

学位論文要約

夏季アジアジェット上のロスビー波束の伝播及び砕波と 太平洋・日本パターンとの 関連性に関する研究 竹村 和人

第1章 はじめに

テレコネクションパターン（遠隔結合）とは、特定の季節に空間的に遠く離れた場所における大気循環場が互いに相関をもって変動する気象現象であり、数週間以上持続する異常気象の要因の1つとして知られる。夏季日本付近の天候に大きな影響を与える主要なテレコネクションパターンとして、シルクロードパターン（Enomoto et al. 2003）に代表されるアジアジェットに沿うロスビー波束伝播、及び太平洋・日本(PJ)パターン（Nitta 1987）の存在が知られている。これらのテレコネクションパターンの発現は、夏季日本付近を含む東アジア域における気温偏差及び降水の特性に大きな影響を及ぼし、異常気象をもたらす要因となり得る。Kosaka and Nakamura (2010)は、月平均の再解析データを用いたPJパターンの合成図解析の結果より、PJパターンとアジアジェットに沿うロスビー波束伝播に対応するシルクロードパターンの共存関係を示した。しかしながら、両者のパターンが関連する力学過程はこれまで明らかではなかった。一方、Takemura et al. (2016)は2016年8月平均場の事例解析より、アジアジェット出口付近におけるロスビー波の砕波が、北西太平洋亜熱帯域での活発な積雲対流活動をもたらすことを示した。彼らが示した結果より、アジアジェットに沿う波束伝播とPJパターンの力学的関連性に、砕波が重要な役割を演じていることが考えられる。

上記の研究背景を踏まえて、本研究では、まず大気の長期再解析データを用いて砕波事例のラグ合成図解析を行うことにより、アジアジェットに沿う波束伝播に伴って生ずる日本の東海上での砕波によって、PJパターンが発現する力学過程を明らかにする。また、砕波及びPJパターンの発現に関連するモンスーントラフ（以下、下層低気圧）の発達が顕著に見られ、北・東日本に大雨による甚大な被害をもたらした2016年8月後半の砕波事例に着目し、上記の力学過程の予測可能性について気象庁の現業アンサンブル予報データを用いて評価する。さらに、上記力学過程の発生頻度の気候学的な変動をもたらす環境場の特徴を吟味するため、日本付近からその東海上での砕波頻度の年々変動及び地球温暖化に伴う変化を調べ、関連する大気循環場の変化の特徴を明らかにする。

第2章 解析手法

本章では、本研究で用いた大気大循環場の特徴を解析するための主なデータを示す。大気循環場の特徴の解析には気象庁55年長期再解析（JRA-55; Kobayashi et al. 2015; 以下、解析値）を、海面水温の解析にはCOBE-SST(Ishii et al. 2005)をそれぞれ用いた。ここで、

気候値は、月平均値に関しては1981~2010年の30年平均値、日別値に関しては同30年平均値に60日の低周波変動成分を透過させるLanczosフィルター(Duchon 1979)を施した値で定義した。さらに、偏差は気候値からの差で定義した。エルニーニョ・南方振動(ENSO)の指標には、東部太平洋赤道域(5°S-5°N, 150°W-90°W)で領域平均した海面水温の前30年平均値からの差で定義されるNiño-3を用いた。また、2016年8月後半の砕波事例における予測可能性の評価には、気象庁1か月アンサンブル予報データを用いた。さらに、砕波頻度の将来変化及び関連する大気循環場の特徴を調べるために、「地球温暖化対策に資する気候予測データベース」(d4PDF; Mizuta et al. 2017)と呼ばれる大規模アンサンブル気候シミュレーションの出力結果を用いた。

本研究では、力学的対流圏界面(2PVU面)上における温位の南北勾配の逆転に基づく指数(Pelly and Hoskins 2003)を用いて砕波事例を抽出した。また、月毎の砕波頻度は、温位の南北勾配が逆転した日数の月全体の日数に対する割合で定義した。

