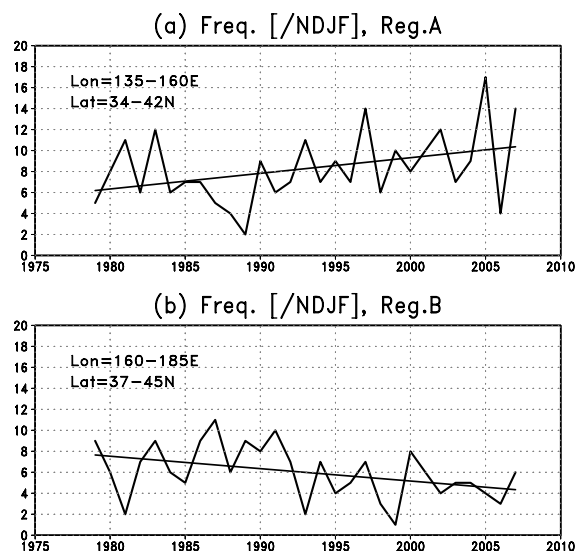


図 4 図 3(b)の(a)領域 A と(b)領域 B における爆弾低気圧の頻度の経年変化。直線は最少二乗法による線形トレンド。

Fig. 4 Inter-annual variations in the frequency of bomb-cyclones which recorded the maximum deepening over the region (a) A and (b) B in the Fig. 3. Linear regression lines are attached.

ており，これらの結果は Yoshida and Asuma (2004) ⁽⁴⁾などの先行研究と一致している。

そして，解析期間を前後 2 つに分け，近年（1994-2007 年）の平均から過去（1979-1992 年）の平均を引き去ったものが図 3(b)である。もともと「爆発」が起りやすい地域である日本列島の東海上（領域 A）でさらにその頻度が増加しており，逆に，その北東に位置する北部太平洋域（領域 B）では減少しているのが分かる。図 4 はそれぞれの領域での「爆発」頻度の経年変化である。領域 A では 1 冬に 8 個程度，領域 B では 6 個程度の「爆発」があることが分かるが，やはり領域 A では増加しており，領域 B では減少している。これらの線形トレンドを計算したところ，領域 A では 29 年間に 4 個程度の増加，領域 B では 3.5 個程度の減少を示し，t 検定の結果，どちらも 95%以上の有意性を示した。

この結果は，爆弾低気圧が「爆発」する地域が，北部太平洋域から日本の東海上へシフトして来ていることを意味している。従って，日本に影響を及ぼすような強い低気圧は増加していることが考えられる。前述したように，モデルを使った二酸化炭素増加時の将来予測からは，移動性低気圧の極向きシフトや強化が言われてきている。ここでの結果はより局所的な変化を示しており，これまでの研究とは必ずしも一致しない。

3.2 日本列島東海上での爆弾低気圧の増加

爆弾低気圧の頻度分布が過去（1979-1992 年）から近年（1994-2007 年）で変化した原因を調べるため，まず，領域 A で「爆発」した爆弾低気圧のうち，中心気圧の減少率が最も大きかったケースを，過去と近年について 10 ケースず

