

学 位 論 文 題 名

Environments and Structures of Explosively Developing Extratropical Cyclones in the Northwestern Pacific Region

(北西太平洋域における爆弾低気圧の発達環境と構造)

学位論文内容の要旨

冬季、北西太平洋域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観測される。この低気圧の正確な予報は難しく、海難事故や沿岸域に大雪などの被害を引き起こしている。また、地球規模での視点から眺めると、爆弾低気圧による熱や水蒸気の輸送は地球全体のエネルギー・水循環を考える上で重要な役割を担っている。しかしながら、この爆弾低気圧は海上で起こることや日本を通り過ぎてから起こることもあって、その性質やメカニズムについてはあまり明らかになっていないのが現状である。そこで本研究では、北西太平洋域で発達する爆弾低気圧の発達環境と構造を明らかにするため、気象庁全球客観解析データと数値実験を用いて解析を行った。

「爆弾低気圧」は北緯 60 度で規格化した中心地上気圧が 12 時間で 12 hPa 以上低下した低気圧と定義する。解析期間は 1994 年 10 月から 1999 年 3 月までの 5 冬季間で、解析領域は北緯 20 度から 60 度、東経 100 度から 180 度である。この期間、解析領域内で起こったすべての爆弾低気圧を抽出したところ、224 事例あった。これを発生から急発達までの移動経路によって 3 タイプに分類した。すなわち、大陸で発生して日本海、オホーツク海上の大陸近くで急発達する低気圧 (OJ タイプ)、同じく大陸で発生するが北西太平洋上で急発達する低気圧 (PO-L タイプ)、そして、海上で発生して北西太平洋上で急発達する低気圧 (PO-O タイプ) の 3 つのタイプである。まず、この 3 タイプに着目した統計的解析を行った。その結果、OJ タイプは晩秋、PO-L タイプは初冬と晩冬、PO-O タイプは真冬に発生頻度が多いという季節変化があること、PO-O タイプは最大発達率が大きいものが多く、PO-L タイプ、OJ タイプの順で発達率が小さくなることを示した。

次に、地理的に固定したコンポジット解析、すなわち、緯度経度を固定したコンポジット解析を行い、3 タイプの急発達時における惑星規模、総観規模の環境場の特徴を解析した。その結果、OJ タイプの爆弾低気圧は急発達時において、シベリアから中国大陆の上層に短波トラフがのび、下部対流圏には日本海からオホーツク海上の強い水平温度勾配 (傾圧帯) が存在していた。低気圧は上層トラフの東側傾圧帯内で急発達していた。PO-L タイプの爆弾低気圧は、日本南岸から東西にのびる上層ジェットの前側で、対流圏中層および下層に日本列島周辺から東にのびる傾圧帯付近で急激に発達していた。一方、PO-O タイプの爆弾低気圧は、日本南東上層に強いジェット気流が存在し、その北東側に位置する日本列島南東にのびる下部傾圧域で発達していた。これらの環境大気場の違いは、大陸上に形成される寒気の張り出し具合と上層ジェットと密接に関係しており、タイプによる発生頻度の季節変化がそれを反映していたことが明らかになった。

また、低気圧の中心を揃えたコンボジット解析と地表渦度の発達方程式を用いた診断解析によって、低気圧構造と発達要因についての解析を行った。その結果、OJ タイプは上層短波トラフの接近に伴う渦度移流と下部対流圏での傾圧域に付随した温度移流によって低気圧は急発達するものの、大気中の水蒸気が凝結する際に発生する潜熱放出の寄与はほとんどなかった。これは低気圧中心に流れ込む水蒸気量が少ないためと解釈される。PO-L タイプは低気圧中心付近を東西に横切る上層ジェット気流が顕著で、この強い西風による温度移流による発達が主であったが、潜熱放出の寄与は OJ タイプよりも大きいものの、低気圧中心からはずれていて低気圧の急激な発達にはあまり寄与していなかった。PO-O タイプでは、上層ジェット気流出口にあたる低気圧中心付近の上昇気流域に南から湿った空気が流れ込むことによって大量の水蒸気が降水に変換され、その際に発生する潜熱放出によって低気圧が急激に発達していたことがわかった。この潜熱放出の効果は発達率が大きくなるほど顕著になり、統計的解析から PO-O タイプに見られた大きな発達率は潜熱放出の寄与の増加が原因であることがわかってきた。低気圧中心付近の構造は大規模場の大気構造が反映されていて、それが発達メカニズムも影響を与えていて、3つのタイプによる発達率の違いや季節変化に現れていたことがわかった。

