

# 16. 北海道石狩平野に流入する冬期筋状雲の出現特性と陸域におけるGPS可降水量の空間分布

橋本 弾<sup>1</sup>・山田 朋人<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北海道大学大学院工学院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>2</sup>北海道大学大学院工学研究院 (〒060-8626 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

本研究では、2015年から2020年の冬期期間(11月から3月)において、北海道石狩平野に出現した筋状雲の抽出を行いその出現特性と水蒸気の空間分布について定量的に示した。同期間における筋状雲の発生日数は77日間(日本時間9時-16時)であり、6年間の平均発生日数は12.8日となった。走向としては、西-東が全体の39%と最も多かった。また、筋状雲の雲域・晴天域においてPWV(Precipitable Water Vapor)の差を比較したところ、雲域は晴天域に対して平均で11%PWVを多く含んでいることが示された。さらに筋状雲の雲域において、石狩湾の海岸付近で観測されたPWVに対して24kmの内陸に位置する地点では平均15%、40km内陸に位置する地点では平均16%減少することを示した。筋状雲の構造の一端を掴む観測結果を得た。

**Key Words :** Cloud Streets, PWV, GPS, Vortex

## 1. はじめに

地上から高度1 kmまでの領域においては、地表面からの加熱や摩擦の影響により乱流が支配的な層(大気境界層)となっている。ここで組織化する乱流構造は、熱や運動量、物質の輸送に大きく寄与している。冬季日本海上の大気境界層内では、雲列群が平行に並んだ筋状雲がしばしば出現する。筋状雲は、1)アジア大陸東部を覆う高気圧から吹き出した寒気が、温かい日本海上で水蒸気と熱の供給を受けて発生した対流運動と、2)上下層の間の風速・風向差(鉛直シア)により形成されたロール状の対流システムである<sup>1)</sup>。北海道石狩平野では、この筋状雲が海上から内陸部に流入することで大雪となることがある。そのため、同地域において筋状雲の動態を把握することは防災的な観点から重要である。筋状雲は、風下方向に対して平行に雲域と晴天域が交互に並列して存在する。雲域は、対流システムの上昇流域において水蒸気が凝結した結果形成された領域であり、晴天域は対流システムの下降流域にあたる<sup>2)</sup>。雲域と晴天域の間の距離は筋状雲の波長として定義され、約1~20kmの幅をもつことが知られている<sup>3)</sup>。石狩平野などの平野部では、海上から内陸に流入した筋状雲が徐々に消散していく様子が頻りに衛星の

可視画像で確認される。このように筋状雲の崩壊に伴い、水蒸気の空間分布がどのように変化するのは明らかになっていない。この観測事実を示すことは、気象モデルの計算結果に対する検証材料になると共に、その予測精度向上に貢献する。そこで本研究では、2015年から2020年の冬期期間(11月から3月)、北海道石狩平野に流入していた筋状雲を抽出

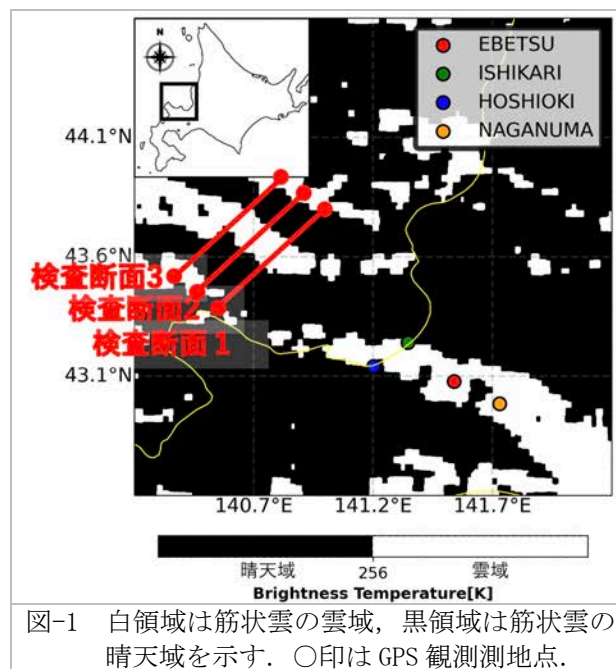


図-1 白領域は筋状雲の雲域、黒領域は筋状雲の晴天域を示す。○印はGPS観測地点。

し、その特性と陸域における水蒸気の空間的な分布をまとめた。水蒸気量は、観測地点上空の水蒸気が全て凝結した際の降水量である可降水量 (Precipitable Water Vapor; 以下, PWV) を用いた。PWVの観測原理については、2章2節にて詳述する。