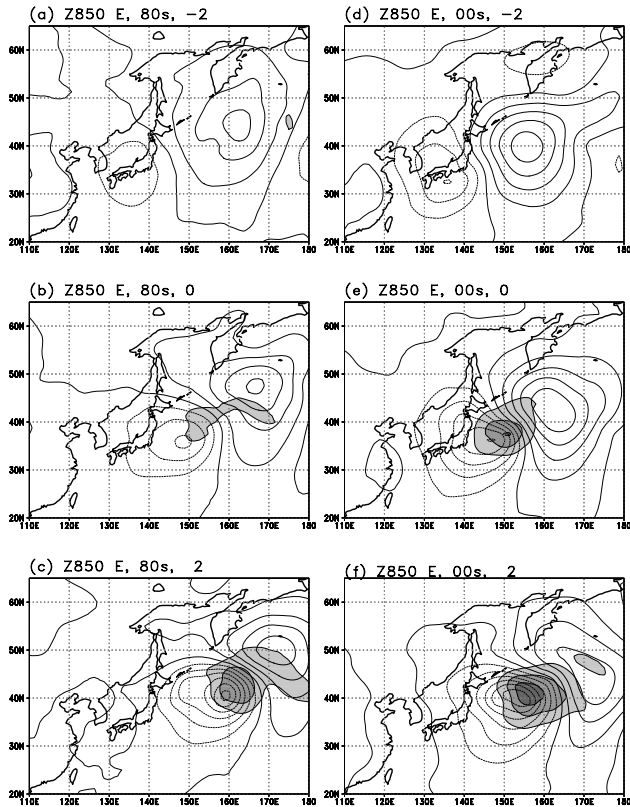


図 5 領域 A で発達する爆弾低気圧について、(a)-(c)1979-1992 年と(d)-(f)1994-2007 年の冬季について上位 10 ケースから合成した、850hPa 面高度(20m 間隔)と [KE+APE] (10^6Jm^{-2} 間隔, $2 \times 10^6 \text{Jm}^{-2}$ 以下は省いている) の移動性擾乱成分の、(b)(e)最も発達した時刻、(a)(d)その 12 時間前、(c)(f)その 12 時間後における分布。

Fig. 5 Time development of traveling components of the 850 hPa geopotential height (contours with 20 m interval) and mechanical energy [KE+APE] (contours and shadings with 10^6Jm^{-2} intervals, values less than $2 \times 10^6 \text{Jm}^{-2}$ are not shown) for (a)(d) 12 hours before and (c)(f) 12 hours after (b)(e) the maximum deepening time, composited for 10 bomb-cyclones which recorded maximum deepening over the region A for (a)-(c) 1979-1992 and (d)-(f) 1994-2007.

つ選択した。そして、過去と近年について、それぞれの爆弾低気圧が「爆発」した時刻を中心に前後 24 時間について、各時刻で基本場成分と移動性擾乱成分を平均し、時間発展する合成場を作成した。そしてこの合成場に対してエネルギー収支解析を行い、領域 A での爆弾低気圧の増加が何によりもたらされたのかを調べる。

図 5 は過去と近年で合成された移動性擾乱の時間発展を示しており、12 時間前、最も発達した時刻、12 時間後に、850hPa 面高度と対流圏で積分した擾乱エネルギー [KE+APE] の分布を表している。爆弾低気圧は、過去・近年のどちらにおいても、12 時間前には西日本上にあり、そこから急激に発達しながら北東方向に移動し、領域 A で「爆

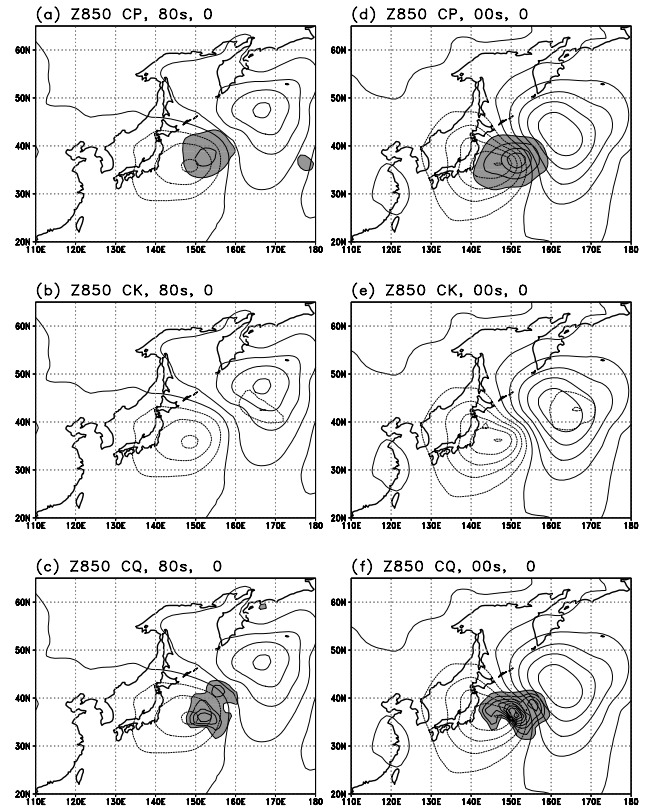


図 6 図 5 と同様。ただしすべて最も発達した時刻について示しており、850hPa 等圧面高度 (等値線) に加え、(a)(d)では[CP], (b)(e)では[CK], (c)(f)では[CQ] (陰影付き等値線, $0.5 \times 10^6 \text{Jm}^{-2}/6\text{hour}$ 間隔) を示している。

Fig. 6 The same as Fig. 5, but energy supplies of (a)(d) [CP], (b)(e) [CK], and (c)(f) [CQ] are shown (contours and shadings with $0.5 \times 10^6 \text{Jm}^{-2}$ intervals) in addition to the 850 hPa geopotential height for the maximum deepening time.

