

石狩湾近郊に出現した冬季筋状雲の内部構造の解明

Clarification of the Internal Structure of Cloud Streets appearing near Ishikari Bay

北海道大学大学院工学院 ○学生員 橋本弾(Dan Hashimoto)
北海道大学大学院工学研究院 正員 山田朋人(Tomohito Yamada)

1. はじめに

例年 11 月の下旬から翌年の 3 月にかけて、日本海上では様々な降雪システムが出現する。これはユーラシア大陸から吹き出した寒冷で乾燥した空気が、相対的に温暖な日本海上で大量の水蒸気と顕熱の供給を受けて熱対流が発生し、気団変質が起こるからである。石狩湾近郊では、こうした降雪システムの 1 つとして平行に並んだ多数の雲列（以下、筋状雲）が頻繁に出現し同地域に降雪をもたらす。降雪は交通機関の停止やそれに伴う経済的な損失を生む原因となるため、降雪の予測精度を向上させることが必要不可欠である。現行の数値予報ではモデルが解像できない積雲対流の一部をパラメタリゼーションしており、予測精度の向上にはその高度化が求められる。しかし、モデルと相互検証するための観測事実は少なく、筋状雲の対流構造を観測から明らかにすることは重要である。

筋状雲は、上述した気団変質において発生した熱対流および海上と高度 1500m 付近における鉛直方向の風速・風向差（以下、鉛直シア）により形成される。また、筋状雲は風向に平行な平行型筋状雲と、直交する直交型筋状雲の 2 種類に分類される。一般的に鉛直シアは擾乱の発達を抑制する効果があるが、平行型筋状雲の場合はその影響を受けにくい²⁾直交型筋状雲よりも出現しやすい。このような筋状雲が陸域に流入した際に、水蒸気がどのような空間分布をもつかは明らかになっていない。筋状雲と水蒸気の空間的な関係から、その構造を明らかにすることは対流スケールの現象解明に繋がる。本研究では、2015 年から 2020 年に石狩湾近郊に出現した筋状雲を抽出し、出現時刻において水蒸気の空間的な分布を定量的に評価する。また、本研究では平行型筋状雲を対象とする。

2. 解析手法

(1) 対象期間と使用したデータ

本研究の対象期間は、2015 年から 2020 年の 11 月から 3 月である。水蒸気量は GPS (Global Positioning System) 観測で推定した GPS 可降水量（単位面積当たり存在する水蒸気を鉛直積算し、その全てが降水となる場合の降水量）を用いた。使用した GPS 観測のデータは、国土地理院が管理する石狩、札幌 2（以下、星置）、江別、長沼の 4 つの電子基準点である（図-1(a)の丸印）。筋状雲の抽出では、気象衛星ひまわり 8 号で観測された可視画像と黒体を仮定した物体からの放射温度である輝度温度を使用した。

(2) GPS 可降水量の観測原理

GPS 観測では、3 つ以上の GPS 衛星の電波を地上の受信機で受信する。その際に、地上の受信機では受信した電波と同じ周波数をもつ電波を生成する。生成した電波と受信した電波が同期するまでにずらしたビット数が伝

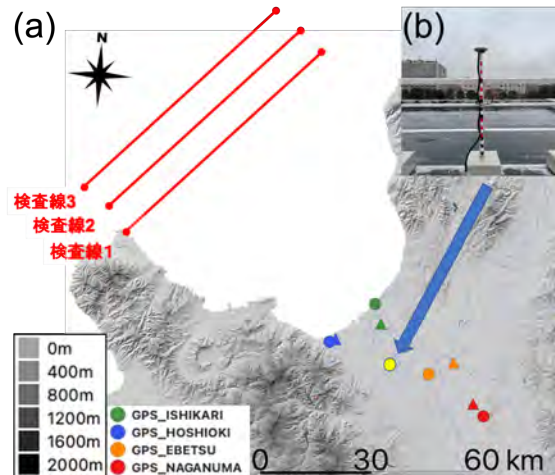


図-1 対象範囲（石狩湾近郊）の概要

(a) 丸印は GPS 観測地点を示す。赤線は検査線。(b) 北海道大学工学部屋上にて著者らが行った GPS 観測の写真（2020 年 11 月～2022 年 5 月）。