## 2. 解析手法

### (1) 筋状雲の抽出方法

対象期間は、2015年から2020年の11月から3月である。気象衛星ひまわり8号の可視画像を用いて筋状雲の存在有無を目視で判断した。筋状雲が出現していると判断した日の9時から16時(日本時間)の間、10分ごと(1イベント)に以下の手順で筋状雲の抽出を行った。なお、2)~4)に示す通り筋状雲の雲列が一定の距離に保たれていることを抽出条件とした。

- 1) 目視で各イベントの走向を判別した。
- 2) 検査断面を3つ石狩湾から北西方向に設定した(図-1に示した赤線)。その後、ひまわり8号の赤外15バンド(中心波長:12.38  $\mu\text{m}$ )により観測された輝度温度のスペクトルを各断面で抽出した。
- 3) これを高速フーリエ変換することで、卓越波長(晴天域と雲域間の距離に相当する)を決定し筋状雲の波長とした。
- 4) 石狩湾に最も近い検査断面上の波長とその他の断面上の波長の差が10%以内である場合を筋状雲と定義した。また、筋状雲の雲域は輝度温度が256K以下となる範囲とし、それ以外は晴天域と判断した。なお、輝度温度は物体の放射強度を示し、物体の温度が低いほど輝度温度も低くなる。

### (2) GPSの観測原理

本節では第1章で述べたPWVの推定手法について述べる。PWVの推定は、図-1に示す国土地理院が配備する石狩、札幌2(以下、星置)、江別、長沼の4つの電子基準点で行った。GPS衛星は、地上から高度約2万キロ上空を周回しながら4つ以上の電波信号を射出する。地上の受信機でその電波信号を観測することで受信機の三次元的位置を得る。理論上、約7  $\times 10^{-2}$ 秒で地上の受信機に到達する電波信号は、様々な影響を受け遅延する。GPSの観測量は衛星から射出された電波が地上の受信機に到達するまでの経路長である。経路長からGPS衛星と受信機間の直線距離を差し引くことで遅延量を抽出し、6種類の遅延量に分類することでPWVを推定する。

ニュートンの万有引力の法則より、GPS衛星と地球は二体問題として扱うことができ、ケプラーの3つの法則から衛星は楕円軌道を描く。これが理論上示される衛星の軌道である。しかし、衛星の軌道は

太陽輻射や月の引力といった外力を受けるため、理論上の軌道との差異が生じる。また、i)衛星が地上とは異なる慣性系上において運動していることで発生する時間のずれ(特殊相対論的補正)、ii)地球の重力場の影響による地上の受信機との時間のずれ(一般相対論的補正)、iii)地上の受信機が地球という回転体上にある効果に起因する時間の遅延、これら3つを考慮する必要がある。地球の外層は電離大気である電離層と中性大気である対流圏に大別される。電離層では、太陽の紫外線やX線によりイオン化した自由電子が無数に存在している。電波信号が電離層を通過する際、自由電子密度に比例しマイクロ波の周波数の2乗に比例するある量のみ電波が遅くなる。これを電離層遅延という。一方対流圏では、マイクロ波により大気分子の誘導双極子が励起されて起こる遅延効果と水蒸気分子の永久双極子が励起されて起こる遅延効果が存在する。同過程については次節(3)で詳述する。その他にアンテナへ入射してきた電波とアンテナや建物により反射した電波同士の干渉や、受信する各電波によりアンテナの受信位置が異なる影響が存在する。

### (3) GPS-PWVの導出

対流圏において伝搬経路上の任意の地点における大気の屈折率を $n$ とすると、同大気圏における伝播距離 $L$ は伝播経路 $S$ を用いて以下のように表せる。

$$L = \int_S n \, dS \quad (1)$$

衛星と受信機の直線距離を $G$ とすると大気遅延量は、

$$\Delta L = \int_S (n - 1) \, dS + [S - G] \quad (2)$$

となる。右辺第1項はマイクロ波が誘電媒質中を通過することで、伝播速度が真空中に比べて減速する効果を表している。第2項はマイクロ波が曲率をもつため、伝播経路が湾曲する効果を表す。仰角が15度以下の低仰角でなければ経路が湾曲する効果が全体に占める割合は小さいが、仰角がそれ以下になると湾曲による効果は急激に増大する。

Thayer<sup>4)</sup>によれば、湿潤大気の屈折率は以下の式で与えられる。

$$10^6[n - 1] = k_1 \left( \frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1} + k_2 \left( \frac{P_v}{T} \right) Z_v^{-1} + k_3 \left( \frac{P_v}{T^2} \right) Z_v^{-1} \quad (3)$$