第3章 夏季アジアジェットに沿う波束伝播とPJパターンとの力学的関連性

本章では、シルクロードパターンに代表されるアジアジェットに沿うロスビー波の波束伝播が、日本の東海上で生ずる砕波を通してPJパターンの発現をもたらす力学過程とそのメカニズムを明らかにした。はじめに、日本付近からその東海上にかけての領域で過去に発生した計44個の砕波事例を、力学的対流圏界面での温位南北勾配の逆転に対応するブロッキング指数(Pelly and Hoskins 2003)を用いて抽出し、それらの事例を対象とするラグ合成図解析を行った。その結果、対流圏上層では、砕波の発生に先行してアジアジェットに沿う波束伝播が強化し、これに伴って日本の東海上で高気圧性の砕波が生じていた。また、この高気圧性砕波は、対流圏上層での高渦位大気塊(High-PV)の南西方向への進入を促進し、北西太平洋亜熱帯域での積雲対流活動を活発化させることが分かった。さらに、High-PVの北西太平洋亜熱帯域への進入と活発な積雲対流活動との関連を、 \mathbf{Q} ベクトルを用いた準地衡風近似に基づく鉛直流の診断及び渦度収支解析により調べた。その結果、High-PVの進入に対応する対流圏上層での正渦度移流に伴う対流圏中層での力学的上昇流が、北西太平洋亜熱帯域での積雲対流活動の活発化に重要な役割を果たし、PJパターンを発現させることが分かった。次に、砕波44事例における大気循環場の比較解析を行うため、砕波の強度を表す指数によって事例を分類する合成図解析を行った。その結果、より強い砕波が生じた事例では、砕波に先行して生ずるアジアジェットに沿う波束伝播、及び砕波に引き続いて発現するPJパターンがより大きな振幅を持つことが分かった。さらに、砕波44事例の偏相関解析を行い、北西太平洋亜熱帯域における対流圏上層での砕波に関連する正渦度移流、及び海面水温偏差が、その領域での活発な積雲対流活動及びPJパターンの発現に及ぼす影響を定量的に評価した。その結果、上層でのHigh-PVの進入に対応する正渦度移流は、海面水温偏差と比べて、活発な積雲対流活動及びPJパターンの発現により大きく寄与することが分かった。これらの結果は、アジアジェットに沿う強い波束伝播及びそれに伴う日本

