

研究課題 氷晶雲の放射特性に関する研究

研究代表者 古川 義純（北海道大学低温科学研究所・助教授）

研究分担者 遊馬 芳雄（北海道大学・講師）

福田 陽子（北海道大学大学院博士課程3年）

村山 利幸（東京商船大学・助教授）

菊地 勝弘（秋田県立大学・教授）

高橋 庸哉（北海道教育大学・助教授）

梶川 正弘（秋田大学・教授）

佐藤 昇（大阪教育センター・研究員）

藤吉 康志（低温科学研究所・教授）

遠藤 辰雄（低温科学研究所・助教授）

研究期間 平成11年4月1日～平成14年3月31日

1. 研究目的

地球表面を広く覆う雲は、その地球放射の吸収特性や太陽放射の散乱・反射特性により、地球大気の大気熱収支に大規模の影響を及ぼす。すなわち、雲の光散乱や放射・吸収特性は地球全体のエネルギー収支や気候変動にも関連する重要なファクターのひとつである。特に、氷晶で構成された雲の上層部は、太陽放射に直接影響を与えるものとして最近特に重要と考えられているが、氷晶で構成された雲（氷晶雲）の微物理特性と放射特性の関連はほとんど明らかにされていない。このため、氷晶雲の放射特性を考慮する必要がある場合、過冷却水滴でできた雲の放射特性値をそのまま使用したり、飛行機観測の測定値から推定した値を使うなどの方法で代用されることが多い。これは、極めて複雑な形状をした氷晶の光散乱・放射特性を、理論的に予測したり計算機シミュレーションで求めたりすることが未だ困難であることに原因がある。このため、人工的に発生させた氷晶雲により実験的に氷晶雲の微物理的特性と光特性との関連を明らかにすることは、極めて重要な研究課題となる。

本特別共同研究の目的は、低温実験室に設置された大型垂直風洞型人工雪生成装置により生成された人工氷晶雲の放射特性を精密に測定し、それが雲の微物理特性とどのような関連にあるかを解明することである。さらに、実験室で得られた結果が、実際の雲の散乱・放射特性をどこまで再現できているかを検証することである。

2. 研究内容と成果

本共同研究は、平成11年度から3年間にわたり実施された。主な研究内容と成果は、以下のようなものである。

2-1 人工氷晶雲の光散乱・放射特性の測定（古川義純、遊馬芳雄、福田陽子）

2-1-1 研究成果

低温科学研究所の風洞実験室内に設置されている底面1.5m×3m、高さ5mの垂直風洞を利用して人工氷晶雲を生成する。人工氷晶雲を発生させるためには、まず実験室全体を-10～-25℃に冷却し、垂直風洞に霧を噴霧して過冷却水滴による雲を生成する。こ

の過冷却雲の中に断熱膨張法で氷晶発生させるとそれらは成長を開始し、やがて氷晶のみで構成された氷晶雲が生成される。雲を構成する氷晶の連続サンプリングを繰り返しながら、雲の光反射、透過、散乱特性を測定することで、氷晶雲の微物理特性と放射特性とを関連づけることが可能である。

氷晶雲による放射の減衰量（すなわち、吸収量）を測定するために、波長 370 ~ 760 μm の人工太陽灯からの光の減衰量と雲の微物理特性（氷晶形状や数密度）を同時に測定した。図 1 は幾何学的断面積と透過率の関係を示す。通常、氷晶の幾何学的断面積の増大とともに透過率が減少すると予測されるが、同じ幾何学的断面積であっても氷晶の微物理状態が異なると減衰率がまったく異なることが本研究により明確に示された。さらに、氷晶の平均有効直径が大きいほど、透過率が小さくなることが明らかになった。

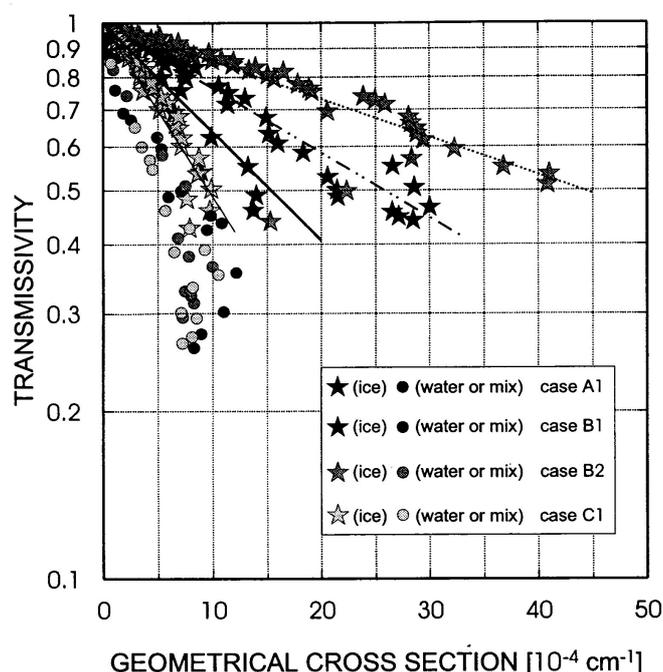
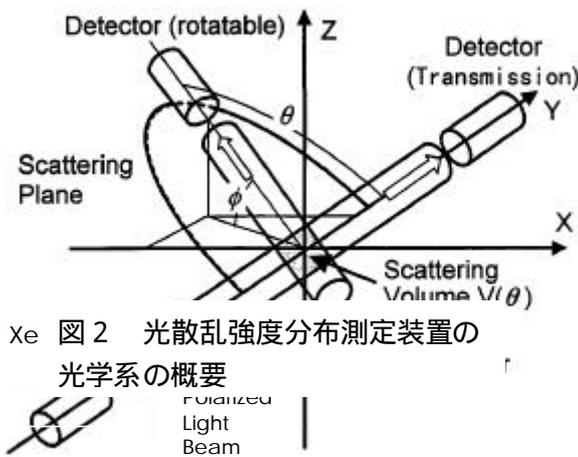


図 1 光透過率の測定結果

このような多数の氷晶が含まれる人工氷晶雲全体の光透過率は、氷晶雲を構成する氷晶 1 個 1 個による光散乱の集合として生じるものである。したがって、少数の氷晶（散乱体）で構成されたの集合体、あるいは氷晶 1 個 1 個の光散乱特性を精密に測定することも、氷晶雲全体の放射、散乱特性を解明するために極めて重要である。

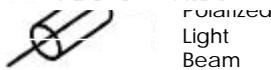
本共同研究では、ゴニオステージ形式の光散乱特性装置を作成し、少数の氷晶で構成された集団からの光散乱特性の測定実験も実施した。図 2 は、その測定光学系の基本的な概念を描いたものである。光源（Xe ランプ、またはレーザー）から発生した平行光束を氷晶で構成された散乱体に入射し、散乱光強度の水平・垂直面内での分布を光ダイオードにより測定できる装置である。光散乱強度の散乱角分布を測定するためのディテクターはステップモーターで回転可能なロッドに取り付けられる。太陽光のスペクトル分布に近い分散をもキセノンランプを光源に使用する場合は、ディテクターの前に設置したバンドパスフィルターにより、散乱の波長依存性も測定可能である。この測定装置は、垂直風洞の底

部に設置し、計算機による遠隔制御により測定が可能である。また、測定部の下部に設置した倒立顕微鏡のステージに降り落ちる氷晶をビデオカメラで連続記録することで、氷晶の形状、サイズ分布、空間濃度、構造等の微物理特性の経時変化を解析する。