搬時間となる。伝搬時間に電波速度を乗算することで GPS と受信機間の距離を推定する。しかし、実際には外部要因に起因する遅延量が含まれている。外部要因とは主に以下の 6 つである³⁾。1) 衛星の軌道を推定する際に存在する摂動の影響、2) 衛星が地上と異なる慣性系を運動することで発生する時間のずれ（特殊相対論的補正）と地球の重力場の影響による衛星と地上の時間のずれ（一般相対論的補正）および地球の自転による効果、3) 高度 500～1000km の電離層に分布している自由電子によりその密度に比例し、電波の周波数の 2 乗に反比例するある量のみ電波が遅延すること、4) 高度 0～50km の対流圏に存在する大気分子と水蒸気分子が電波により励起されること、5) 異なる GPS の電波同士が干渉すること、6) 受信電波によりアンテナで受信する位置が異なること。

4) の水蒸気に起因する遅延を湿潤大気遅延という。この湿潤大気遅延に水蒸気分圧で重み付けをした大気平均気温の関数である (2) 式を乗算することで GPS 可降水量を推定できる。

$$PWV = \Pi \cdot ZWD \quad (1)$$

$$\Pi = \frac{10^5}{R_v \left(k'_2 + \frac{k_3}{T_m} \right)} \quad (2)$$

ここで、ZWD は湿潤大気遅延[m]、 R_v は水蒸気分圧 [hPa]、 k'_2, k_3 は物理的な係数、 T_m は大気平均気温 [K] である。

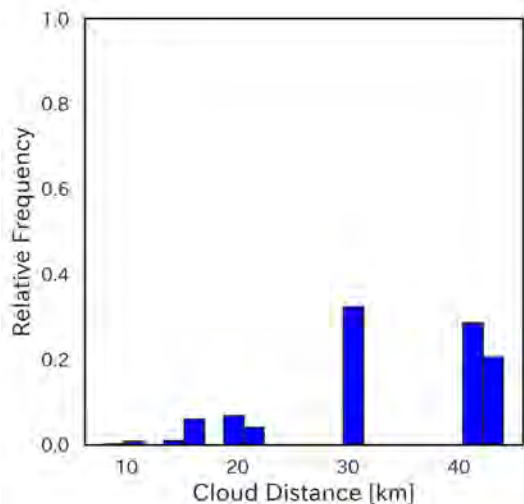


図-2 筋状雲の間隔距離の相対頻度分布。

(3) 筋状雲の抽出手法

衛星の可視画像から筋状雲の出現日を目視で選んだ。出現日の9～16時（JST）において10分毎に以下の手法で筋状雲の抽出を行った。筋状雲の走向と直交する向きに3つの検査線をおき、図-1(a)に示した各検査線上で観測された輝度温度を求めた。検査線上の輝度温度は、値が高い場所で筋状雲の晴天域、低い場所で雲域に対応する。各検査線上においてスペクトル解析を行い卓越する波の波長を特定した。波長は筋状雲の晴天域と雲域の間隔の距離に相当する。各検査線上で推定した筋状雲の間隔の距離が10%以内の差に収まる場合、筋状雲が存在するイベントである。

3. 結果

目視で選んだ筋状雲の出現日数は80日間であった。このうち輝度温度に基づき1日1イベント以上、筋状雲が抽出された日は77日間となった。全イベント数は3132イベント中772イベントである。6年間の年平均発生日数は12.8日であり、2020年が最多発生日数の年となった。また、6年間を通して3月は筋状雲が発生していなかった。図-2は筋状雲の間隔距離を示す。間隔距離が大きいイベントが多い傾向にあり、最大で44kmであった。

