

## 北極海で発生する雲の鉛直構造の変化について

○佐藤 和敏（海洋研究開発機構／弘前大学），猪上 淳（海洋研究開発機構），  
堀 正岳（海洋研究開発機構），児玉 安正（弘前大学）

北極海の気候システムを支配している主要素の一つに雲の存在が挙げられる。雲は日射の反射や散乱による冷却効果（日傘効果）や雲底からの長波放射による加熱効果（温室効果）により、北極海の表面熱収支に影響を及ぼし、その経年変化は地球温暖化を含む全球スケールの気候変動とも関連する。雲による放射収支の変動は、雲量や雲の鉛直構造（雲底高度等）により変化する。一般に4～10月の北極海では、層雲や霧などで構成される背の低い北極層雲に覆われることが過去の観測から分かっている。しかし、近年の海水の劇的な減少に伴い、海洋から大気へ供給される熱・水蒸気の増加によって北極海上の雲量が増加するなど雲の特性が変化してきていると言われている。特に雲量が増加することで雲による温室効果が強化され、さらなる海水の減少を引き起こす可能性があると言われている。また、雲厚や相状態雲の鉛直構造の変化によっても北極海の放射収支が変動することが報告されており、海水の減少を引き起こす一因となっている可能性がある。以上のことから、海水と雲は密接な関係があると考えられるが、直接北極海上で雲の鉛直構造の観測が行われた事例は少ない。そこで近年の雲の鉛直構造の特徴を調べるため、2010年「みらい」北極海航海（MR10-05）で9月5日～10月13日の期間中にラジオゾンデ観測を計215回行った（定常観測：6時間毎、集中観測：3時間毎）。さらに、「みらい」では過去にもラジオゾンデ等を用いた北極海での観測が行われており、それらのデータも用いることで近年の雲の鉛直構造の変化を把握することが可能となってきた。

本研究では雲が存在する高度は湿度が高いことを利用し、ラジオゾンデ観測のデータから湿度98%以上の湿潤な層から雲底と雲頂を検出し、さらにそこから雲層を定義した。2010年のラジオゾンデ観測結果から、北極層雲の出現頻度は雲底高度500m以下で最多で、これは先行研究と矛盾しない傾向であるが、中には雲底高度が1km付近にある通常より高い対流雲が高頻度（約30%）で発生していた。このような雲底高度の多様性は西経162度ラインで3度実施した集中観測（北緯71～75度まで0.5度毎に実施）で明瞭に判別できた。1度目の集中観測時には雲頂高度約400m、雲底高度約130mの背の低い北極層雲が出現した。雲の発生環境は、冷たい海面上に南方からの暖気移流が卓越し、海洋大気との温度差は0.2℃と小さい状況であった。一方、2度目の集中観測時には対流性のいわゆる筋状雲が卓越し雲底高度も約650mと1度目の観測より高く、海水域からの寒気移流が海面上で顕著であった。風速や海洋大気との温度差（約4.5℃）も大きかったため、海面から大量の熱・水蒸気の供給を受け、対流性の雲が発生しやすい環境だったと考えられる。以上のことから、雲底高度と海面水温と気温の温度差（以下、SST-Ts）には相関関係があると予想されるため、期間全体のSST-Tsと雲底高度の関係を調べた。図1はSST-Tsとラジオゾンデ観測から求めた雲底高度の関係で（図中●印）、SST-Tsが小さい（大きい）ほど

雲底高度は低い(高い)関係が明らかである。特にその関係は SST-Ts の値が 3 度を境に急変し、前述の 1 度目集中観測時 (図中■印) の雲底高度は低く、2 度目の集中観測時 (図中▲印) には雲底高度が高くなっていることとも矛盾しない。しかし、2 度目の観測時は雲の検出が十分にできていない。これは筋状の対流雲の隙間には晴れ間も広がっているためで、雲量が少なかったことを意味する。「みらい」ではラジオゾンデ観測の他にシーロメーターによる雲底高度の連続観測も実施しているため同様の関係を調べると (図中+印)、SST-Ts の大小によって雲底高度が二極化する傾向や、SST-Ts の増加とともに雲底高度が 300m から 500m に上昇している点は、ラジオゾンデから検出した特徴と一致する。したがって、シーロメーターの連続データはラジオゾンデデータが少ない他の年の雲底高度を考察するのに極めて有用であることが分かる。