Xe 図2 光散乱強度分布測定装置の

光学系の概要



Polarized
Light
Beam

図3 光散乱強度分布の測定結果の一例

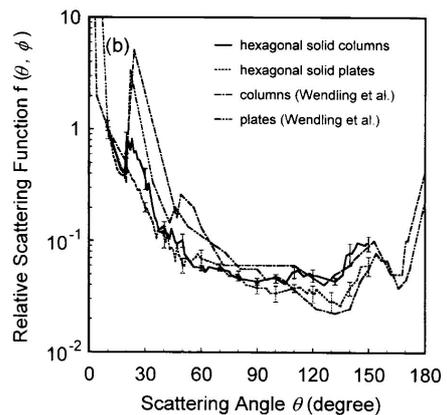
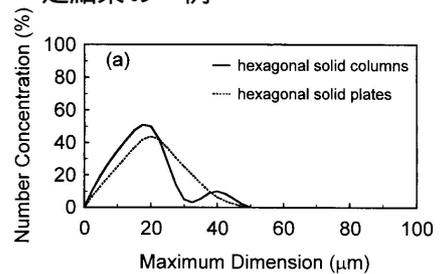


図3は、この装置で得られた氷晶雲による光散乱強度の散乱角分布の一例を示す。氷晶の平均的形状により光散乱分布が異なっていることが明瞭に示されている。

以上のように氷晶雲の光散乱・放射特性の精密測定の手法がほぼ確立され、氷晶雲の放射特性と雲の微物理特性との関連を定量的に測定する事が可能になってきた。実験室内の温度を変化させ、結晶の成長温度を変えると、生成させる氷晶の形状はドラスティックに変化する。低温研に設置されている垂直風洞型の人工雲発生装置で生成される氷晶雲は、六角板結晶や六角柱結晶などの単純な形状の氷晶で構成された氷晶雲に限られている。実際の氷晶雲は、砲弾集合や交差角板などの低温で優先的に生成されるより複雑な形状の氷晶で構成されている場合が多い。このような結晶形で構成された氷晶雲を人工的に生成することは極めて困難である。今後、人工雲発生装置の大型化や氷晶精製技術の開発などの課題が残されている。

また、このような研究に加えて、氷晶1個1個の光散乱特性の精密測定も極めて重要である。米国ワシントン大学の雲物理学教室では、空中浮遊させた1個の氷晶からの光散乱

特性の測定を実施している。本共同研究の代表者らは、2001年3月にワシントン大学を訪問する機会を得て、両者の研究についての討論を行うなど、3年間の研究期間中に国内外の研究者との連繋も深めることが出来た。

2 - 1 - 2 本共同研究に関連する論文、口頭発表等のリスト

論文：

- 1) 氷晶の微物理，光学的特性の実験的研究．福田陽子，菊地勝弘 遊馬芳雄，上田博，古川義純，寒地技術論文・報告集，1997年7月，Vol.13，539-542．
- 2) Experimental study on light scattering from an artificial ice cloud. Y. Sasaki, N. Nishiyama and Y. Furukawa, *Polar Meteorol. Glaciol.*, 12(1998)130-139.
- 3) Time development of a solute diffusion field and morphological instability on a planar interface in the directional growth of ice crystals. K. Nagashima and Y. Furukawa, *J. Crystal Growth*, 209(2000)167-174.
- 4) Growth trajectories of disk crystals of ice growing from supercooled water. E. Yokoyama, R. F. Sekerka and Y. Furukawa. *J. Phys. Chem. B*104(2000)65-67.
- 5) Anisotropy in structural transitions between basal and prismatic interfaces of ice studied by molecular dynamics simulation. H. Nada and Y. Furukawa, *Surface Science*, 446(2000)1-16.
- 6) Interferometric observation of gravity effect on the horizontal growth of ice crystals in a thin growth Cell. K. Nagashima and Y. Furukawa, *Physica D*, 147(2000)177-186.
- 7) X-ray analysis of the structure of premelted layers at ice interfaces. M. Maruyama, T. Sato, S. Taniguchi, M. Kawamura, S. Koderu, Y. Kishimoto and Y. Furukawa, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 39(2000)6696-6699
- 8) Ice crystal pattern formation under gravity and microgravity conditions. Y. Furukawa and E. Yokoyama, *ESA SP-454*, (2001) 465-471.
- 9) Effects of gravity on the pattern formation in the directional growth of ice crystals. K. Nagashima and Y. Furukawa, *J. Crystal Growth*, in press.
- 10) Surface instability on icicle. N. Ogawa and Y. Furukawa, *Physical Review E*, in press.
- 11) Asuma, Y., Y. Matsukawa, K. Kikuchi, K. Tsuboki and R. Kimura, 1998: Energy budget observation in the central Canadian Arctic. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII (Geophysics)*, 11, 27-49.
- 12) Sato, N., K. Kikuchi, Y. Asuma and M. Kajikawa, 1998: In situ growth experiments on "Gohei Twins" snow crystals observed at Inuvik in Arctic Canada. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII (Geophysics)*, 11, 335-344.
- 13) Sato, N., K. Kikuchi, Y. Asuma H. Uyeda and M. Kajikawa, 1998: Relationship between ice nuclei and snowfalls observed in the Arctic regions. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII (Geophysics)*, 11, 345-361.
- 14) Asuma, Y., S. Iwata, K. Kikuchi, G.W.K. Moore, R. Kimura and K. Tsuboki, 1998: Precipitation features observed by Doppler radar at Tuktoyaktuk, Northwest

Territories, Canada, during the Beaufort and Arctic storms experiment. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 2384-2405.

- 15) Ishida, H., T. Hayasaka, M. Kajikawa, K. Kikuchi, H. Uyeda, Y. Asuma and Y. Inoue, 1998: Observations of liquid water, water vapor, and downward flux of infrared radiation in the Arctic region with a microwave radiometer and a pyrgeometer. *Polar Meteorology and Glaciology*, 12, 10-18.
- 16) Shiobara, M., Y. Fujii, S. Morimoto, Y. Asuma, S. Yamagata, S. Sugawara, Y. Inomata, M. Watanabe and T. Machida, 1999: An overview and preliminary results from the Arctic airborne measurement program 1998 campaign. *Polar Meteorology and Glaciology*, 13, 99-110.
- 17) Kajikawa, M., K. Kikuchi, Y. Asuma, Y. Inoue and N. Sato, 2000: Supercooled drizzle formed by condensation-coalescence in the mid-winter season of the Canadian Arctic. *Atmos. Res.*, 52, 293-301.
- 18) Asuma, Y., Y. Inoue, K. Kikuchi, M. Kajikawa, N. Sato and T. Hayasaka, 2000: Wintertime precipitation behavior in the western Canadian Arctic region. *J. Geophys. Res.*, 105, 14927-14939.
- 19) Kajikawa, M., K. Kikuchi, Y. Asuma, Y. Inoue and N. Sato, 2000: Aggregation of needle snow crystals. *Atmos. Res.*, 55, 131-138.
- 20) Nissen, R., D. Hudak, S. Laroche, R. Elias, I. Zawadzki and Y. Asuma, 2001: 3D wind field retrieval applied to snow events using Doppler radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 18, 348-362.
- 21) Asuma, Y., N. Ogitani and M. Wada, 2001: Radar echo characteristics at Ny-Alesund, Spitsbergen Island and Arctic storms over the Norwegian Sea. Extended Abstract of Second Wadati Conference on Global Change and the Polar Climate, Tsukuba, Japan, 166-168.
- 22) Kikuchi, K., Y. Nagaishi, Y. Asuma, H. Uyeda, N. Kanemura and M. Fujii, 2001: Radar echo characteristics of the localized heavy snowfalls around Sapporo, Japan. *Seppyo*, 63, 239-251.

