

石狩湾近郊における筋状雲の出現特性と GPS 可降水量の関係

Relationship between the Appearance Characteristics of Streaky Clouds and GPS Precipitable Water Vapor 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

冬季の石狩湾近郊では、日本海海上から筋状の雲列群(以下、筋状雲：図-1-(a))が内陸部へ流入することで降雪となることが多い。大雪は社会や経済活動の障害となる。これに加えて、積雪は同地域において雪解け時期の水資源となることから、降雪をもたらす筋状雲の実態解明は重要である。冬季の日本海海上では、北西から吹く寒冷な季節風と相対的に温暖な海面との温度差により大気が不安定となり、対流が発生する。各対流システムは、周囲の空気が収束する収束域と、収束域の上空で発散された空気が上層から下層へ吹きつける発散域で構成される。収束域では、海面から大気へ供給された水蒸気が取り込まれ上昇し、ある高度で凝結することで雲が発生する。各収束域で形成された雲群が上層と下層の風向・風速差(以下、鉛直シア)により風下方向に流されることで筋状雲を形成する。土屋・藤田(1967)¹⁾は、水平風の鉛直シアが 7×10^{-3} m/s 以上の場合、風向に平行な雲となることを示した。また岡林(1972)²⁾は、筋状雲の形状と降雪強度の関係について調べ、筋状が乱れると降雪強度が強まることを示した。三浦(1982)³⁾は、2機の気象衛星とラジオゾンデの観測データより筋状雲の水平スケールが大きくなると雲頂高度が高くなることを示した。しかし、筋状雲の発生要因となる水蒸気と筋状雲の空間的な関係に着目した研究は少ない。観測事実に基づいて筋状雲の形成機構を解明し、その結果を気象モデルのパラメタリゼーションに利用することで気象予測精度の向上に寄与することが期待される。

現行の水蒸気観測は、1日2回全国16ヶ所で高層大気の概況を観測しているラジオゾンデ観測、可視赤外放射計を搭載した気象衛星ひまわりによる10分毎の面的な観測、全地球測位衛星システム(Global Positioning System; 以下、GPS)を用いたGPS観測が存在する。GPS観測は、観測地点の上空に存在する水蒸気がすべて凝結した場合の降水量(以下、可降水量)を5秒間隔で観測できるため、時空間的な変動が激しい水蒸気観測には有効である。GPS観測の観測量は、GPSから射出されたマイクロ波の地上までの伝搬距離である。その伝搬経路上でマイクロ波は、様々な影響を受け遅延する。地上から高度50kmまでの対流圏内で水蒸気分子による遅延が発生するため、その遅れ時間から観測地点の上空における可降水量が測定可能となる。国土地理院では、全国1300ヶ所以上の観測点を有するGPS観測網GEONET(GNSS Earth Observation Network System)を展開している。

本研究では、ひまわり8号が運用開始された2015年から2021年の冬季期間11月から3月において、石狩湾から札幌市近郊に流入していた筋状雲を対象に、その頻度と抽出された筋状雲の収束域・発散域における可降水量の空間分布を定量的に評価した。

2. データと解析手法

2.1 対地域と使用したGPSデータ

対象期間は、2015年から2021年の冬季期間11月から3月である。同期間、石狩湾に面したGEONET観測地点である石狩、星置の2地点において観測されたデータを使用した(図-1(b))。毎日9時から12時(日本時間)までの3時間は、観測データの取り出しに伴うロガーの停止により、GPS受信機が位置情報の校正に要する時間であるため、解析対象から外した。

2.2 筋状雲の特定と分類

筋状雲の存在の確認は、気象衛星ひまわり8号の可視画像を用いて目視で行った。可視画像は日の出から日没までの9時から16時(日本時間)が解析可能である。2.1節に記した通り、9時から12時の3時間を除く12時から16時(日本時間)について、筋状雲の存在が確認された日数は80日間である。その内、北西方向より内陸部に流入していたイベントを解析対象とした。GPS観測地点が筋状雲の収束域・発散域であるかの判別については、ひまわり8号の可視画像と大気中の減衰率が他の波長と比較して小さいBand15(中心波長:12.4 μ m)の輝度温度画像を用いた。両者の比較から、輝度温度が256K以下を収束域の閾値とした。以上の定義で、10分毎を1事例とし、筋状雲の収束域と発散域における可降水量を比較した。また、筋状雲の雲間隔距離は検査断面上(図-1-(b))の輝度温度に対して高速フーリエ変換し、卓越する波の波長を距離に変換し算出した。