の東海上での強い砕波が、PJ パターンの発現に重要な役割を演じることを示している。

第 4 章 砕波と PJ パターンの持続性に関連する大気循環場の統計解析

本章では、第 3 章で示した力学過程に伴って同期的に発現する日本の東海上での砕波と PJ パターンの持続性に関連する大気循環場の構造を明らかにするために、ラグ合成図解析に用いた砕波 44 事例の統計解析を行った。まず、砕波及び PJ パターンの強度を表す指数を用いて砕波と PJ パターンの持続日数を定義し、持続日数が 12 日間以上の持続事例(計 7 事例)及び 5 日間以下の非持続事例(計 7 事例)に分類する合成図解析を行った。その結果、非持続事例と比べて、持続事例では砕波に先行してアジアジェットに沿う強い波束伝播が持続し、対流圏上層での強い砕波に関連する北西太平洋亜熱帯域への High-PV の進入、及びそれに伴う活発な積雲対流活動や大きな振幅を持つ PJ パターンの発現が明瞭であることが分かった。また持続事例では、日本の東海上での高気圧偏差が高度とともに北に傾く鉛直構造が持続し、このことに伴って対流圏上層の高気圧偏差すなわち砕波が、強化した太平洋高気圧の北側での対流圏中層における暖気移流偏差の影響を強く受けることにより、持続することが分かった。そこで、対流圏中層における暖気移流偏差が、断熱過程による日本付近からその東海上での対流圏中層の上昇流偏差に及ぼす影響を調べるために、第 3 章と同様に Q ベクトルを用いた診断及び偏相関解析を行った。その結果、対流圏中層での暖気移流偏差は、日本の西方に位置する上層のトラフに関連する正渦度移流偏差と比較して、日本付近からその東海上での対流圏中層の力学的上昇流とより密接に関連することが分かった。さらに、北西太平洋亜熱帯域における多量の水蒸気を含む大気が、強化した太平洋高気圧の周縁に沿って北上し、日本付近からその東海上での上昇流偏差に及ぼす影響を評価するため、持続事例、非持続事例、及び砕波 44 事例(全事例)における前方流跡線解析及び相関解析を行った。その結果、強化した太平洋高気圧の周縁に沿って北西太平洋亜熱帯域から日本の東海上に向かう水蒸気フラックス及びその収束もまた、非断熱過程を通して上昇流偏差と関連することが示された。また、砕波 44 事例における上昇流偏差の断熱成分と非断熱成分との相関解析を行った結果、前述したような断熱過程及び非断熱過程に伴う対流圏中層での上昇流偏差はともに持続日数と有意に相関し、両者の相関係数はほぼ同等の大きさであることが分かった。さらに、非持続事例と比べて、持続事例では日本付近からその東海上での上昇流偏差に伴う対流圏上層における渦管収縮が強く、このことが上層における砕波の強化及び持続と関連することが分かった。前述したような、強化した太平洋高気圧の北側における上昇流偏差による渦管収縮に伴って持続する砕波は、第 3 章で示した力学過程を通して、PJ パターンの持続にも影響を及ぼす可能性が考えられる。このことはさらに、中緯度-熱帯間及び対流圏上層-下層間における大気循環場の相互作用が、砕波及び PJ パターンの持続メカニズムに重要な役割を果たす可能性を示唆している。

第5章 2016年8月後半の砕波事例における下層低気圧の予測可能性

本章では、抽出した砕波44事例の1つである2016年8月後半の砕波事例に着目し、PJパターンの発現に関連する北西太平洋亜熱帯域での下層低気圧の予測可能性を評価した。まず、2016年8月16日12UTCを初期値とする気象庁1か月アンサンブル予報データを用いた解析より、アンサンブル平均予測場でのアジアジェットに沿う波束伝播、砕波に伴うHigh-PVの南西方向への進入、及び北西太平洋亜熱帯域での積雲対流活動は、いずれも解析値と比べて過小であり、下層低気圧の発達が予測されていないことが分かった。また、高度場のスプレッドの分布及びその時間発展を調べた結果、対流圏上層におけるスプレッドの極大域は、アジアジェットに沿う波束伝播や砕波に伴うHigh-PVの南西方向への進入に対応して下流側へ伝播し、下層低気圧の予測可能性に影響を及ぼすことが分かった。さらに、下層低気圧の予測可能性に影響を及ぼす初期摂動を特定するため、アンサンブル特異ベクトル法に基づく簡易予報感度解析(Enomoto et al. 2015)、及び気象庁全球モデルを用いた再予報実験を行った。その結果、高感度領域として特定された砕波域及びアジアジェット入口付近での初期摂動が、予測時間とともに下流側へ伝播して効率的に成長し、下層低気圧の予測可能性に影響を及ぼしたことが明らかとなった。