その他 :

- 1) 遊馬芳雄, 1998: 日本気象学会 1997 年度秋季大会シンポジウム「北極圏の大気大循環と物質循環」の報告 1 . 北極圏の擾乱の構造と水輸送. *天気*, 第 45 巻, 754-760.
- 2) 遊馬芳雄, 2000: 第 1 4 回メソ研究会報告 6 . ノルウェー海上でのポーラーロウの航空機観測. *天気*, 第 4 7 巻, 479-479.
- 3) 遊馬芳雄, 2001: 本だな : 水野 量著『雲と雨の気象学』. *天気*, 第 48 巻, 429-430.
- 4) 遊馬芳雄, 2001: 研究レポート : ベアー・アイランドでのレーダー観測 (滞在記) . 北極圏環境研究センター (国立極地研究所) ニュースレター, 第 14 号, 9-10.
- 5) 山崎 剛・中井専人・遊馬芳雄・吉田 聡, 2001: IAMAS2001 国際集会の報告. *雪氷*, 第 63 巻, 512-516.

口頭発表 :

(国際会議)

- 1) Y. Furukawa: Pattern Formation of an ice crystal (Opening lecture). Sapporo Symposium on Anisotropic Effects in a Crystal Growth Problem and its Mathematical Analysis (SAM), January 1999, Sapporo. (Invited)
- 2) Y. Furukawa et al.: Anisotropic growth kinetics and pattern formation of an ice crystal grown in supercooled water. Seminar at Department of Applied Science, U. C. Davis, February 1999, Davis. (Invited).
- 3) Y. Furukawa et al.: Recent experiments of ice crystal growth under the micro-gravity condition. Seminar at Department of Mathematics and Physics, Carnegie Mellon University, March, 1999, Pittsburgh.
- 4) Y. Furukawa et al.: Pattern formation of ice crystals. Astrobiology/Ore Deposits at Penn State, Astro-biology Research (Invited). Center, March 1999, State College.
- 5) Y. Furukawa et al.: One-directional growth of ice crystals-Interface kinetics and pattern. Japan-Netherlands Seminar on Crystal Growth: Theory and In-situ Measurements, August 1999, Zeist. (Invited)
- 6) Y. Furukawa et al.: Trajectories of Growing Disk Crystals in Phase Plane. 9th International Colloquium on Numerical Analysis and Computer Science with Application, Plovdiv, Bulgaria, August 12-17, 2000.(Invited)
- 7) Y. Furukawa et al.: Morphological instability and pattern formation during free growth of ice crystals under gravity and microgravity conditions. 13th International Conference on Crystal Growth (ICCG-13), July 2001, Kyoto (Invited).
- 8) Y. Furukawa et al.: Inhibited growth of ice crystal in aqueous Antifreeze Glycoprotein (AFGP) solution. International Conference on Materials for Advanced Technology (ICMAT2001), July 2001, Singapore.(Invited)
- 9) Kato, M., Y. Asuma and G.W.K. Moore, 1998: Cyclogenesis in the Western Canadian Arctic Region. Proceedings of the Eighth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop, Boulder, USA, 42-44.
- 10) Asuma, Y., Y. Fukuda, K. Kikuchi M. Shiobara, M. Wada and G.W.K. Moore, 2000: "In-Situ" Measurement for a polar low over the Norwegian Sea. Program and Abstracts for Second International Symposium on Environmental Research in the Arctic and Fifth Ny-Alesund Scientific Seminar, Tokyo, Japan, 37.
- 11) Asuma, Y., 2001: Precipitation and storm features in the western Canadian Arctic region. Proceedings of Second International Workshop on Global Change: Connection to the Arctic, Sapporo, Japan, 1-2.
- 12) Kato, M., and Y. Asuma, 2001: Cyclogenesis in the western Canadian Arctic region. Proceedings of Second International Workshop on Global Change: Connection to the Arctic, Sapporo, Japan, 1-3.
- 13) Asuma, Y., N. Ogitani and M. Wada, 2001: Radar echo characteristics at Ny-Alesund, Spitsbergen Island and Arctic storms over the Norwegian Sea. Extended Abstract of Second Wadati Conference on Global Change and the Polar Climate, Tsukuba, Japan, 166-168.

- 14) Asuma, Y., Y. Fukuda, K. Kikuchi M. Shiobara, M. Wada and G.W.K. Moore, 2001: In-Situ Measurements of a polar low over the Norwegian Sea. Proceedings of the 8th Scientific Assembly of the International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences (IAMAS), Innsbruck, Austria, 6.3.
- 15) Yoshida, A. and Y. Asuma, 2001: Environment for explosive development of extratropical cyclones around Japan. Proceedings of the 8th Scientific Assembly of the International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences (IAMAS), Innsbruck, Austria, 6.2.

(国内会議)

- 1) 福田陽子, 菊地勝弘, 遊馬芳雄, 上田博, 古川義純, 高橋庸哉「氷晶の微物理, 光学的特性の実験的研究」日本気象学会 札幌 1997年10月
- 2) 福田陽子, 菊地勝弘, 遊馬芳雄, 上田博, 古川義純, 高橋庸哉「氷晶の微物理, 光学的特性の実験的研究」日本雪氷学会 鶴岡 1997年10月
- 3) 福田陽子, 菊地勝弘, 遊馬芳雄, 上田博, 古川義純, 高橋庸哉「氷晶の微物理, 光学的特性の実験的研究」第13回 寒地技術シンポジウム 苫小牧 1997年11月
- 4) 福田陽子, 菊地勝弘, 遊馬芳雄, 上田博, 古川義純, 高橋庸哉「氷晶を含む人工雲の光学的特性の実験的研究」日本気象学会北海道支部研究発表会 札幌 1998年6月
- 5) 福田陽子, 菊地勝弘, 遊馬芳雄, 上田博, 古川義純, 高橋庸哉「氷晶を含む人工雲の光学的特性の実験的研究」日本気象学会 東京 1998年10月
- 6) 古川義純: 氷結晶のパターン形成 落下塔からスペースシャトルまで. 北海道マイクログラビティ研究会主催特別講演会、2000年6月、札幌.(Invited)
- 7) 古川義純: 中谷宇吉郎の足跡と現代雪氷学「雪の結晶」2000年度日本雪氷学会全国大会公開講演会、2000年10月、加賀.(Invited)
- 8) 古川義純: 氷結晶のパターン形成 - スペースシャトル実験をめざして - . 形の科学会第49回シンポジウム、2000年10月、千歳.(Invited)
- 9) 遊馬芳雄・荻谷奈緒・菊地勝弘・和田 誠, 1998: ノルウェー海周辺の低気圧の季節変動と水輸送, 日本気象学会 1998年春季大会講演予稿集, 仙台, P349
- 10) 遊馬芳雄・福田陽子・菊地勝弘・塩原匡貴・和田 誠・藤井理行, 1998: ノルウェー海上のポーラーローの航空機観測, 日本気象学会 1998年秋季大会講演予稿集, 東京, B304.
- 11) 遊馬芳雄・塩原匡貴・和田 誠, 1999: AAMP'98で観測されたポーラーローの客観解析, 日本気象学会 1999年春季大会講演予稿集, 東京, P372.
- 12) 加藤雅也・遊馬芳雄・G,W,K,Moore, 1999: カナダ北極圏でのLee Cyclogenesisの数値シミュレーション, 日本気象学会 1999年春季大会講演予稿集, 東京, P373.
- 13) 吉田 聡・遊馬芳雄, 1999: 日本付近で急激に発達する低気圧に関する総計的解析, 日本気象学会 1999年春季大会講演予稿集, 東京, P375.
- 14) 遊馬芳雄・森本真司・塩原匡貴・G.W.K.Moore・I.A.Renfrew, 1999: AAMP'98で観測された下部成層圏でのオゾン濃度のメソスケール変動, 日本気象学会 1999年秋季大会講演予稿集, 福岡, P160.