2.3 可降水量の算出方法

本節では、可降水量の算出方法について詳述する。対流圏内におけるマイクロ波の遅延量(以下、大気遅延量)は、(1)式で表される大気遅延を引き起こす大気屈折率⁴⁾を伝搬経路上で積分することで求まる。

$$10^6[n-1] = k_1 \left(\frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1} + k_2 \left(\frac{P_v}{T} \right) Z_v^{-1} + k_3 \left(\frac{P_v}{T^2} \right) Z_v^{-1} \quad (1)$$

ここで、 T は気温(K)、 P_d と P_v はそれぞれ乾燥空気と水蒸気の分圧(hPa)と水蒸気分圧(hPa)である。 Z_d^{-1} と Z_v^{-1} は乾燥空気と水蒸気の圧縮率の逆数であり、 k_1 、 k_2 、 k_3 は実験から得られた物理係数である。天頂方向の大気遅延量は、大気遅延量と状態方程式から(2)式の通り表される。

$$\Delta L_{Zenith} = 10^{-6} \left[k_1 \int \frac{R\rho}{m_{a}g_m} dz + k_2 \int \left(\frac{P_v}{T} \right) Z_v^{-1} dz + k_3 \int \left(\frac{P_v}{T^2} \right) Z_v^{-1} dz \right] \quad (2)$$

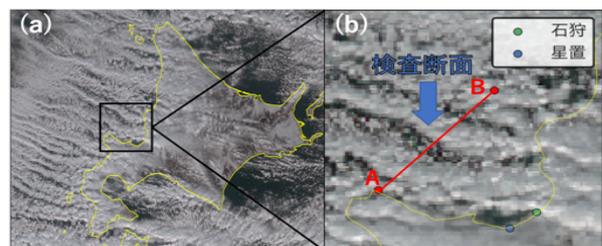


図-1 (a)は気象衛星ひまわり8号で観測された筋状雲の可視画像(2020年12月15日12JST)、(b)は観測領域であり、緑は石狩のGPS観測地点、青は星置のGPS観測地点。AB間は検査断面線を示す。

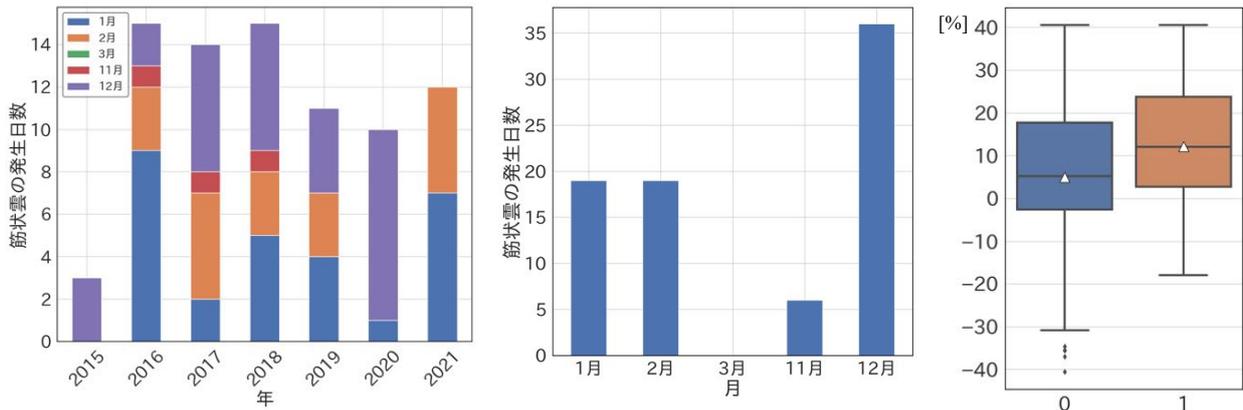


図-2 (a)は2015年-2021年の11月-3月における筋状雲の出現頻度の図. 2015年の1,2,3月と2021年の11,12月は含まれていない. (b)は2015年-2021年の11月-3月における月別の筋状雲の出現日数の図. 2015年の1,2,3月と2021年の11,12月は含まれていない. (c)は GEONET 観測地点の石狩と星置において観測された地上の水平風の収束域における可降水量に対する発散域における可降水量の割合. パターン 0, 1 はそれぞれ, 雲間隔距離が 10km 未満の場合と 10km 以上の場合である. GPS による観測範囲は観測点から上方に対して逆円錐形に観測するため, 雲間隔距離 10km 未満の場合, 複数の収束域・発散域が含まれることに留意が必要.

