

- Sea of Okhotsk, *J. Geophys. Res.*, **104**, 11137-11150.
- Mizuta, G., Y. Fukamachi, K. I. Ohshima and M. Wakatsuchi, 2003: Flow field and its seasonal variability of the East Sakhalin Current, *J. Phys. Oceanogr.*, **33**, in press.
- Moisan, J. R. and P. P. Niiler, 1998: The seasonal heat budget of the North Pacific net heat flux and heat storage rates, *J. Phys. Oceanogr.*, **28**, 401-421.
- Moroshkin, K. V., 1966: Water masses of the Sea of Okhotsk, Joint Pub. Res. Serv., 43942, 98 pp., U. S. Dept. of Commerce, Washington, D. C.
- Ohshima, K. I., M. Wakatsuchi, Y. Fukamachi and G. Mizuta, 2002: Near-surface circulation and tidal currents of the Okhotsk Sea observed with satellite-tracked drifters, *J. Geophys. Res.*, **107**, 3195, doi: 10.1029/2001JC001005.
- Ohshima, K. I., T. Watanabe and S. Nihashi, 2003: Surface heat budget of the Sea of Okhotsk during 1987-2001 and the role of sea ice on it, *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, in press.
- Ohshima, K. I., D. Shimizu, M. Itoh, G. Mizuta, Y. Fukamachi, S. C. Riser and M. Wakatsuchi, 2003: Wind-driven circulation in the Sea of Okhotsk, *J. Phys. Oceanogr.*, revised.
- Toyota, T., K. Baba, E. Hashiya and K. I. Ohshima, 2002: In-situ ice and meteorological observations in the southern Sea of Okhotsk in 2001 winter: ice structure, snow on ice, surface temperature, and optical environments, *Polar Meteorol. Glaciol.*, **16**, 116-132.
- Watanabe, K., 1963: On the reinforcement of the East Sakhalin Current preceding to the sea ice season off the coast of Hokkaido; Study on the sea ice in the Okhotsk Sea (IV), *Oceanogr. Mag.*, **14**, 117-130.
- 渡辺知弘, 2000: オホーツク海の表面熱収支, 修士論文, 北海道大学地球環境科学研究科, 57pp.
- Yamazaki, K., 2000: Interaction between the winter-time atmospheric circulation and the variation in the sea ice extent of the Sea of Okhotsk, *Seppyo*, **64**, 345-354.

104:105 (爆弾低気圧; 水蒸気輸送)

3. オホーツク海周辺で急激に発達する低気圧と水蒸気輸送

遊馬 芳雄*

1. はじめに

日々の気象衛星写真や天気図を見ていると、しばしば冬季にオホーツク海周辺から北西太平洋で急激に発達している低気圧をみかける。これらの低気圧は「爆弾低気圧」とも呼ばれ、高緯度の海上で急激に発達することから、しばしば海難の一因にもなっている。また、低気圧は中緯度帯から高緯度帯や極域に熱や水蒸気を供給する原動力で、地球規模のエネルギー収支や輸送、さらに、周囲に降水(降雪)をもたらすので、

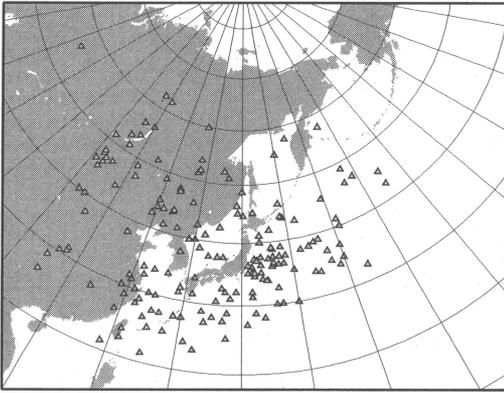
氷河、氷床等、雪氷圏の涵養にも大きな影響を与えている。

これら「爆弾低気圧」は Sanders and Gyakum (1980) や Roebber (1984), Gyakum *et al.* (1989) 等によって太平洋や大西洋での気候学的頻度分布や特徴が調べられている。さらに、大西洋域の低気圧は ERICA (Experiment on Rapidly Intensifying Cyclones over the Atlantic) や FASTEX (Fronts and Atlantic Storm Track Experiment) などの観測プロジェクトによって構造や特徴が詳細に調べられているが、日本周辺の北西太平洋域での低気圧の構造や特徴は必ずしも明らかになっていないように思う。