抽出された全772イベントを対象にGPS可降水量の空間的な分布を調べた。石狩、星置の2地点のうちどちらか一方が筋状雲の雲域、もう一方が晴天域に存在する場合について両地点のGPS可降水量を比較した。その結果を図-2に示す。解析対象となったイベント数は772イベント中364イベントであった。筋状雲の雲域で観測されたGPS可降水量は晴天域で観測されたGPS可降水量より平均で11%多いことがわかった。

続いて筋状雲が陸域に流入する石狩湾沿岸部から内陸にかけて雲域・晴天域それぞれについてGPS可降水量の減少量を調べた。沿岸部付近に位置する石狩と石狩から24km地点の江別、40km地点の長沼が同一の筋状雲の雲域に存在する場合は772イベント中233イベントであった。江別、長沼におけるGPS可降水量は、石狩で観測された値に対してそれぞれ平均15%、16%減少し

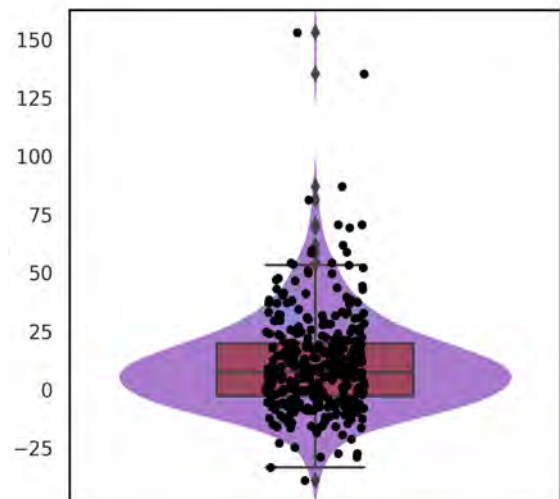


図-3 筋状雲の雲域と晴天域におけるGPS可降水量の比較。縦軸の割合が正のときは雲域におけるGPS可降水量が晴天域の値と比較して多い。全364イベント（772イベント中）、点は1イベントごとの比較。分布形状は紫で示す。

ていることがわかった。一方で3地点が晴天域に存在する場合は772イベント中107イベントであった。同様に江別、長沼におけるGPS可降水量は、石狩で観測された値に対してそれぞれ平均12%、17%減少していた。筋状雲の雲域において40kmで平均16%水蒸気量が減少する場合、鉛直風速を平均10m/sとおくと降水強度は0.72km/hrと概算できる。降雪量は0.72cm/hrとなり、オーダーとして良い値を示した。

4. まとめ

本研究では、2015年から2020年までの11月から3月の期間に出現した筋状雲の抽出を行い、GPS可降水量の空間分布との関係を定量的に評価した。筋状雲は6年間を通して77日間出現していた。また雲域と晴天域においてGPS可降水量の比較を行い、雲域におけるGPS可降水量が晴天域と比較して平均11%多いことがわかった。また陸域に流入した筋状雲の雲域では、沿岸部から内陸部にかけて24kmで平均15%、40kmで平均16%減少していた。一方で晴天域の場合は、24kmで平均12%、40kmで平均17%減少していることがわかった。このような定量的な情報から物理過程を解明し気象モデルに取り込むことで予測精度の向上が期待される。今後は、XバンドMPレーダーを用いたMUSCAT法による3次元風速場解析を行い、より詳細な検討を行う予定である。

5. 参考文献

- 1) 気象庁予報部、「メソスケール気象予測の現状と展望」、数値予報課報告・別冊第66号、2020年3月、気象庁予報部。
- 2) 浅井富雄、「大気対流の科学」、1983年、東京堂出版。
- 3) 杉本末雄、柴崎亮介、「GPSハンドブック」、2010年、朝倉書店。

謝辞：本研究の遂行にあたっては文部科学省気候変動予測先端研究プログラムJPMXD0722680734、科研費基盤研究(B)22H01594、ArCs II(Arctic Challenge for Sustainability)の支援を受けた。