発」している。また、どちらもその前方には顕著な高気圧がある点も共通しており、その間で擾乱のエネルギーが大きくなっている。このことは、850hPa 面高度の等値線間隔が狭くなっていることや、それに伴う南風が暖気を移流してくることを考えれば、理解できる。しかし、擾乱エネルギーを近年と過去と比較すると、近年のほうが大きく発達していることが分かる。

このエネルギーが何から供給されているか調べるため、CP (傾圧的エネルギー変換)、CK (順圧的エネルギー変換)、CQ (水蒸気凝結によるエネルギー供給) を見積もる。図 6 は最も発達した時刻におけるそれぞれの効果を、過去・近年の合成場について示したものである。[CK] に関しては擾乱の発達に対してむしろ負の寄与を示しているが、[CP]・[CQ]ともにエネルギーが極大となる領域で正の寄与をしており、どちらも近年のほうが大きくなっているのが分かる。つまり、過去に比べ近年における爆弾低気圧の方が、[CP] や [CQ] によるエネルギーの供給が大きく、それがより急激に

低気圧を発達させたといえる。このことが領域 A で「爆発」する爆弾低気圧を増加させたことが考えられる。

しかし実際には CP と CQ は完全に独立した過程ではあり得ない。擾乱による北への暖気移流は CP を増加させると同時に上昇流を生じ、CQ も増加させることが考えられるし、また、凝結による大気加熱は暖気移流を増加させ、CP を増加させることも考えられる。

図 7 には、広域 (110-180E, 20-65N) で平均した擾乱エネルギーとその供給の時間変化を過去・近年に関して示している。擾乱エネルギーはやはり近年のほうが急速に増加しており、最終的に達する擾乱エネルギーの値も近年の方が大きい。擾乱へのエネルギー供給に関しても比較すると、擾乱の発達に対して [CK] は負の寄与をしており、過去と近年に顕著な変化は見られないが、[CP] と [CQ] は正の寄与を示しておりどちらも近年の方が大きくなっている。これらは図 6 で得られた結果と一致する。また近年での [CP], [CQ] の増加は、[CQ] では「爆発」以前から顕著であり、[CP] では「爆発」以降にわたり顕著になっていることが分かる。それぞ

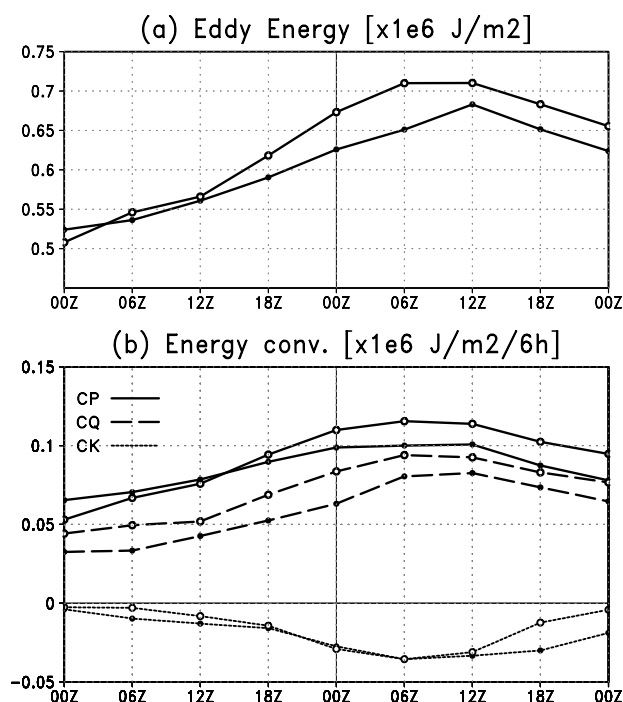


図 7 過去 (●印) と近年 (○印) で合成した領域 A における爆弾低気圧の、広域 (110-180E, 20-65N) 平均した (a) 移動性擾乱エネルギーと (b) エネルギー供給量の時間発展。「爆発」した時刻を 00Z とし、前後 24 時間について示している。

Fig. 7 Time development of area averaged (110-180E, 20-65N) values of (a) the disturbance energy [KE+APE] and (b) the energy supplies [CP], [CQ], and [CK], from 24 hours before to 24 hours after the maximum deepening time (00Z), composited for 10 bomb-cyclones which recorded maximum deepening over the region A in the former years (solid circles) and in the latter years.