第6章 緩和予報実験による2016年8月後半の下層低気圧の予測可能性の検証

第5章で述べた2016年8月後半の砕波事例において、砕波及びアジアジェットに沿う波束伝播における予測誤差の軽減が、下層低気圧の予測に及ぼす影響を調べるため、気象庁全球モデルを用いて、2016年8月16日12UTCを初期値とする緩和アンサンブル予報実験を行った。まず、日本の東海上の砕波域及びユーラシア大陸上の波束伝播域におけるモデル予測値を解析値にナッジングした予報実験結果では、ナッジングを行わない予報実験と比べて、砕波及び波束伝播に関連するロスビー波の増幅をうまく再現し、対流圏上層での大気循環場の予測誤差も軽減されることが分かった。特に、上記のナッジングした予報実験では、High-PVの南西方向への進入及びそれに伴う日本の南東海上での活発な積雲対流活動がより良く再現され、予測5日目以降における下層低気圧の予測誤差が大幅に改善した。この結果より、砕波だけではなく、その上流すなわちユーラシア大陸上での波束伝播もまた、下層低気圧の予測と関連することが分かった。また、砕波域及び波束伝播域の双方をナッジングした予報実験では、一方のみをナッジングした予報実験と比べて、下層低気圧の再現性が高かった。この結果は、日本の東海上での砕波及びユーラシア大陸上の波束伝播の双方が、下層低気圧の予測に大きく影響することを示している。次に、日本の南海上から東海上での対流圏下層における大気循環場の再現性を定量的に評価するため、ナッジングした各予報実験における大気循環場の応答すなわちナッジングを行わない予報実験結果との差と、予測誤差及び解析値とのパターン相関を調べた。その結果、パターン相関は、全ての予報実験結果において大きな絶対値を持ち、砕波域及び波束伝播域の対流圏上層におけるモデル予測値のナッジングによって、対流圏下層の大気循環場の予測誤差が軽減され

ることが分かった。さらに、各実験における下層低気圧の強度の解析値に対する相対誤差をナッジングしない予報実験結果と比較した結果、相対誤差は、砕波域と波束伝播域の双方をナッジングした実験、砕波域のみをナッジングした実験、波束伝播域のみをナッジングした実験の順に改善することが分かった。これらの予報実験の結果は、下層低気圧の再現性の向上に対して、日本の東海上での砕波の予測誤差の軽減が最も重要な役割を果たし、次いでユーラシア大陸上における波束伝播の予測誤差の軽減が重要であることを示している。さらにこの結果は、第5章で示した簡易予報感度解析の結果とも整合的である。

第7章 日本付近における砕波頻度と関連する大気大循環

本章では、8月の日本付近における砕波頻度の年々変動と関連する海況及び大気循環場の特徴に関して、ENSOの影響に着目した解析を行った。その結果、8月の日本付近における砕波頻度は、La Niña発生年に気候値と比べて顕著に増加する傾向が示された。8月の日本付近での砕波頻度と海面水温及び大気循環場との回帰分析より、砕波頻度が多い年では、La Niña発生年に現れやすい海面水温偏差の分布と対応して、対流圏上層の太平洋中・東部で収束偏差、インド洋付近で発散偏差となり、インドネシア付近から太平洋でのウォーカー循環が気候値と比べて強化する傾向が示された。対流圏上層では、インド洋付近における発散偏差に伴って、ユーラシア大陸南部で北向き発散風が強化し、アジアジェットが強化及び北偏する傾向が見られた。このアジアジェットの変調に伴って、ジェット出口付近に位置する日本付近では西風の減速・分流が強化する。このことは砕波頻度の増加傾向と整合的である。また、アジアジェットの変調に対応して、ロスビー波の伝播特性が変化し、ジェットに沿うロスビー波活動が活発化する傾向も、日本付近での砕波頻度の増加と対応していた。さらに、砕波頻度の増加は、強化した中部太平洋トラフの西への伸張を促し、フィリピン付近における積雲対流活動を活発化させ、PJパターンが発現しやすくなる傾向をもたらしていた。一方、8月の日本付近での砕波頻度は、日本の地域平均気温偏差と統計的に有意な正の相関関係を示していた。これらの結果より、La Niñaの発生に伴う大気循環場の変調は、砕波頻度を増加させることにより、日本付近の高温偏差と密接に関連することが分かった。