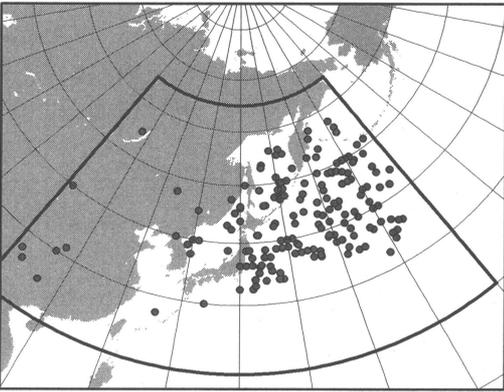
* 北海道大学大学院理学研究科。

© 2003 日本気象学会

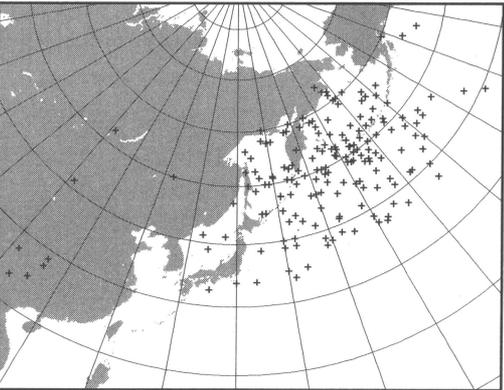
(a) FORMATION POSITION



(b) RAPID DEEPENING POSITION

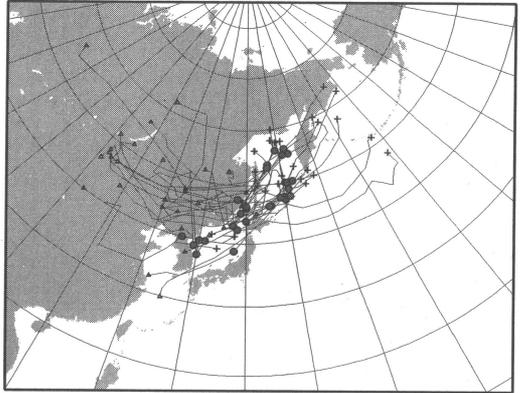


(c) MINIMUM SLP POSITION

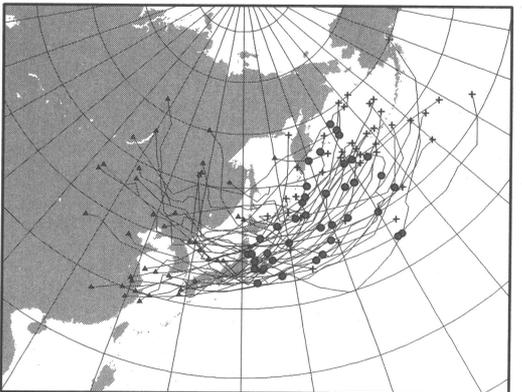


第1図 「爆弾低気圧」の (a) 発生位置と (b) 最大発達率位置, (c) 中心気圧最低位置。
(b) 図中の扇形領域は解析対象域を示す。△は発生位置, ●は最大発達率位置, +は中心気圧最低位置を示す。