- 15) 佐藤淳一・遊馬芳雄・梶川正弘・加藤 昇・菊地勝弘, 1999: スカンジナビア北極圏での降水現象の特徴, 第 22 回極域気水圏シンポジウム講演要旨, 東京, I-1.
- 16) 吉田 聡・遊馬芳雄, 2000: 日本付近で急激に発達する低気圧の発達要因, 日本気象学会 2000 年秋季大会講演予稿集, つくば, P344.
- 17) 佐藤 昇・梶川正弘・小西啓之・遊馬芳雄・和田 誠・塩原匡貴・山内 恭, 2000: ニーオルスンでの降雪粒子の現地観測, 第 23 回極域気水圏シンポジウム講演要旨, 東京, PI-15.
- 18) 遊馬芳雄・梶川正弘・早坂忠裕・H.Tangen, 2001: ノルウェー・ベアーアイランドでのレーダー観測, 第 23 回極域気水圏シンポジウム講演要旨, 東京, PI-17.
- 19) 遊馬芳雄・巢山志津香・佐藤淳一・横山 誠・菊地勝弘・梶川正弘・佐藤 昇・早坂忠裕, 2001: 冬季スカンジナビア半島周辺での降水現象と低気圧の特徴, 日本気象学会 2001 年春季大会講演予稿集, 東京, B303.
- 20) 遊馬芳雄・梶川正弘・早坂忠裕・H.Tangen, 2001: ノルウェー・ベアーアイランドでのレーダー観測, 日本気象学会 2001 年春季大会講演予稿集, 東京, P343.
- 21) 佐藤 昇・梶川正弘・小西啓之・遊馬芳雄・和田 誠・塩原匡貴・山内 恭, 2001: ニーオルスンでのエアロゾル・降雪粒子の観測, 日本気象学会 2001 年春季大会講演予稿集, 東京, B301.
- 22) 加藤雅也・遊馬芳雄, 2001: PV インバージョンを用いた Lee Cyclogenesis の解析方法, 日本気象学会 2001 年春季大会講演予稿集, 東京, P346.
- 23) 吉田 聡・遊馬芳雄, 2001: 日本付近で急激に発達する低気圧に関する総計的解析 (その 2), 日本気象学会 2001 年秋季大会講演予稿集, 岐阜, B301.

2 - 2 巻雲と氷晶核エアロゾルの関係に関する研究 (村山利幸)

2 - 2 - 1 はじめに

東京商船大学(東京都江東区越中島、北緯 35.664 °、東経 139.796 °)では、従来よりレーザーの直線偏光性と後方散乱光の偏光特性を利用したミー散乱ライダー(ここでは偏光ライダーと呼ぶことにする)による大気境界層及び自由対流圏エアロゾル観測を定常的に行ってきた。¹⁾ 観測波長はNd:YAG レーザーの第2高調波による532nm(緑色)であり、2001年からは基本波の1064nmでの観測(偏光なし)も同時に行っている。偏光ライダーによる偏光解消度測定によって、エアロゾルの球形・非球形性、大きさに関する定性的な情報が得られる(非球形でも大きさが光の波長に比べ十分小さいと偏光解消度は大きくなるので、エアロゾルの大きさとも関連する)。東アジア域の自由対流圏を輸送される代表的なエアロゾルに、中国やモンゴルの砂漠域で発生した砂塵嵐によって舞い上げられ、強い偏西風に乗って広域に運ばれる黄砂がある。黄砂の偏光ライダー観測は先駆的な研究が名古屋大学で行われ、多波長ミー及びラマンライダー観測が継続して行われている。²⁻³⁾ 筆者らは、国立環境研究所、名古屋大学、長崎大学、北大低温研らと共同で黄砂のネットワーク観測・情報交換を1997年春から電子メール及びweb page(<http://info.nies.go.jp:8094/AD-Net/>及び<http://infop.nies.go.jp:8094/AsaiNet/>)を通じて行ってきた。⁴⁾ 現在、このvirtual communityはAsian Dust Network(AD-Net)と名付けられており、韓国や米国の研究者とも情報等の交換を行っている。2001年春季には米国を中心とした大規模な大気エアロゾル観測「ACE-Asia」が行われ⁵⁾、我々ライダーネットワークもエアロゾルの鉛直分布情報を提供したり、航空機との同時観測を行った。本報告では、この5年間の集中観測の結果、次第に描像が明らかになってきた、対流圏中部から上部に運ばれた黄砂が氷晶核として作用し巻雲に変化したり(またその逆の過程)混在する現象、いわば「ダスト・巻雲相互作用」に着目して観測事実を中心に述べる。また、2001年5月17日に東京において顕著なハロー現象が観測されたので、興味深い氷晶雲の引き起こす現象の一つとして、スカイラジオメーター及びライダー観測の結果についても述べる。

2 - 2 - 2 黄砂と巻雲の同時ライダー観測

土壌粒子は自然起源の氷晶核として有効に働くことが知られている。磯野ら⁶⁾は黄砂が氷晶核として作用することを地上観測によって示した。しかし、巻雲への効果を明確に述べた論文や観測は従来なかったように思われる。

18-19 March 1998 (Tokyo)

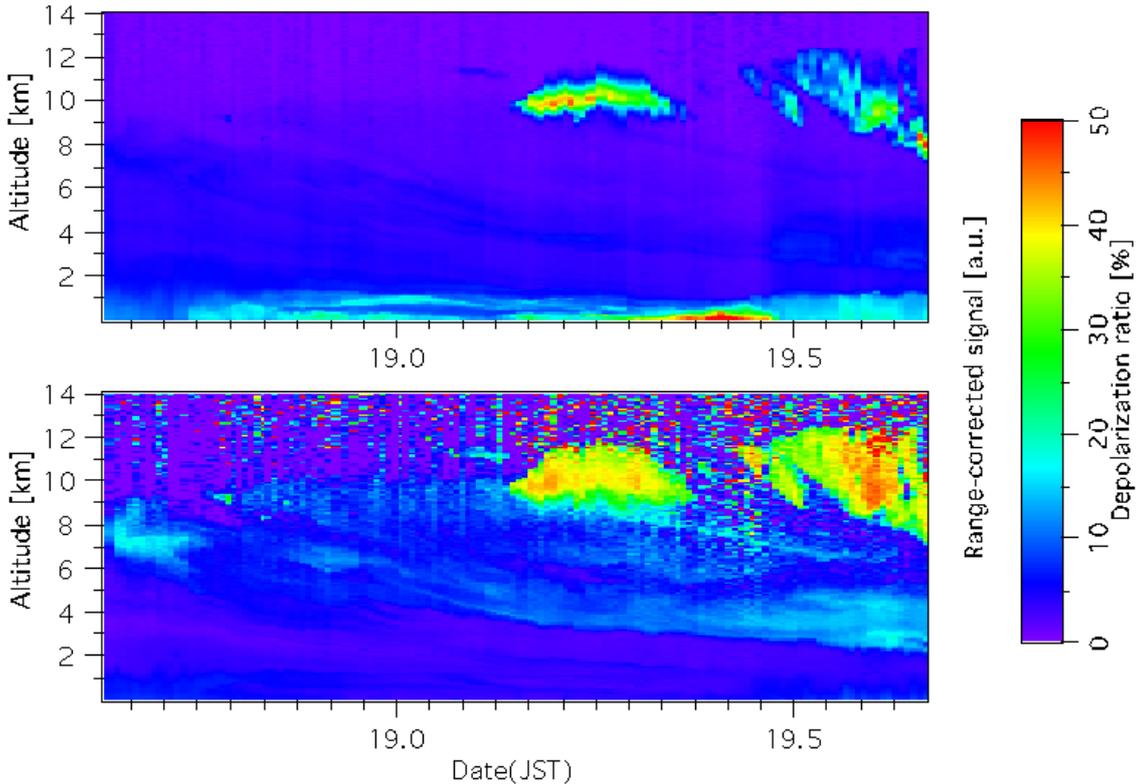


図1，東京商船大における1998年3月18日—19日の偏光ライダー観測(532nm)

上：後方散乱強度（相対値）の時間系列変化、下：偏光解消度の時系列変化

19日3—9時に高度9-12kmにある巻雲の下部にその時間以前から存在する黄砂と思われる4-10kmにかけて薄く分布する偏光解消度のやや高いエアロゾル層と接しているのがわかる。