第8章 地球温暖化に伴う夏季砕波頻度の変化

本章では、d4PDFを用いて、8月における北太平洋中央部での砕波頻度の将来変化、及びそれと関連する大気循環場の変化の特徴を調べた。まず、d4PDFの過去実験におけるENSOと砕波頻度との関連性を調べるために、全アンサンブルメンバーにおける北太平洋中央部での砕波頻度と、Niño-3との相関解析を行った。その結果、両者には負の相関すなわちLa Niña発生時に北太平洋中央部で砕波頻度が増加する傾向が見られ、解析値におけるNiño-3との関係性をうまく再現していることが示された。一方、全球平均気温が4°C上昇した場合の将来気候実験における北太平洋中央部での砕波頻度は、現在気候と比べて顕著

に減少する傾向が見られた。次に、この将来気候における砕波頻度の減少と関連する大気循環場の将来変化の特徴を調べた。その結果、将来気候では、南アジアから東南アジアでの対流圏上層において大規模発散場が弱化し、それに伴ってアジアジェットが南偏する傾向が明らかになった。このアジアジェットの変調に伴って、北太平洋中央部付近の対流圏上層では西風の減速・分流が弱化し、砕波頻度の減少と整合的である。また、将来気候におけるユーラシア大陸及び北太平洋でのロスビー波東伝播の強度は、現在気候と比べて弱化し、このことも砕波頻度の減少傾向と整合的である。一方、過去実験及び将来気候実験の全アンサンブルメンバーを用いた相関解析より、将来気候における北太平洋中央部での砕波頻度の減少は、フィリピンの東海上での積雲対流活動の不活化とも関連することが分かった。さらに、両者の力学的関連性を調べるために、準地衡風系での ω 方程式を用いた診断を行った。その結果、将来気候では砕波頻度の減少に伴って、中部太平洋トラフの北西太平洋亜熱帯域への伸張が弱化し、フィリピンの東海上で誘起される力学的上昇流が弱化することにより、積雲対流活動が不活化することが示された。

第9章 おわりに

本研究で示した日本の東海上における砕波事例のラグ合成図解析の結果より、アジアジェットに沿う波東伝播に伴って生ずる砕波が、High-PV の南西方向への進入及びそれに伴う北西太平洋亜熱帯域での積雲対流活動の活化を通して、PJ パターンの発現をもたらす力学過程の存在が明らかとなった。また、この力学過程によって生ずる砕波と PJ パターンの発現は数週間程度持続し得ることを、砕波事例の統計解析より示した。

次に、2016年8月後半の砕波事例における、PJ パターンに関連する北西太平洋亜熱帯域での下層低気圧発達予測可能性を調べた結果、PJ パターンの予測可能性は、ユーラシア大陸上の波東伝播域及び日本の東海上での砕波域における大気循環場の再現性に左右されることが分かった。

続いて、日本付近における8月の砕波頻度の年々変動が ENSO と有意に関連することに着目し、両者が関連するメカニズムを明らかにするために、砕波頻度と大気循環場との回帰分析を行った。その結果、ENSO に伴うウォーカー循環の強度の変動及びアジアジェットの変調が、砕波頻度の年々変動に影響を及ぼすことが明らかとなった。さらに、d4PDF を用いた解析より、将来気候における北太平洋中央部での砕波頻度は、現在気候と比べて顕著に減少することを示した。また、将来気候では、南アジアから東南アジアでの対流圏上層において大規模発散場が弱化し、それに伴ってアジアジェットが南偏する傾向が見られた。さらに、将来気候において北太平洋中央部付近の対流圏上層で西風の減速・分流が弱化する傾向、及びユーラシア大陸と北太平洋でのロスビー波の東向き伝播が弱化する傾向は、砕波頻度の減少と整合的であった。

本研究で明らかにした日本付近に顕著な高温偏差をもたらす大気循環場の力学過程、発現頻度及びその将来変化に関する知見は、夏季異常気象の発現メカニズムの解明及びその

予測可能性の向上を通して、盛夏期における気候リスクの軽減にも繋がることが期待される。