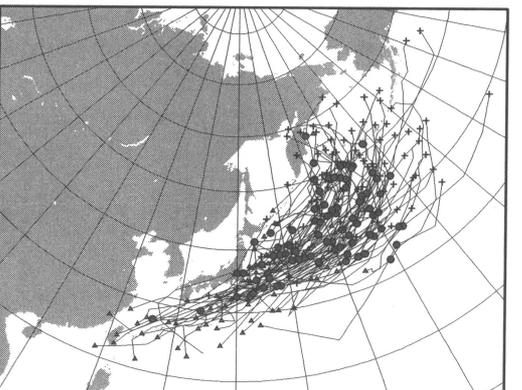
(a) OKHOTSK - JAPAN SEA TYPE



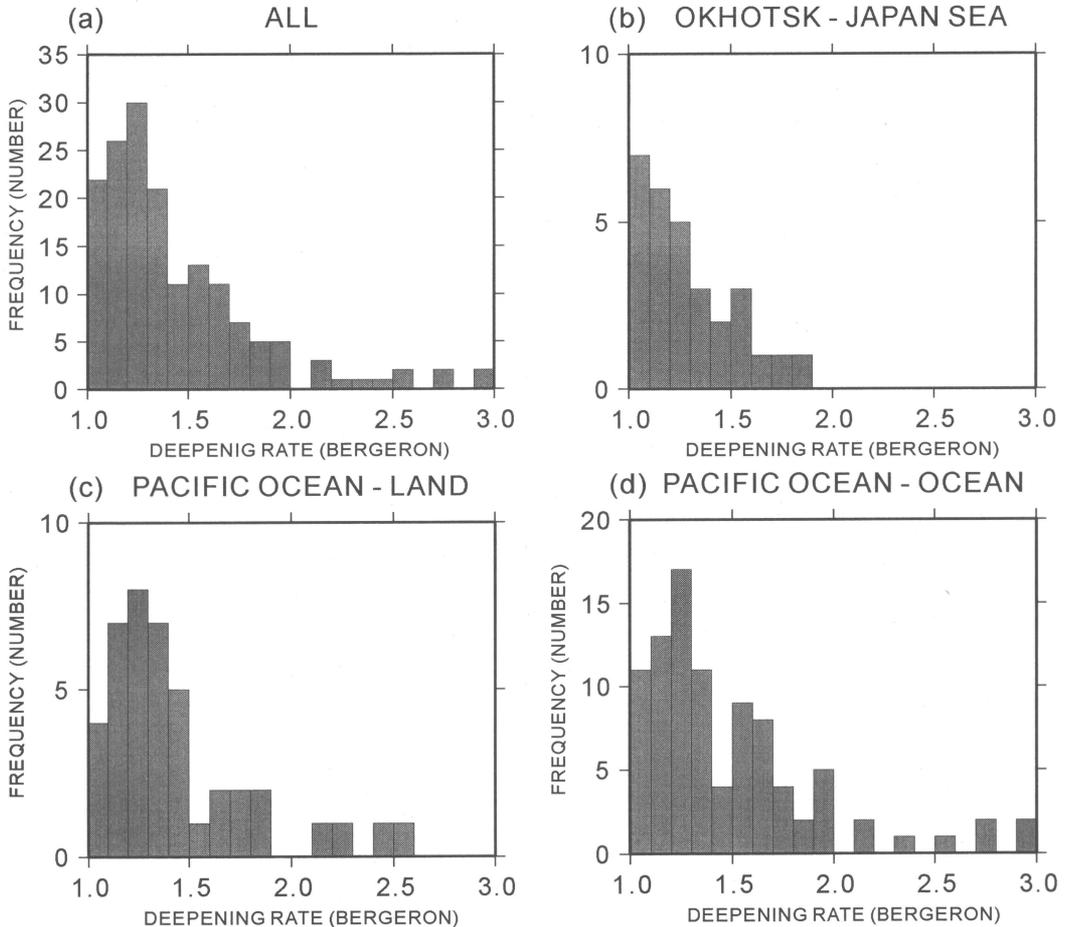
(b) PACIFIC OCEAN - LAND TYPE



(c) PACIFIC OCEAN - OCEAN TYPE



第2図 「爆弾低気圧」の3つのタイプ ((a) 日本海・オホーツク海タイプ, (b) 太平洋-大陸起源タイプ, (c) 太平洋-海洋起源タイプ) の発生, 最大発達, 中心気圧最低位置と経路。▲は発生位置, ●は最大発達率位置, +は中心気圧最低位置を示す。



DEEPENING RATE FREQUENCY

第3図 「爆弾低気圧」の最大発達率頻度分布。(a)「爆弾低気圧」全体、(b)日本海・オホーツク海タイプ、(c)太平洋-大陸起源タイプ、(d)太平洋-海洋起源タイプ。

この講演では、1994、1996、1997、1998年の10月から翌年3月までの4冬期間の気象庁全球客観解析データ(GANAL)をもとに、日本周辺での日本海・オホーツク海周辺からベーリング海にかけての北西太平洋で急激に発達する低気圧についての特徴と水蒸気輸送について述べる。

2. 「爆弾低気圧」の定義

ある時刻 t において低気圧が緯度 ϕ にある場合を考える。時刻 t を挟んで Δt 時間間隔離れた低気圧の中心気圧をそれぞれ $P_{(t-\frac{1}{2}\Delta t)}$ 、 $P_{(t+\frac{1}{2}\Delta t)}$ (単位は hPa) とする。この時、Sanders and Gyakum (1980) による緯度60度に規格化された発達率 (単位は Bergeron)