れの近年における変化を t 検定したところ、[CQ] についてのみ 90% 以上の有意性を示した。これらの結果は、領域 A における近年の爆弾低気圧の増加に対して、CP よりも CQ が主導的な役割を果たしていることを示唆する。

3.3 北部太平洋域での爆弾低気圧の減少

領域 B で「爆発」する爆弾低気圧についても、中心気圧の減少率が大きいものから、過去・近年でそれぞれ 10 ケース選び、それから合成された場に対して同様にエネルギー収支解析を行った。その結果、CQ に加え CP の効果も爆弾低気圧の減少に関与しているという結果を得た (図省略)。しかし、ここで合成に使われた 10 ケースの爆弾低気圧は、過去に関しては概ね領域 B の南西から移動していたものの、近年に関しては南からや西からなど様々なものが含まれていた。従って、近年に対して作成した合成場には、過去の爆弾低気圧と異なるトラックのものが内在していることになる。これら 2 つの合成場を比較して得た結果は、エネルギー供給の変化なのか、トラックの変化によるものなのか特定できない。トラック別に分けるなど、さらなる解析が必要であろう。

3.4 強雨頻度の変化

CQ の変化は降水量の変化を意味する。急激に発達する爆弾低気圧の頻度の変化に CQ が寄与するならば、激しい雨の頻度にも変化が予想される。図 8(a) は 1979-2007 年の冬季 (11-2 月) における平均的な、40mm/day 以上の強雨の頻度分布である。強雨には降雪も含んでおり、また見やすいように頻度分布は周囲 9 点平均により平滑化している。この図から、低緯度に見られる熱帯性の強雨域の他に、日本から東に延びる強雨域が確認できる。これが移動性擾乱に伴う強雨域である。そして、図 8(b) に示す強雨頻度の過去と近年での変化を見ると、この領域の西で増加、東で減少を示しており、爆弾低気圧頻度の変化 (図 3(b)) と非常によく一致しているのが分かる。つまり、強雨が生じる領域が爆弾低気圧と共に西にシフトしてきていることを意味している。

降雨頻度の変化に関しては、近年世界各地で報告されており⁽¹⁵⁾、日本や東アジアにおいては、強雨の増加や無降雨日の増加などが言われている⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。またこれらの変化はモデルを使った温暖化シミュレーションでも確認されている⁽¹⁸⁾ことから、温暖化による影響と考えられるようになってきている。しかしこれらの結果は、通年もしくは集中豪雨の多い夏季に関して得られたものであり、冬季の強雨頻度の変化に関して多くの報告はなされていない。

4. まとめ

本研究では、再解析データ JRA25/JCDAS を用いて、冬季 (11-2 月) 爆弾低気圧の、過去 (1979-1992 年) と近年 (1994-2007 年) での変化を調べた。その結果、爆弾低気圧が最も発達 (「爆発」) する頻度が、北部太平洋域で減少し、

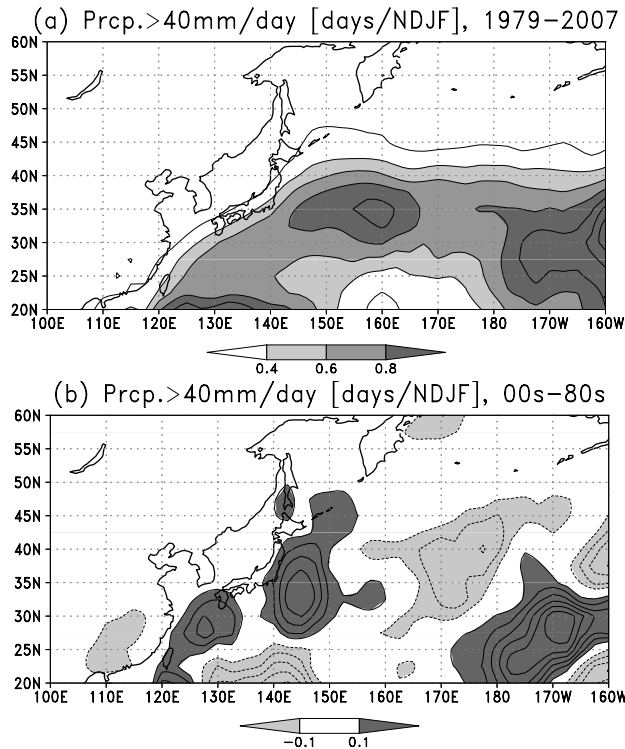


図 8 強雨 (40mm/day 以上) の頻度分布。1 冬 (11-2 月) あたりの日数で表している。(a) は 1979 年から 2007 年の平均, (b) は近年 (1994-2007 年) から過去 (1979-1992 年) を引き去った分布。

Fig. 8 Frequency distribution of intense precipitation (more intense than 40 mm/day) during a winter (November to next February), for (a) the average between 1979 and 2007 and (b) the change from the former years (1979-1992) to the latter years (1994-2007).