1998年の我々のライダー観測において、黄砂と巻雲が接して観測されていることが指摘された(図1)。⁷⁾その後、やはり黄砂と思われる対流圏中部から上部を輸送される非球形エアロゾルが巻雲へ変化したり、混在する状態がしばしば観測された。⁸⁾黄砂が非常に高い高度まで輸送されることがあることを考えれば、その氷晶化能力からして、水蒸気を多く含む気塊と交われば氷晶核として作用し、巻雲を形成することが期待される。砂漠域から運ばれる黄砂粒子を含む気塊は乾燥しているが、輸送の途中において粒子が水蒸気を吸収したり、何らかの要因によって湿度を多く含む気塊と交わることがあるであろう。⁷⁾実際、ラマンライダー観測による水蒸気の混合比やラジオゾンデによる観測と比較すると、黄砂エアロゾル層の相対湿度は事象毎に大きく異なっている。

図2に2000年3月15日にライダーによって観測された黄砂層と巻雲が接する例を示す。積算時間間隔は約7分である。巻雲は後方散乱が非常に大き

15 March 2000 (Tokyo)

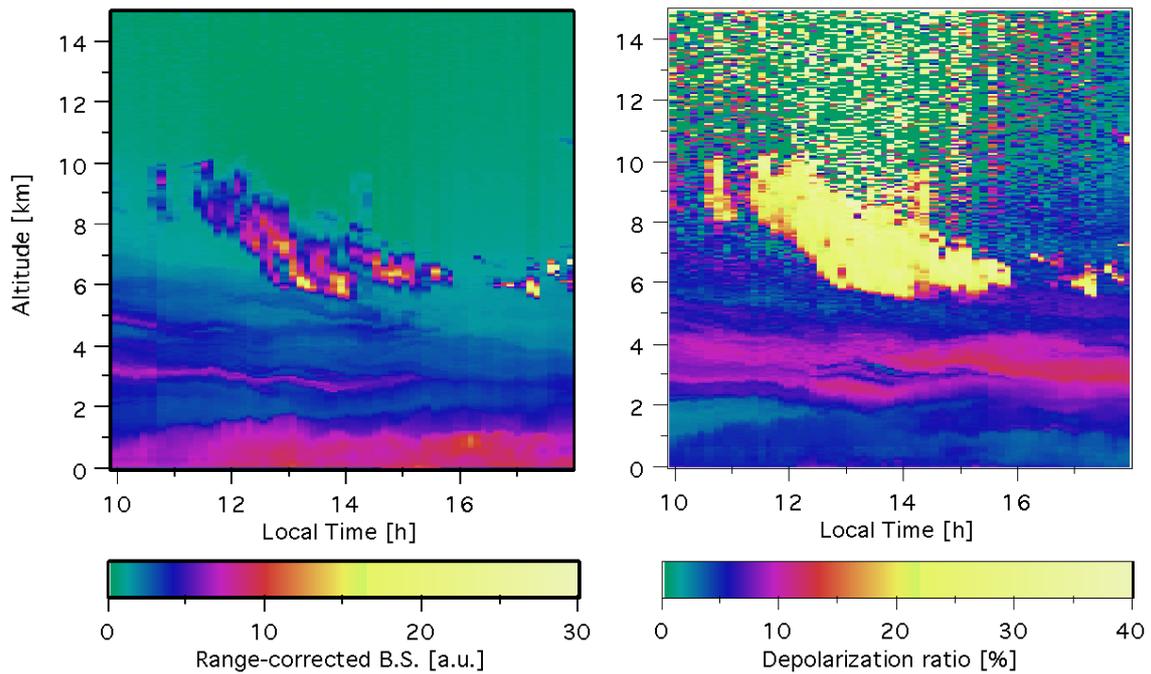


図 2 , 東京商船大における 2000 年 3 月 15 日の偏光ライダー観測

左 : 後方散乱強度 (相対値) の時間系列変化、右 : 偏光解消度の時系列変化

13 時以降高度を下げてきた巻雲が顕著な黄砂層 (2-6 km) と接していることがわかる。

15 March 2000 (Tokyo)

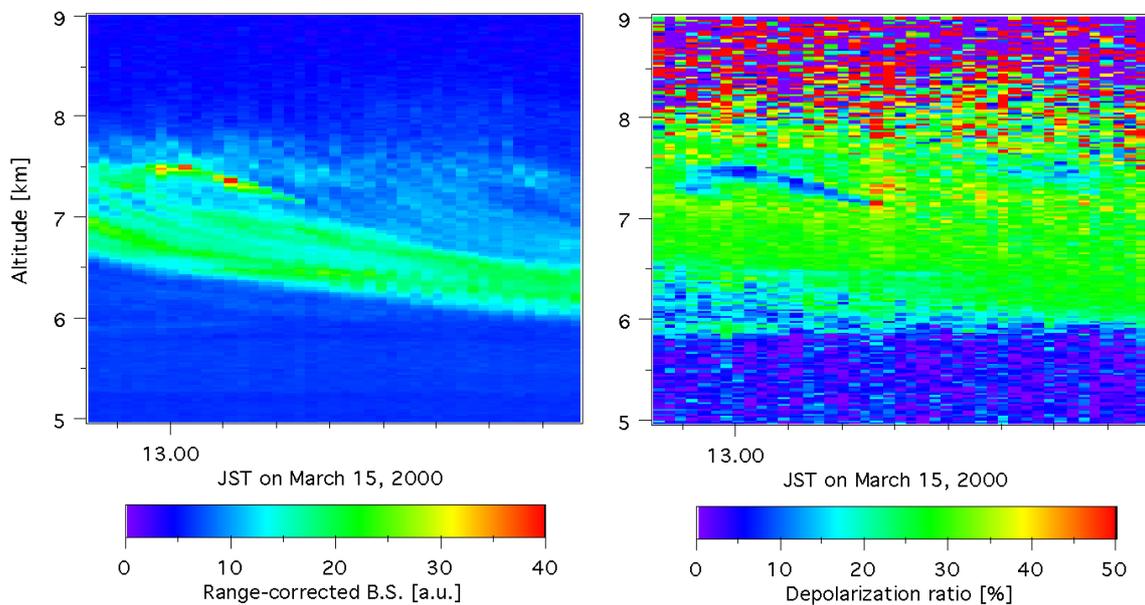


図 3 , 2000 年 3 月 15 日 12:58-13:08JST における偏光ライダーによる高時間分解能 (約 10 秒)

モードでの観測、左 : 後方散乱強度 (相対値) の時間系列変化、右 : 偏光解消度の時系列変化

13:00-13:03 に高度 7.2-7.5km にかけて散乱は強いが偏光解消度が小さい領域で平板状氷晶によって鏡面反射が生じていると考えられる。

く偏光解消度も通常 30-50%と大きく、かつ時間変動も大きい。一方、黄砂エアロゾル層は後方散乱は巻雲に比べると小さく、偏光解消度は数%? 20%程度であり、かつ時間変動は小さい。例えば、図 2 の観測において時間分解能を 10 秒程度に上げて巻雲を観測した例を図 3 に示す。巻雲の吹き出しの様子が良くわかる。また、巻雲観測時においては、しばしば平板状の氷晶による鏡面反射によって、非常に強度は大きい偏光解消度の小さい後方散乱が生じることがあり、その様相も見られる。⁷⁾ 図 4(a), (b)には 2000 年 4 月 12 日の下層で顕著な黄砂時に上層にある薄い黄砂層が巻雲に変化していく観測例を示す。このように、黄砂層の上端から巻雲が現れるケースが多いようである。この時に撮影した写真を図 4(c), (d)に示す。このような波状雲として巻雲が見られることも多い。