シーロメーターによる北極海の雲底高度の観測は過去 1999 年、2000、02、04、06、08、09 年にも「みらい」で実施されているため (9 月~10 月)、海氷の無い海域でのデータが 8 年分蓄積されている。図 2a はこれまでの「みらい」北極海航海で観測された雲底高度の発生高度頻度分布図である。500m 以下の雲底頻度が約 65% で最多だが、それより上空に雲底を持つ雲も約 35% と高頻度で出現している。「みらい」では海氷上の観測データは取得できていないが、1998 年に米国のプロジェクト (SHEBA) で実施された 9 月の氷上の雲底高度頻度分布 (図 2b) と比較すると、SHEBA (氷上: 図 2b) では雲底高度 500m 以下の雲が約 95% を占めているのに対し、「みらい」(海上: 図 2a) では高度 500m 以下の雲が減少し、代わりに高度 1km 付近に雲底を伴う雲の出現頻度が約 7 倍に増加していることが分かる。このように雲の発生環境が氷上と海上とで異なるのは、図 1 で見た関係が海氷の有無でも成り立っている可能性がある。1998 年当時は海氷域であっても、現在夏に海氷が存在し得ない海域は広く分布しているため、北極海全体で雲の発生環境が著しく変化していることを示唆する。今後海氷の減少が進行することで、雲底高度の他にも雲の特性がさらに変化していくことが考えられる。特に、北極海に存在する雲は何層も重なる多層構造を成す場合が多い。講演では、ラジオゾンデやシーロメーターで観測された 2 層以上の雲の変化についての解析結果も紹介する。

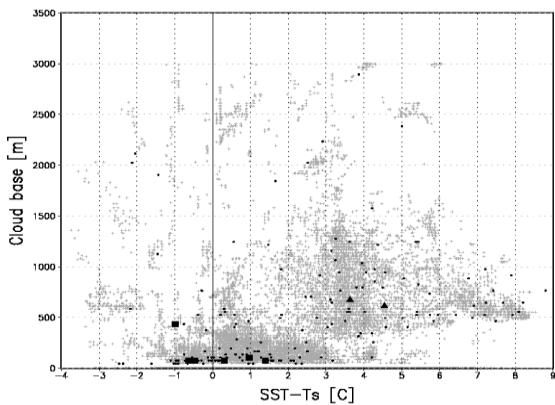


図 1: 2010 年 9 月~10 月の SST-Ts と雲底高度との関係。  
 ●: ラジオゾンデ観測で得られた雲底高度 (3~6 時間間隔)、  
 ■: 162W ラインでの 1 度目のラジオゾンデ集中観測時、  
 ▲: 162W ラインでの 2 度目のラジオゾンデ集中観測時、  
 + : シーロメーターによる雲底高度 (1 分間隔)。

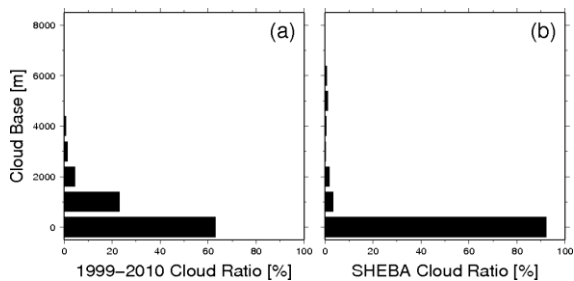


図 2: 雲底高度の発生高度頻度。(a)「みらい」北極海航海のシーロメーター観測 (1999-2010 年の各 9 月~10 月: 海上データ)、(b) SHEBA でのライダー観測 (1998 年 9 月)。縦軸は雲底高度 500m 以下を 0m、500~1500m を 1km 付近の雲、1500~2500m を 2km 付近の雲として 8km まで示している。