さらに、各タイプにおいて発達率が最大であった事例を典型例として、メソスケールモデルで数値的に再現し、低気圧の発達メカニズムと構造的特徴を解析した。急発達中の低気圧付近を通る気塊の流跡線解析結果には、先のコンボジット解析で得られた発達環境場と低気圧構造の特徴が顕著に現れていて、特に降水粒子を形成するような強い上昇域の重要性が認識された。この強い上昇流が水蒸気凝結による潜熱放出を効率的にもたらすためには必要であると考えられる。これを調べるため水蒸気凝結の際、潜熱放出の効果をなくした仮想的な数値シミュレーションを行い、通常の数値シミュレーション結果と比較した。その結果、どのタイプの事例においても低気圧の発達率は低下したが、OJ タイプ、PO-L タイプの事例では低気圧の構造自体の変化は小さく発達率の低下も小さかった。しかしながら、PO-O タイプの事例では潜熱の効果をなくすと、低気圧中心付近にあった上層ジェット気流出口付近での強い上昇流がなくなり、背の低い低気圧にしか発達しなかった。そして、この場合の低気圧の発達率は爆弾低気圧の基準にも達しないほど小さいものとなってしまった。この一連の数値実験によって診断的解析で得られた低気圧のタイプと潜熱放出との関係が具体的な発達例として裏付けられた。

さらに、低気圧の発生から最低気圧時までの水蒸気収支解析を行い、爆弾低気圧が水循環に果たす役割を考察した。その結果、OJ タイプの低気圧は日本付近の水蒸気をカムチャッカ半島およびベーリング海方面に輸送していた。また、PO-L タイプでは日本南岸の水蒸気を北東太平洋へと輸送し、PO-O タイプは東シナ海から日本南沖の水蒸気を北太平洋中央部へと輸送していた。低気圧の移動経路の変動は冬季北太平洋の水蒸気輸送経路にも大きな影響を与えるものと考えられる。

本研究によって、北西太平洋域の爆弾低気圧の活動は地球規模の大気環境場の影響を強く反映していて、大陸上に形成される寒気の季節変動と強く結びつき爆弾低気圧の移動経路が季節変化し、内部構造や発達メカニズムにも影響を与えているといった特徴が明らかになった。このような明確な移動経路の季節変動やそれに伴う内部構造の違いは北大西洋域での爆弾低気圧についてはあまり報告されておらず、北西太平洋域固有の特徴である可能性が考えられる。本研究は、爆弾低気圧の予測精度向上という学問的、防災面から重要な問題を解決するばかりでなく、爆弾低気圧を地球全体の大気システムの一部として捉え、地球規模でのエネルギーや水収支、物質輸送の問題、気候変動の問題を考える上でも重要であることを示唆している。本研究によってこれまで観測や研究例の少ない北西太平洋域の爆弾低気圧の特徴が明らかになりつつあるが、今後より詳細な構造の研究や実態、地球規模での気候変動との関連性などの解明が必要であると考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 林 祥 介

副 査 講 師 遊 馬 芳 雄

副 査 教 授 渡 部 重 十

副 査 教 授 山 崎 孝 治

(大学院地球環境科学研究科)

学 位 論 文 題 名

Environments and Structures of Explosively Developing Extratropical Cyclones in the Northwestern Pacific Region

(北西太平洋域における爆弾低気圧の発達環境と構造)