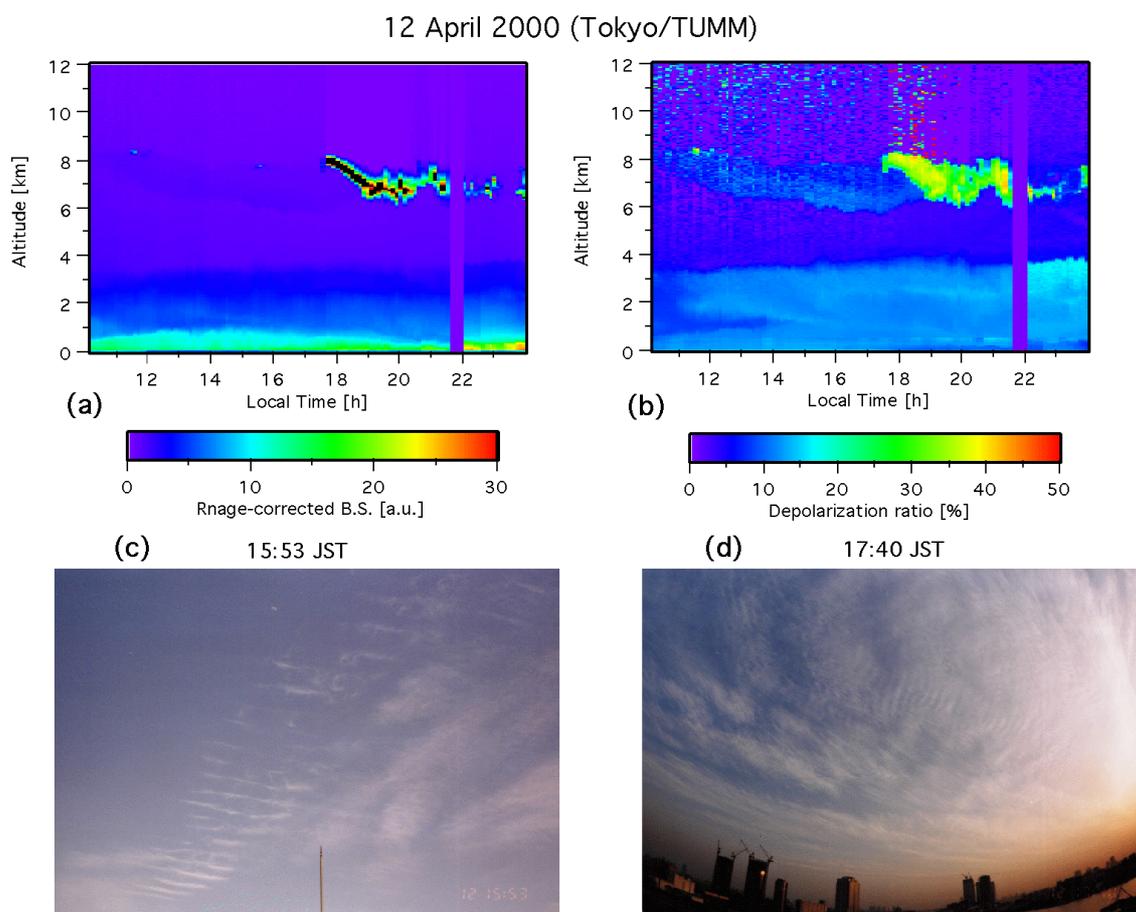


図 4, 東京商船大における 2000 年 4 月 12 日の偏光ライダー観測(532nm)と巻雲の写真
(a) 後方散乱強度(相対値)の時系列変化、(b) 偏光解消度の時系列変化、(c), (d) 上空の巻雲の写真 (d では魚眼レンズを使用)

2 - 2 - 3 ハロー現象時の観測について

2001 年 5 月 17 日 12 時頃、東京においてかなり顕著なハロー(暈)が観測された(図 5)。このようなハローは良く知られているように六角柱状の氷晶がランダムに並んで存在する時に観測される。⁹⁾ このときのスカイラジオメーター観測とライダー観測の結果について述べる。



図 5, 2001 年 5 月 17 日 12 : 06JST に東京で見られたハロー（東京商船大学にて）

（ 1 ）スカイラジオメーター観測

スカイラジオメーターは太陽の直達光と周辺光を測定することにより、エアロゾルによる光学的厚さや気柱積算での粒径分布をインバージョンにより求める装置である。¹⁰⁾ハローの場合は六角柱を通る光の最小偏角が 22 度になることから、図 6 のように内側は赤く、外側にいくに従って白っぽくなる光の輪が観測される。このようなハローの光がスカイラジオメーターで捉えられていないか調べるために観測された周辺光の相対強度をハローが観測された時とそうでないときで比べてみたのが図 6 である。このときスカイラジオメーターの観測設計角度は 0, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, ……となっており、ハローの内側の赤に相当する 22 度は含まれていないので顕著でないが、かろうじて 25 度の測定において 10% 程度の散乱光の増強が各波長において見られている。これは、原理的にスカイラジオメーターによって太陽周辺に発生するハローなどの大気光学現象が捉えられることが可能であることを示している。

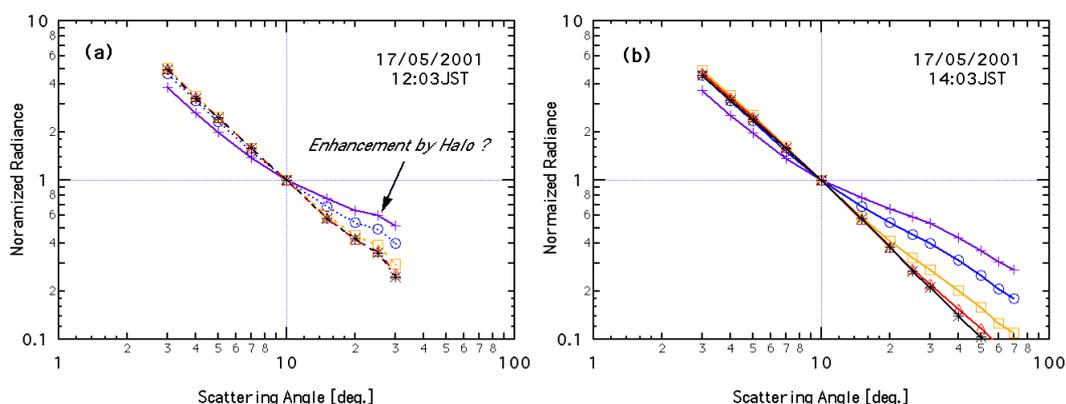


図 6 , ハローが観測された時のスカイラジオメーターによる太陽周辺光の角度分布

(a) 2001 年 5 月 17 日 12 : 03JST, (b)14:03JST

それぞれ 10 度での値で規格化している。観測波長は 400(× 印), 500(印), 670(印), 870(印), 1040nm (* 印) である。

このような観点からのスカイラジオメーターの応用もあるのではないかと考えられる。このときの、全天日射計及びスカイラジオメーターから求められた光学的厚さ、波長指数を図 7 (a)に、粒径分布を図 7(b)に示す。スカイラジオメーターの解析ではハローを形成した氷晶雲の影響よりはより下層にあったエアロゾルに対して解析されたと考えられる。