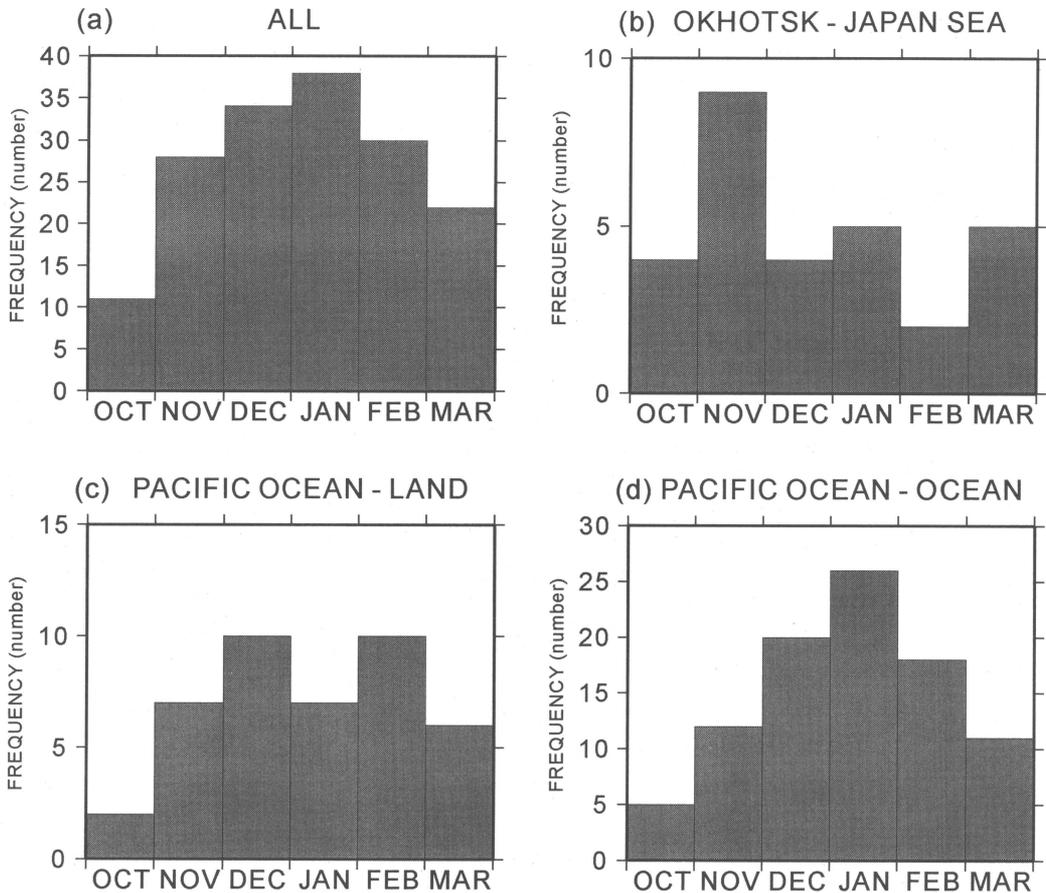
は次式で与えられる。

$$\frac{P_{(t-\frac{1}{2}\Delta t)} - P_{(t+\frac{1}{2}\Delta t)}}{\Delta t} \cdot \frac{\sin 60^\circ}{\sin \phi}$$

特に、1 Bergeron 以上の発達率が24時間以上持続する低気圧を「爆弾低気圧」と名付ける。以下でもこの定義に従う。

3. 「爆弾低気圧」の3つのタイプと気候学的特徴

1994、1996、1997、1998年10月から翌年3月までの気象庁全球客観解析データ(GANAL)を用いて、東経100度から180度、北緯20度から65度の領域を解析対象として「爆弾低気圧」を抽出した。その結果、4冬期