冬季北西太平洋域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観測される。この低気圧の正確な予報は難しく、海難事故や大雪などの被害もしばしば引き起こしている。さらに、この爆弾低気圧は熱や水蒸気輸送など地球規模のエネルギー・水循環においても重要な役割を担っていると考えられている。しかしながら、爆弾低気圧が海上で起こることや日本を通り過ぎてから起こることもあって、その性質や発達メカニズムについてはあまり明らかになっていない。本研究では、気象庁全球客観解析データと数値実験を用いて、爆弾低気圧の発達環境と構造について解析を行った。

この研究では、「爆弾低気圧」は地上中心気圧を北緯 60 度で規格化し、12 時間で 12 hPa 以上低下する低気圧と定義する。1994 年 10 月から 1999 年 3 月までの 5 冬季間に北西太平洋域で 224 事例の爆弾低気圧が抽出することができた。この爆弾低気圧を発生から急発達までの移動経路によって 3 つのタイプに分類した。すなわち、大陸で発生して日本海、オホーツク海上の大陸近くで急発達する OJ タイプ、同じく大陸で発生するが北西太平洋上で急発達する PO-L タイプ、そして、海上で発生して北西太平洋上で急発達する PO-O タイプである。まず、統計的解析から、OJ タイプは晩秋、PO-L タイプは初冬と晩冬、PO-O タイプは真冬に発生頻度が多いという季節変化があること、PO-O タイプは最大発達率が大きいものが多く、

PO-L タイプ、OJ タイプの順で最大発達率が小さくなることを示した。

次に、地理的に固定したコンポジット解析を行い、3 つのタイプの急発達時における惑星・総観規模の大気環境場の特徴を解析した。その結果、OJ タイプは、シベリアから中国大陆に上層短波トラフが、下部対流圏には日本海からオホーツク海上に強い水平温度勾配（傾圧帯）が存在し、低気圧はその傾圧帯内で急激に発達していた。PO-L タイプは、日本南岸から東西にのびる上層ジェット気流の北東側で、対流圏中・下層に日本列島周辺から東にのびる傾圧帯内で発達していた。一方、PO-O タイプは、日本列島南東の強い上層ジェット気流の出口付近で、下部対流圏に南東にのびる傾圧帯内で発達していたことがわかった。この大気環境場は、ユーラシア大陸上に形成される寒気と上層ジェットに密接に関連していて、爆弾低気圧のタイプによる発生頻度の季節変化や発達率の強さにも影響を与えていたことが明らかになった。

また、低気圧の中心付近大気のコンポジット解析と地上渦度発達方程式による診断によって、OJ タイプは上層渦度移流と温度移流、PO-L タイプは強い西風による温度移流、PO-O タイプは低気圧中心付近での水蒸気凝結の際の潜熱放出が低気圧の急発達に大きく寄与していたことがわかった。さらに、最も急発達した事例のメソスケール気象モデルで数値的に再現させることで上記の低気圧構造や発達メカニズムの違いが確認できた。

最後に、爆弾低気圧の水蒸気収支解析を行い、爆弾低気圧が地球規模での水循環に果たす役割を考察した。その結果、爆弾低気圧のタイプによって水蒸気輸送や降水をもたらす領域に特徴があることがわかった。

以上の一連の研究によって、北西太平洋域の爆弾低気圧の活動は地球規模の大気環境場を強く反映した内部構造や発達メカニズムの特徴を持っていることが明らかになった。この結果は、爆弾低気圧の気象学・大気物理学上の学問的問題や予報精度向上という実用的な問題を解決するばかりでなく、爆弾低気圧を地球大気システムの一部としてとらえ、地球規模でのエネルギーや水収支問題や気候変動問題を考える上でも重要な要因であることを示唆している。

これを要するに、著者は、これまであまり研究がなされていない北西太平洋周辺域での急激に発達する低気圧についての新知見を得たものであり、気象学、大気物理学に対しての学問的貢献をするところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格あるものと認める。