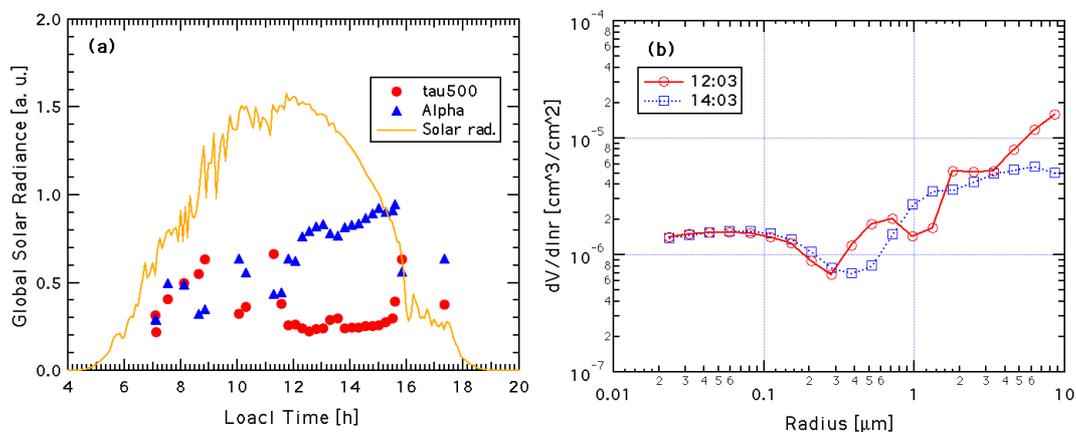


図 7 , 2001 年 5 月 17 日東京商船大学で観測された (a)全天日射量及び 500nm におけるエアロゾルの光学的厚さ(tau500)と波長指数(Alpha)及び(b)体積粒径分布

(2) ライダー観測

2000 年 5 月 17 日午前 9 時 35 分以降の約 7 分毎の偏光ライダー観測 (波長 532nm) の結果を図 8 に示す。この日は、2-3km 以下で偏光解消度が 10% 程度あり、黄砂が下層を輸送されていたが比較的对流圏中部はエアロゾルが少なく、

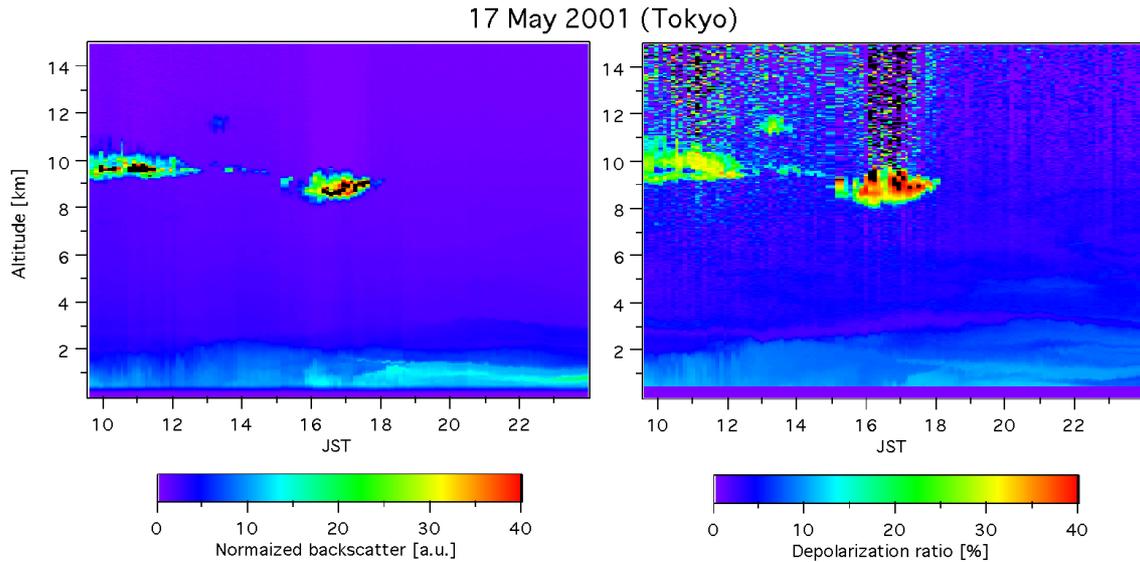


図 8 , 東京商船大学における 2001 年 5 月 17 日の偏光ライダー観測 (532nm)
 左 : 後方散乱強度 (相対値) の時間系列変化、右 : 偏光解消度の時系列変化

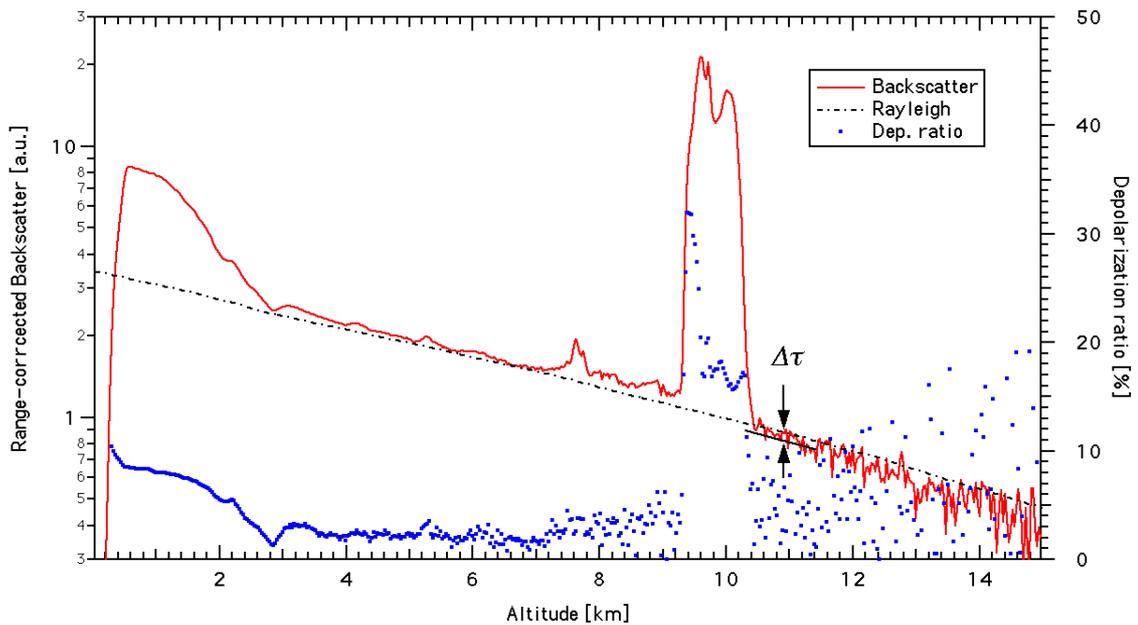


図 9 , 2001 年 5 月 17 日 11 : 50-12 : 11JST の平均ライダープロファイル
 直線 : 距離 2 乗補正した後方散乱強度(532nm)、点 : 偏光解消度、一点鎖線 : 大気分子によるレーリー散乱のみを考えた場合の後方散乱相対値

前節に述べたような黄砂と巻雲の結合はみられなかった。ハローが観測された時間における 11:50-12:11 のライダー信号の平均プロファイルを図 9 に示す。この図から、巻雲の下部及び上部でほとんどレーリー散乱とみなされるので、レーリー散乱強度の減衰からこのときの巻雲の光学的厚さを見積もってみると 0.02 ± 0.02 であった。¹¹⁾ この 0.02 という値はスカイラジオメーターからの 500nm での光学的厚さの変化ともおよそ一致する。すなわち、

写真からも青空が透けてみえるように非常に光学的に薄い巻雲だったことがわかる。またこの時間より前には鏡面反射が観測されている。高時間分解能測定を行えばその変移が観測できたかもしれない。また、ランダムに六角柱氷晶が並んでいる場合の偏光解消度は幾何光学によって計算可能であり、その値は、約 29% ぐらいであること報告されている。¹²⁾ このときのハローが起っている巻雲内での偏光解消度は 15-35% であり、およそ理論値とも一致する。但し、ライダーの観測方向は鉛直方向であり、太陽の方向とは一致していない。つくば市館野の同日 9 時のラジオゾンデ観測の結果を図 10 に示す。¹³⁾ ハローを生成した巻雲の存在した高度 9km 以上では 40 度以下であったことがわかる。同日の 1064nm によるライダー信号を 532nm のライダー信号で割った比を図 11 に示す。巻雲では波長比がほぼ一定であり、氷晶のような大きな粒子に対しては散乱の波長依存性が小さいことがわかる。下層の黄砂層と比較するとその違いが良くわかる。