$$k'_2 \equiv \left(k_2 - k_1 \frac{m_v}{m_a} \right) \quad (3)$$

$$g_m = \frac{\int \rho g dz}{\int \rho dz} \quad (4)$$

R (J/kmol K) は普遍気体定数, ρ (kg/m³) は大気密度, g_m は(4)式で表される大気柱の重力加速度の平均値, z (m) は高さ, m_v, m_a (kg/kmol) はそれぞれ水蒸気と乾燥空気の分子量である. (4)式の右辺第2, 3項が水蒸気と温度に依存するパラメータである. これらの項を積分したものが水蒸気に起因する遅延量であり, 天頂湿潤遅延量 (Zenith Wet Delay; 以下, ZWD) と呼ばれる. Askne・Nordius⁵⁾によると, 可降水量 (Precipitable Water vapor; PWV) は ZWD に変換係数 Π を乗じることで算出できる.

$$PWV = \Pi \cdot ZWD \quad (5)$$

$$\Pi = \frac{10^5}{R_v \left(k'_2 + \frac{k_a}{T_m} \right)} \quad (6)$$

ここで, R_v (J/K kg) は水蒸気の気体定数, T_m (K) は大気中の気温の鉛直分布を水蒸気分圧により重み付けられた荷重平均気温である.

3. 結果と考察

2015年から2021年までの6年間の内, 11月から3月の冬季期間において, 石狩湾に対して海上より流入していた筋状雲の出現日数を図-2-(a)に示す. 5ヶ月分のデータが揃う2016年から2020年までの期間において, 筋状雲の出現日数は減少傾向といえる. 図-2-(b)に月別の筋状雲の出現日数を示す. 最多は12月(36日間)であり, と次いで1,2月(19日間), 11月(6日間)であった. 筋状雲が出現した80日間のうち, 石狩湾に対して北西方向から流入していた筋状雲の出現日数は34日間(1054事例)である. その内, 明瞭な筋状構造を保持していた事例は135事例であった. さらに同時刻のイベントについて, 石狩と星置の2地点においてどちらかが収束域(上空に雲が存在する)であり, もう一方が発散域(上空に雲が存在しない)であるイベントは59事例であった. 該当事例について, 収束域における可降水量に対する発散域における可降水量の割合を図-2-(c)に示す. 59事例の内, 19事例が雲の間隔距離距離が10km未

満の場合であり, 残りの40事例は間隔距離距離が10km以上の場合である. それぞれパターン0, パターン1とした. パターン0では, 収束域における可降水量は, 発散域における可降水量に対して平均5%程度多く, パターン2では, 平均16%多いことを示した. GPSによる観測範囲は観測点から高度とともに逆円錐形に広がるため, 雲間隔距離10km未満の場合, 複数の収束域・発散域が含まれることに留意が必要. 一方, 雲間隔距離が大きくなると収束域もしくは発散域のどちらか一方がGPS観測範囲に含まれるため, パターン0と比較してパターン1の発散域に対する収束域の可降水量の割合が大きくなったと推測される.

4. まとめ

降雪により都市機能の低下や交通機関の麻痺をもたらす冬の筋状雲は, 防災の観点から重要である. 本研究では, 筋状雲の出現特性とその発達源となる水蒸気の空間的な関係について定量的に示した. また, 10km以上の雲間隔距離をもつ筋状雲の地上の水平風の収束域では, 発散域と比較して可降水量が平均的に16%程度多いことが確認された. 今後, 16%の差が筋状雲の発達にどのように寄与しているのかについて詳細に調べる必要がある.

謝辞

本研究の遂行にあたっては, 挑戦的研究(開拓)20K20352および科研費科研費基盤研究(A)19H00815並びに, 文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム領域テーマC「統合的気候変動予測」JPMXD0717935561の支援を受けた.

参考文献

- 1) Tuchiya, K., and Fujita, T., 1967: A satellite meteorological study of evaporation and cloud formation over the western Pacific under the influence of the winter monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, 45, 232-250.
- 2) 岡林俊雄, 1972: 「気象衛星からみた雪雲と降雪についての研究への利用」, 気象研究ノート, 113, 74~106.
- 3) 浅井富雄, 「大気対流の科学」, 東京堂出版 113.
- 4) Thayer, G. D., 1974: An improved equation for the radio refractive index of air, *Radio Sci.*, 9, 803-807.
- 5) Askne, J., and H. Nordius, 1987: Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Sci.*, 22, 379-386.