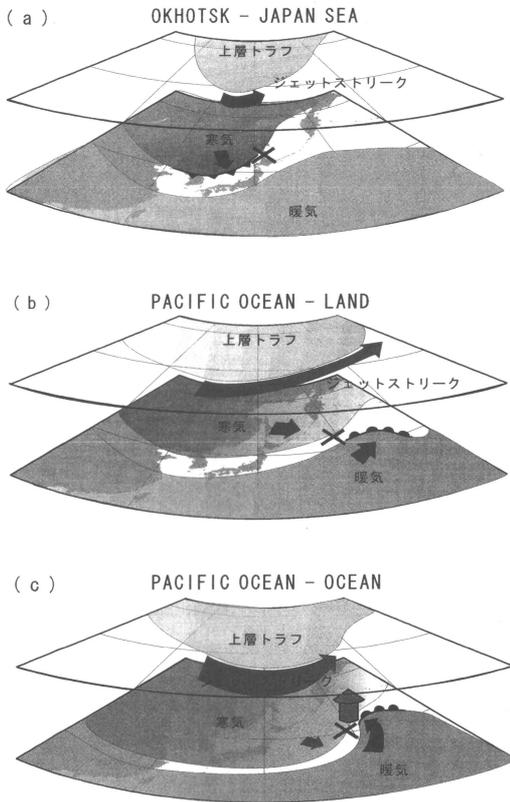
MONTHLY FREQUENCY

第4図 「爆弾低気圧」の月別発生頻度。(a)「爆弾低気圧」全体、(b)日本海・オホーツク海タイプ、(c)太平洋-大陸起源タイプ、(d)太平洋-海洋起源タイプ。

間全体で178事例見つけることができた。個々の低気圧の発生場所と最大発達率の位置、中心気圧が最低の位置を第1図に示した。低気圧の発生場所は「爆弾低気圧」の中心位置を逆にたどり、はじめて地上気圧場に1 hPaの閉曲線が出現した場所と定義した。いくつかの例外はあるが、最大発達率の位置は北緯約35度以上の海上で、日本海、オホーツク海、日本列島東方北西太平洋からベーリング海にかけて比較的狭い領域に分布している。一方、低気圧の発生場所は海上、大陸上に広く分布しているようである。

次に、最大発達位置と発生場所から「爆弾低気圧」を3種類のタイプに分類し、その発生位置、最大発達率の位置、移動経路を中心気圧が最低になるまでを第

2図に示した。3つのタイプとは、大陸上で発生し海上に出てすぐの日本海・オホーツク海上で急発達するタイプ(日本海・オホーツク海-大陸起源タイプ; Okhotsk-Japan Sea Type)、大陸上で発生し日本列島・樺太上空を通過し北西太平洋・ベーリング海上で急発達するタイプ(太平洋-大陸起源タイプ; Pacific Ocean-Land Type)、東シナ海から日本列島南岸沖の海上で発生し、日本列島の太平洋岸沖を通過し北西太平洋・ベーリング海上で急発達するタイプ(太平洋-海洋起源タイプ; Pacific Ocean-Ocean Type)の3つである。各タイプの発生数は4冬期間で日本海・オホーツク海タイプが29事例(16.3%)、太平洋-大陸起源タイプが44事例(24.7%)、太平洋-海洋起源タイプが92



第5図 「爆弾低気圧」の構造的特徴の概念図。
(a) 日本海・オホーツク海タイプ, (b) 太平洋-大陸起源タイプ, (c) 太平洋-海洋起源タイプ。

事例 (51.7%) であった。

「爆弾低気圧」全部と各タイプの最大発達率の頻度を第3図に示した。「爆弾低気圧」全体では1.1~1.3 Bergeronの低気圧が最も多く、平均値は1.4 Bergeronであった。最大発達率が大きくなると頻度は指数関数的に減っている。また、日本海・オホーツク海タイプは1.1~1.2 Bergeronが最大頻度で、平均値は1.3 Bergeron、1.9 Bergeronを超える低気圧は発生していなかった。太平洋-大陸起源タイプは最大頻度が1.2~1.3 Bergeron、平均が1.4 Bergeron、最大が2.6 Bergeronであり、太平洋-海洋起源タイプの最大頻度は1.2~1.3 Bergeronであるが、平均は1.5 Bergeron、最大が3.0 Bergeronであった。3つのタイプの中で太平洋-海洋起源タイプが発生数、最大発達率ともに最も大きく、次いで双方とも、太平洋-大陸起源タイプ、日本海・オホーツク海タイプの順であった。

「爆弾低気圧」全体と各タイプの月別発生頻度を第4

図に示した。「爆弾低気圧」全体では真冬の1月の発生頻度が最も多い。日本海・オホーツク海タイプは晩秋の11月に多く、2月に少ない。太平洋-大陸起源タイプでは12月と2月に多く、若干ではあるが1月は12月や2月よりも少ない。太平洋-海洋起源タイプは1月の頻度が最も多い。これらの最大発達率や月別頻度分布より、「爆弾低気圧」は、次のような傾向があることがわかる。太平洋-海洋起源タイプは真冬に多く発生し、発生頻度も最大発達率も3つのタイプのうち最も大きい。太平洋-大陸起源タイプは真冬よりもその前後に多く、発生頻度・最大発達率ともに2番目で、日本海・オホーツク海タイプは晩秋に多く発生して真冬には少なく、発生頻度、最大発達率ともに最も小さい傾向にある。次章では、各タイプの「爆弾低気圧」の構造的特徴について述べる。

4. 「爆弾低気圧」の構造

各タイプの「爆弾低気圧」の構造的特徴を調べるために最大発達率で規格化し、各タイプの最大発達率が1.3~1.8 Bergeronの中程度の発達率を持つ「爆弾低気圧」だけを使って、最大発達率時をキータイムとするコンポジット解析を行った。ここでは紙面の都合上、個々のコンポジット解析結果を示すことはしないが、その解析結果から得られた各タイプの「爆弾低気圧」の構造的特徴の概念図を第5図に示した。