日本の東海上で増加していることが分かった。また同様な変化は強雨の頻度にも見られた。爆弾低気圧の頻度が変化した原因を調べるため、各領域で過去・近年に「爆発」した爆弾低気圧を合成し、その合成場に対してエネルギー収支解析を行った。その結果、どちらの領域で「爆発」する爆弾低気圧に対しても、その発達率の変化には、凝結加熱によるエネルギー供給の変化が寄与していた。つまり、爆弾低気圧の「爆発」領域の変化には強雨域の変化が関与している、というシナリオを支持する結果となった。

しかし前述したように、「爆発」領域の変化と、強雨領域の変化のどちらが原因でどちらが結果であるかは、本研究では断定できない。また、どちらであったとしても、その変化にはさらに原因があるはずである。ストームトラックの位置には、西風ジェットや暖流（黒潮）の位置が深く関与することを考慮すると、これらの変化が原因として有力視される。特に海流に関しては、日本の南海上で顕著な海面水温の上昇が確認できた。今後はこれら基本場の変化と、爆弾低気圧や強雨領域の変化の関係を明らかにする必要がある。

(平成 19 年 9 月 1 日受付)

文 献

- (1) 中村尚・三瓶岳昭：「寒候期における極東域の低気圧活動の特徴」, 天気, Vol.52, No.10 pp.31-33 (2005)
- (2) Sanders, F., and J. R. Gyakum : "Synoptic-dynamic climatology of the "bomb" ", Mon. Wea. Rev., Vol.108, pp.1589-1606 (1980)
- (3) 気象庁ホームページ: <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- (4) Yoshida, A., and Y. Asuma : "Structure and environment of explosively developing extratropical cyclones in the Northwestern Pacific region", Mon. Wea. Rev., Vol.132, pp.1121-1142 (2004)
- (5) Koing, W., R. Sausen, and F. Sielmann : "Objective identification of cyclones in GCM simulations", J. Climate, Vol.6, pp.2217-2231 (1993)
- (6) Lambert, S. J. : "The effect of enhanced greenhouse warming on winter cyclone frequencies and strengths", J. Climate, Vol.8, pp.1447-1452 (1995)
- (7) Geng, Q., and M. Sugi : "Possible change of extratropical cyclone activity due to enhanced greenhouse gases and sulfate aerosols - Study with a high-resolution AGCM", J. Climate, Vol.16, pp.2262-2274 (2003)
- (8) Lambert, S. J., and J. C. Fyfe : "Changes in winter cyclone frequencies and strengths simulated in enhanced greenhouse warming experiments: Results from the models participating in the IPCC diagnostic exercise", Climate Dyn., Vol.26, pp.713-728 (2006)
- (9) Ulbrich, U. et al : "Changing Northern Hemisphere storm tracks in an ensemble of IPCC climate change simulations", J. Climate, Vol.21, pp.1669-1679 (2008)
- (10) Yin, J. H. : "A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate", Geophys. Res. Lett., Vol.32, L18701 doi:10.1029/2005GL023684 (2005)
- (11) McCabe G. J., M. P. Clark, and M. C. Serreze : "Trends in Northern Hemisphere Surface cyclone frequency and intensity", J. Climate, Vol.14, pp.2763-2768 (2001)
- (12) Kalnay, E., et al. : "The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project", Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol.83, pp.1631-1643 (1996)
- (13) Onogi, K., et al. : "The JRA-25 reanalysis", J. Meteor. Soc. Jap., Vol.85, pp.369-432 (2007)
- (14) Kosaka, Y., H. Nakamura : "Structure and dynamics of the summertime Pacific-Japan (PJ) teleconnection pattern", Quart. J. Roy. Meteor. Soc., Vol.132, pp. 2009-2030 (2006)
- (15) IPCC : "Climate change 2001 : The scientific basis. Contribution of Working Group I to the third Assessment Report of the IPCC", Cambridge University Press, pp.881 (2001)
- (16) Iwashima, T., and R. Yamamoto : "A statistical analysis of the extreme events: Long-term trend of heavy daily precipitation", J. Meteor. Soc. Japan, Vol.71, pp.637-640 (1993)
- (17) Fujibe, F., N. Yamazaki, and K. Kobayashi : "Long-term change of heavy precipitation and dry weather in Japan (1901-2004)", J. Meteor. Soc. Japan, Vol.84, pp.1033-1046 (2006)
- (18) Kimoto, M., N. Yasutomi, C. Yokoyama, and S. Emori : "Projected changes in precipitation characteristics around Japan under the global warming", SOLA, Vol.1, pp.85-88 (2005)