$T$ は気温(K)、 $P_d$ と $P_v$ はそれぞれ乾燥空気と水蒸気分子の分圧(hPa)と水蒸気分子の分圧(hPa)である。 $Z_d^{-1}$ と $Z_v^{-1}$ は乾燥空気と水蒸気分子の圧縮率の逆数であり、理想気体からのずれを表している。また $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ は実験から得られた係数であり、Bevis et al. (1992)<sup>5)</sup>ではその比較を行っている。本研究では、 $k_1 = (77.60 \pm 0.05) (\text{KhPa}^{-1})$ 、 $k_2 = (70.4 \pm 2.2) (\text{KhPa}^{-1})$ 、 $k_3 = (3.739 \pm 0.012) \times 10^5 (\text{KhPa}^{-1})$ とする。右辺第1項と第2項は、それぞれ乾燥大気成分と水蒸気に起因する効果であり、第3項は水蒸気分子による効果である。対流圏における遅延量(以下、大気遅延量)の内、水蒸気分子による遅延量は小さいものの、永久双極子による効果が大きいので水蒸気分

子は大気遅延量に大きく影響している。

式(2), (3)と理想気体の状態方程式より天頂方向における大気遅延量は,

$$\Delta L_{zenith} = 10^{-6} \left[ k_1 \int_{zenith} \frac{R\rho}{m_d} dz + k_2' \int_{zenith} \left( \frac{P_v}{T} \right) Z_v^{-1} dz + k_3 \int_{zenith} \left( \frac{P_v}{T^2} \right) Z_v^{-1} dz \right] \quad (4)$$

$$k_2' \equiv \left( k_2 - k_1 \frac{m_v}{m_d} \right) \quad (5)$$

となる。R (J/kmol K)は普遍気体定数,  $\rho$ は大気密度,  $m_v, m_d$  (kg/kmol)はそれぞれ水蒸気と乾燥空気の分子量である。ここで, 大気の静水圧平衡を仮定し右辺第1項をZHDとにおいて任意の地点における高さをz, 気圧をPとすると,

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g \quad (6)$$

$$ZHD = 10^{-6} k_1 \frac{R}{g_m m_d} P_0 \quad (7)$$

と表される。P<sub>0</sub> (hPa)は地上気圧, g<sub>m</sub> (m/s<sup>2</sup>)は

$$g_m = \frac{\int \rho g dz}{\int \rho dz} \quad (8)$$

で示される大気柱の重力加速度の平均値である。(8)式を展開した一次の項は大気柱の重心における重力加速度と近似され<sup>6)</sup>, 式(7)は

$$ZHD = (2.2779 \pm 0.0024) \frac{P_0}{f(\varphi, H)} \quad (9)$$

$$f(\varphi, H) = (1 - 0.0026 \cos \varphi - 0.00028H) \quad (10)$$

と表せる<sup>7)</sup>。φ, Hはそれぞれ観測地点の緯度と楕円体高である。ここで, ZHD (Zenith Hydrostatic Delay)を天頂静水圧遅延と呼び, 主に乾燥空気による(一部水蒸気分子による影響を含む)遅延効果である。一方, 式(4)の第2,3項を天頂湿潤遅延 (Zenith Wet Delay 以下, ZWD)と呼び, 水蒸気分子による遅延効果を含んでいる。これら2つを天頂大気遅延 (Zenith Tropospheric Delay 以下, ZTD)と呼ぶ<sup>8)</sup>。

PWVは変換係数Πを介してZWDと比例関係にあり<sup>8)</sup>,

$$PWV = \Pi \cdot ZWD \quad (11)$$

で示される。変換係数は, 水蒸気の気体定数R<sub>v</sub> (J/K kg), (12)式で定義される大気中の気温の鉛直プロファイルの水蒸気分圧により重み付けられた荷重平均気温T<sub>m</sub> (K)とk<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>'を用いて,

$$\Pi = \frac{10^5}{R_v \left( k_2' + \frac{k_3}{T_m} \right)} \quad (12)$$

と表される。

### 3. 結果

11月から3月において, 筋状雲が1イベント以上出現していたのは, 77日で全772イベントであった。6年間の年発生日数の平均は12.8日であり, 最多発生年は2020年(18日)となった。図-1に各年における筋状雲の月別発生日数の割合を示す。6年間を通して, 3月における筋状雲の発生は確認されなかった。2016, 2017, 2018年は11月にも筋状雲が発生していた一方で, 2019年のみ2月に発生してい