「爆弾低気圧」はどのタイプでも基本的には上層の渦度移流と下層傾圧帯との相互作用によって生じているが、タイプによって構造的特徴に違いが見られた。

晩秋に発生頻度が多い日本海・オホーツク海タイプは大陸上で下部対流圏に形成される寒気は真冬ほど強くはない。大陸から海洋上に放出されてまもない日本海・オホーツク海上で発達するため海上での下層大気の気団変質が比較的少なく、北西風による大陸からの寒気吹き出しが下層大気の傾圧帯形成の主因となる。そのため、低気圧後面の寒冷前線強化が顕著に見られる。上層のジェット気流はあまり強くないが、短波による渦度移流は顕著である。低気圧の南東象限にある暖気中に含まれる水蒸気量もあまり多くなくて、中層での上昇流域と湿潤域の位置がずれている。下層湿潤大気の潜熱解放はあまり効率的には行われず、低気圧の発達にもあまり貢献していないようである。

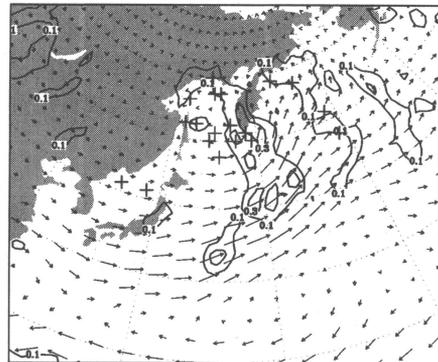
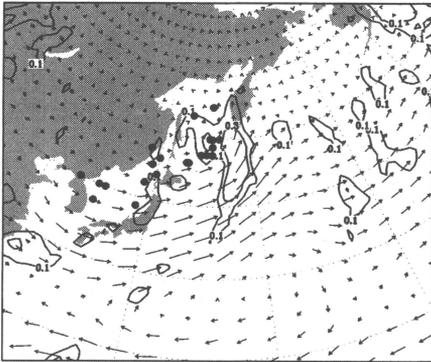
太平洋-大陸起源タイプでは大陸の寒気は日本海・オホーツク海タイプの場合よりは発達している。大陸から吹き出されて海洋上を長く吹走後に北西太平洋上で

RAPID DEEPENING

MINIMUM SLP

(a) OKHOTSK - JAPAN SEA

(b) OKHOTSK - JAPAN SEA

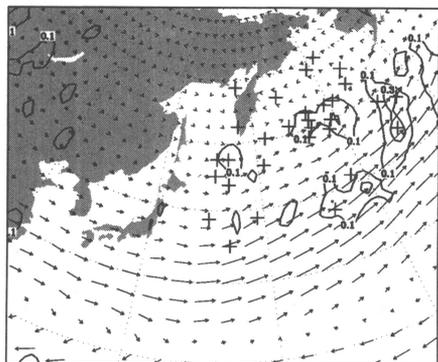
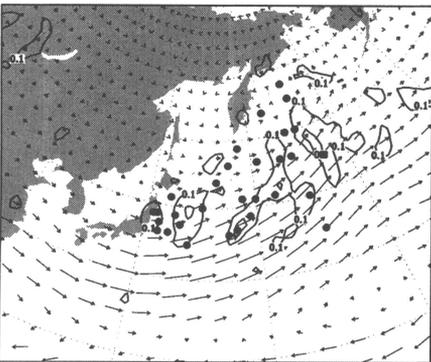


400 mm(m/s)

400 mm(m/s)

(c) PACIFIC OCEAN - LAND

(d) PACIFIC OCEAN - LAND

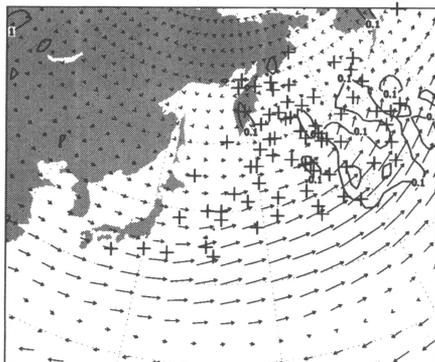
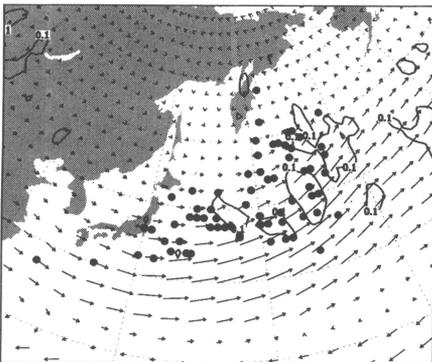