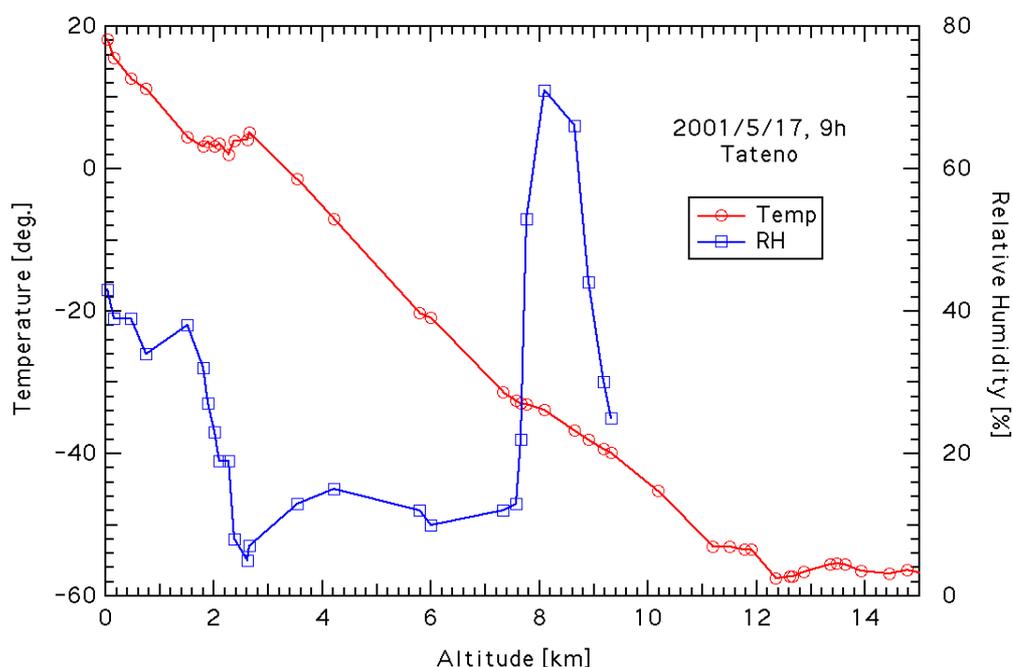


図 10, 2001 年 5 月 17 日 9 時の館野におけるラジオゾンデデータ

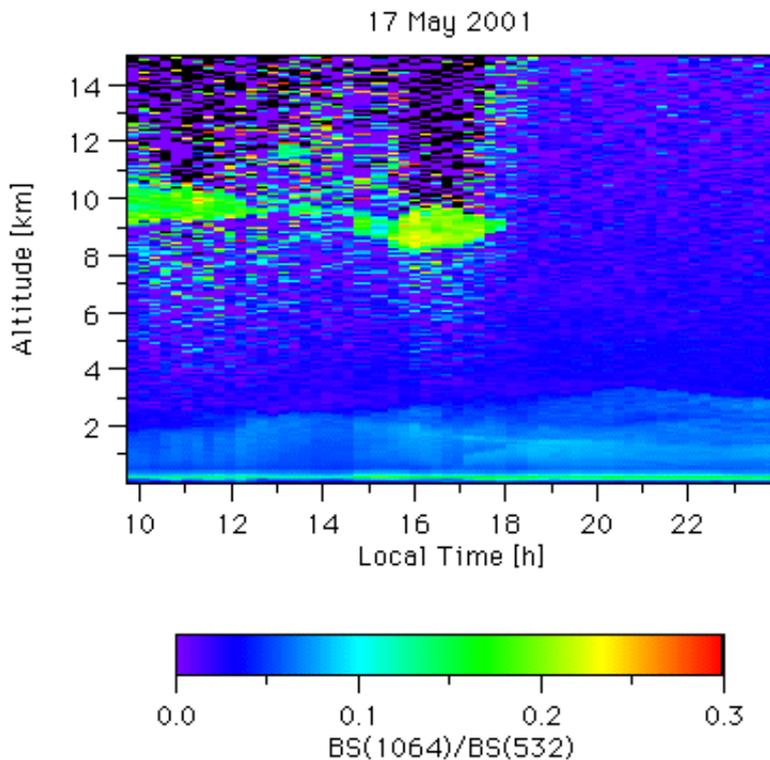


図 11, 2001 年 5 月 17 日の後方散乱強度の波長依存性
1064nm の後方散乱強度を 532nm のそれで割ったもの (相対値)

2 - 2 - 4 おわりに

本報告では事例的に黄砂と巻雲の相互作用及びハロー現象時のライダー・スカライラジオメーター観測を取り上げた。最近のライダー用計測器の発展によって従来より精度・確度を上げた観測が可能になってきており、ここで述べたような散乱強度の大きく異なる雲とエアロゾルを同時観測し、その関係を調べることができるようになってきた。さらに、統計的なまた気候学的な議論へ持っていくためには、連続観測が必須だろう。しかし、ハローのような大気光学現象を目の当たりにすると、実際に自分で目で確認しながら、事象を観測する態度も貴重に思われてくる。

2 - 2 - 5 参考文献

- 1) T. Murayama, H. Okamoto, N. Kaneyasu, H. Kamataki, and K. Miura, "Application of lidar depolarization measurement in the atmospheric boundary layer: effects of dust and sea-salt particles", *J. Geophys. Res.*, **104**, 31,781-31,792, 1999.
- 2) T. Sakai, T. Shibata and Y. Iwasaka, "Relative humidity, backscattering ratio and depolarization ratio as derived from Raman lidar observation", *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **75**, 1179-1185, 1997.
- 3) T. Sakai, T. Shibata, S.-A. Kwon, Y.-S. Kim, K. Tamura, Y. Iwasaka, "Free tropospheric aerosol backscatter, depolarization ratio, and relative humidity measured with the Raman lidar at Nagoya in 1994-1997: contributions of aerosols from Asian continent and the Pacific ocean", *Atmos. Env.*, **34**, 431-442, 2000.

- 4) T. Murayama, N. Sugimoto, I. Uno, K. Kinoshita, K. Aoki, N. Hagiwara, Z. Liu, I. Matsui, T. Sakai, T. Shibata, K. Arao, B.-J. Sohn, J.-G. Won, S.-C. Yoon, T. Li, J. Zhou, H. Hu, M. Abo, K. Iokibe, R. Koga, and Y. Iwasaka, "Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in east Asia", *J. Geophys. Res.*, **106**, 18,345-18,359, 2001.
- 5) Asian Pacific Regional Aerosol Experiment, <http://saga.pmel.noaa.gov/aceasia/>
- 6) K. Isono, M. Komabayashi, and A. Ono, "The nature and origin of ice nuclei in the atmosphere", *J. Meteorol. Soc. Jpn*, **37**, 211-233, 1959.
- 7) K. Sassen, "The lidar backscatter depolarization technique for cloud and aerosol research" in *Light scattering by nonspherical particles: Theory, Measurements, and Geophysical applications* (Academic Press), 2000.
- 8) T. Murayama, "Formation of ice cloud from Asian-dust particles in the upper troposphere", *Proc. SPIE*, **4153**, 218-225, 2001.
- 9) R. Gleenler, *Rainbows, halos, and glories*, Cambridge Univ. Press, 1980.
- 10) T. Nakajima, G. Donna, R. Rao, P. Boi, Y. Kaufman, and B. Holben, "Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions", *Appl. Opt.*, **35**, 2672-2686, 1996.
- 11) S. A. Young, "Analysis of lidar backscatter profiles in optically thin clouds", *Appl. Opt.*, **34**, 7019-7031, 1995.
- 12) K.-N. Liou and H. Lahore, "Laser sensing of cloud composition: a backscatter depolarization technique", *J. Appl. Meteorol.*, **13**, 257-263, 1974.
- 13) 気象庁月報平成 13 年 5 月 (CD-ROM) 編集 : 気象庁、発光 : (財) 気象業務支援センター