なかった。また, 6年間の月別の平均発生日数は, 多い方から12月(4.8日), 1月(4.5日), 2月(3日)の順となった。走向については, 石狩平野に対して西から東に流入する頻度(西-東)が最多となり全体の39%を占めていた。これに続いて, 西北西-東南東の34%, 北西-南東の25%, 西南西-東北東の1%, 北北西-南南東の0.02%の順に全体に対する走向の割合が推移していた。6年間の傾向としては, 北西-南東が減少傾向にあり西北西-東南東が増加傾向を示していた。

続いて筋状雲の雲域・晴天域におけるPWVの空間的な分布について検討した結果を示す。石狩と星置の観測地点のどちらか一方が雲域であり, もう一方が晴天域となった。イベント数は364イベントであった。該当イベントについて, 雲域におけるPWVは晴天域におけるPWVと比較して, 平均11%多くなることを示した。走向別に見ると, 西北西-東南東が平均14.7%, 北西-南東が平均11%, 西-東が平均6%であった。さらに, 石狩, 江別, 長沼(それぞれ図-1に緑, 赤, 黄点で示す)が同一の筋状雲の雲域下にあるイベントにおいて, 石狩でのPWVに対する江別, 長沼でのPWVの割合はそれぞれ平均で85%, 84%である。すなわち海岸付近に存在する石狩地点から24km地点の江別では平均15%, 40km地点の長沼では平均16%だけPWVが減少していた。その結果, 筋状雲の雲域におけるPWVは, 石狩湾の海岸から内陸に向けて24km地点では平均15%, 40km地点では平均16%減少することを示した。これは, 筋状雲が内陸部に流入するに従い, 地面との摩擦による影響や降雪に伴いながら水蒸気が減少したことが示唆される。

### 4. まとめ

本研究では, 2015年から2020年までの冬期期間において, 筋状雲の抽出を行いその特性と水蒸気の空間部分について定量的に示した。本研究では, ローカルな空間における筋状雲の構造の一端を掴む観測結果を得た。今後, LES (Large Eddy Simulation)等を用いて筋状雲の再現計算を行い, 本研究結果との相互比較からより詳細に筋状雲の内部構造の解明を

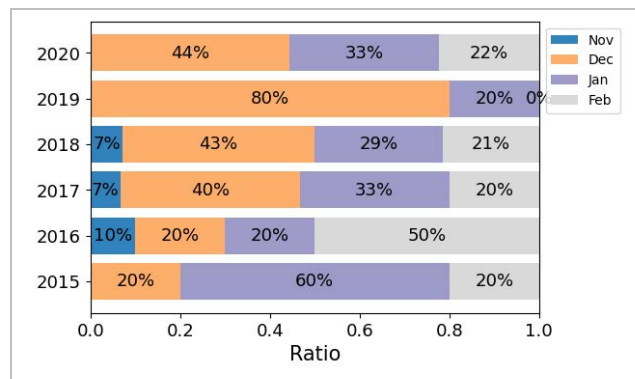


図-1 2015年から2020年における筋状雲の月別発生日数の割合 [%]

行いたい。

**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, ArCs II (Arctic Challenge for Sustainability) の支援を受けた。

#### 参考文献

- 1) 大気対流の科学, 浅井富雄, 1983.
- 2) N. Svensson, E. Sahlée, H. Bergstöm, E. Nilsson, M. Badger and A. Rutgersson: A case study of offshore a advection of boundary layer rolls over a stably stratified sea surface, *Advances in Meteorology*, Volum 2017.
- 3) Etling, D. Brown, R. A. : Roll vortices in the planetary boundary layer: A review, *Boudary-Layer Meteorology*, vol. 65, p215-248, 1992.
- 4) Thayer, G. D. : An improved equation for the raido refractive index of air, *Raido Sci.*, 9, 803-807, 1974.
- 5) Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware : GSP meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using of estimation of the wet delay, *J. Geophys. Res.*, 97, 15787-15801, 1992.
- 6) Davis, J. L., T. A. Herring, I. I. Shapiro, A. E. E. Rodgers, and G. Elgered : Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length, *Radio Sci.*, 20, 1593-1607, 1985.
- 7) Haas, R., G. Elgered, L. Gradinarsky, and J. Johansson : Assessing Long Term Trends in the Atmospheric Water Vapor Content by Combining Data From VLBI, GPS, Radiosondes and Microwave Radiometry, *Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, 16, 279-288, 2003.
- 8) Akne, J., and H. Nordius : Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Sci.*, 22, 379-386, 1987.
- 9) Saastamoine, J. : Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol 15, edited by S. W. Henriksen, A. Mancini, and B. H. Chovitz, pp. 247-251, AGU, Washington, D. C., 1972.