400 mm(m/s)

400 mm(m/s)

(e) PACIFIC OCEAN - OCEAN

(f) PACIFIC OCEAN - OCEAN



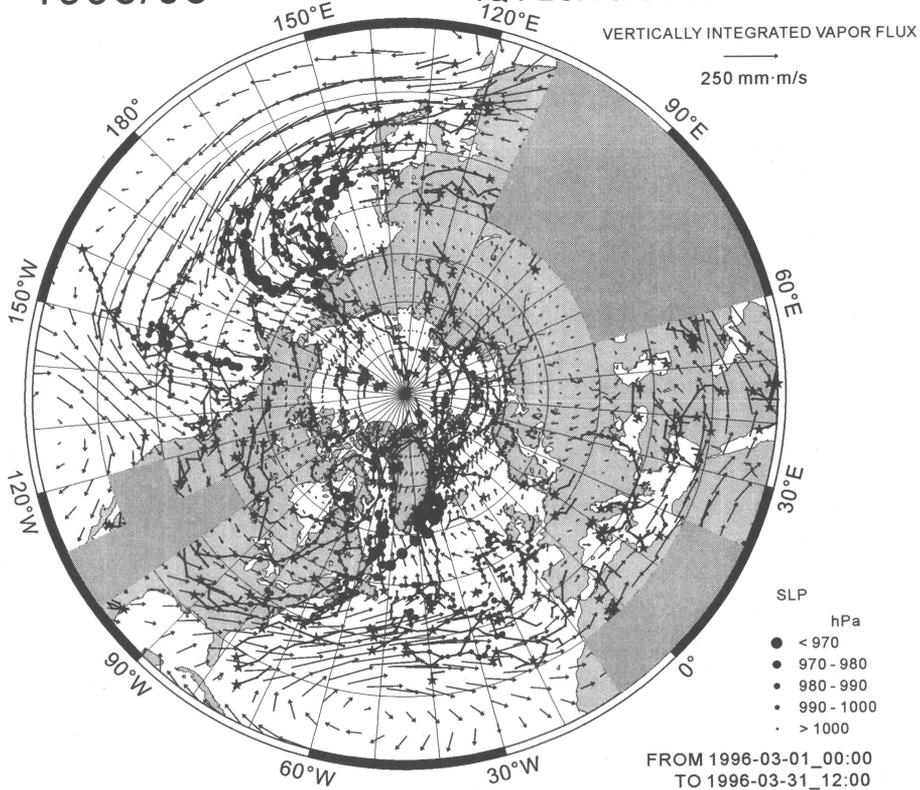
400 mm(m/s)

400 mm(m/s)

第6図 「爆弾低気圧」による鉛直積算水蒸気輸送(矢印)と降水(等値線:0.1, 0.3 mm/hour). 左列((a), (c), (e))が最大発達率時, 右列((b), (d), (f))が中心気圧最低時. (a), (b) 日本海・オホーツク海タイプ, (c), (d) 太平洋-大陸起源タイプ, (e), (f) 太平洋-海洋起源タイプ. ●は最大発達率位置, +は中心気圧最低位置を示す.

1996/03

IQ FLUX & STORM TRACK



第7図 1996年3月の低気圧トラック（実線と黒丸）と平均鉛直積算水蒸気フラックス（矢印）。低気圧位置を示す黒丸は中心気圧の低さに比例する。

発達するため、下層大気に形成される低気圧後面の寒冷前線は日本海・オホーツク海タイプほど顕著ではないが中層では顕著である。低気圧前面の温暖前線ははっきりしている。低気圧南東象限の暖気中に含まれる水蒸気量も日本海・オホーツク海タイプに比べるとはるかに多く、中層の上昇流域と湿潤域は近くにあるが完全には一致していない。上層のジェットは強く直線的で低気圧の中心を通り越して前方にまで延びている。

さらに、真冬に出現しやすい太平洋-海洋起源タイプは大陸からの寒気が最も発達している。この場合も大陸からの吹走距離が長いので低気圧後面の寒冷前線は、太平洋-大陸起源タイプと同様、下層ではあまりはっきりしていなくて中層では顕著である。低気圧南東象限の暖気中に含まれる水蒸気量は3つのタイプのうち最も多く、中層では上昇流域と湿潤域が一致していて、下層湿潤大気中の潜熱解放が効率的に行われ低気圧の発達にも大きく貢献している。上層ジェットは

最も南下し大きく蛇行しているの、コンポジット解析では南北方向の幅に広幅に解析される。低気圧の中心付近で上層のジェットが弱まりジェットの出口にあたっている。このことも低気圧前方での中・下層の湿潤暖気の移流による潜熱解放が効率的に行われていることを示唆している。

5. 「爆弾低気圧」による水蒸気輸送

前章で述べたように、下層大気の暖気と水蒸気の移流は潜熱解放を通じ低気圧の発達に寄与するが、逆に、発達した低気圧の顕熱や潜熱輸送は地球規模でのエネルギー収支や輸送、氷河や氷床等の雪氷圏の涵養に大きく関与する。低気圧そのものに注目した水蒸気輸送量は個々の事例の中心位置をあわせたコンポジット解析で調べた方がよいが、ここではそれぞれのタイプの低気圧がどこに水蒸気を輸送するかを示すために、緯度・経度を固定して最大発達率時と中心気圧が最低時の鉛直積算水蒸気フラックスと降水量のコンポジット

解析を行い、その結果を第6図に示した。降水量は鉛直積算水蒸気フラックスの発散量に可降水量の局所時間変化量を加えることで全気柱から減少する水蒸気量として求めた。図中の丸印が各々の「爆弾低気圧」の中心位置である。日本海・オホーツク海タイプの「爆弾低気圧」はカムチャッカ半島やベーリング海方向へ水蒸気を輸送し、その領域に降水をもたらしていることをコンポジット解析は示している。太平洋-大陸起源タイプの水蒸気輸送は最大発達率時にはベーリング海方向への水蒸気輸送も見られ、北極圏への輸送も示唆される。中心気圧の最低時には北向き輸送はあまりなく、ほとんどが東向き輸送となっている。一方、太平洋-海洋起源タイプは、最大発達率時は東向き水蒸気輸送が主で、中心気圧の最低時は北向き水蒸気輸送が増加し、北極圏への水蒸気輸送にも関与している可能性が伺える。

6. 低気圧による北極圏への水蒸気輸送

中緯度帯から北極圏への水蒸気輸送は主にノルウェー海上とベーリング海峡を通して行われ、この輸送には低気圧活動が大きく貢献していることが知られている。北半球全体での低気圧活動と水蒸気の南北輸送の関係を調べるため低気圧中心を自動的にトラックし、月毎に水蒸気南北輸送量と比較した。年毎の変動は大きく、一般にはベーリング海峡を通して北極圏への水蒸気輸送は夏季に多いが、晩秋から初冬にかけて、あるいは、冬の終わりに強い低気圧がカムチャッカ半島沖、あるいは、グリーンランド沖に停滞していることがしばしば見られる。この場所に低気圧が存在すると、低気圧の南東から北東に海洋が広がり、北極圏への水蒸気輸送がベーリング海上、あるいは、ノルウェー海上で効率的に行われる。その一例として、1996年3月1か月間の低気圧のトラックと平均鉛直積算水蒸気フラックスを第7図に示した。多数の低気圧がカム

チャッカ半島東方沖に存在し、ベーリング海峡を通じて北極圏に輸送されている様子が見られる。

7. まとめ

オホーツク海周辺の北西太平洋では「爆弾低気圧」と呼ばれる急激に発達する低気圧がしばしば見られる。本講演では、この「爆弾低気圧」の季節変化や構造的特徴を述べ、さらに、水蒸気輸送との関わりについて述べた。我が国では極域や高緯度地方の降水現象の解明は低・中緯度帯に比べると研究が少ない感があるが、現在、衛星による全球降水観測計画 (GPM: Global Precipitation Measurement) や雪氷圏と気候に関する研究計画 (CliC Project: Climate and Cryosphere Project) 等の研究計画、さらに、衛星によるリモートセンシング機器や航空機搭載レーダー・ライダー等の整備も進められているので、日本周辺での「爆弾低気圧」の研究は、今後重要な課題の1つになるであろう。

追記：本内容は主に北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻博士後期課程の吉田 聡君、同博士課程の加藤雅也君による研究を基にまとめた。

参考文献

- Gyakum, J. R., J. R. Anderson, R. H. Grumm and E. L. Gruner, 1989: North Pacific cold-season surface cyclone activity: 1975-1983, *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1141-1155.
- Roebber, P. J., 1984: Statistical analysis and updated climatology of explosive cyclones, *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 1577-1589.
- Sanders, F., and J. R. Gyakum, 1980: Synoptic-dynamic climatology of the "Bomb", *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 1589-1606.