P138

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[1,2]・猪上　淳[1]・堀　正岳[1]・児玉　安正[2]

（1:JAMSTEC,2:弘前大院・理工）

1. はじめに：

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）や長波放射の吸収による加熱効果（温室効果）により、北極海の海面熱収支に影響を及ぼす。一般的に4～10月の北極海では、層雲や霧などで構成される低い雲に覆われることが過去の研究からわかっている。しかし、近年の劇的な海氷の減少に伴い、海面に入射する太陽放射が増加している。そのため、海面が温められることで大気にも影響が及び、雲底高度や雲量などの雲特性が変化していると指摘されている。

そこで、2010年9～10月に海洋地球観測船「みらい」による北極航海（MR10-05）を実施した。MR10-05では、通常卓越している層雲や霧の他に対流性雲が観測されていた。

本研究では、種類の違う雲の発生する気象場の比較や雲特性の変化による放射収支、海面熱収支に及ぼす影響、さらに雲底高度の経年変化を調べた。

2. 使用データ

1) 「みらい」北極海観測データ （1999,2000,'02,'04,'06,'08,'09,'10）
- 船上気象観測データ （風、温度、湿度、気圧、短波・長波放射、水温）
- シーロメータデータ （雲底高度）
- ラジオゾンデデータ （鉛直プロファイル）

2) ERA-Interim再解析データ （海面温度、気温）

3. 対流性雲発生時の様子と気象場：

雲特性の違いは、西経162度ライン（赤で囲まれたライン）で3回実施した集中観測（北緯71～75度まで0.5度毎に実施。1:9月13日15UTC～9月14日15UTC、2:9月27日15UTC～9月28日15UTC、3:10月10日15UTC～10月11日15UTC ）で明瞭に判別できた（図1）。図2は集中観測時の船首方向の写真で、特に1回目と2回目に明瞭な違いが見られた。また、この時、雲が発生している気象場にも違いがあることがわかる（図3）。

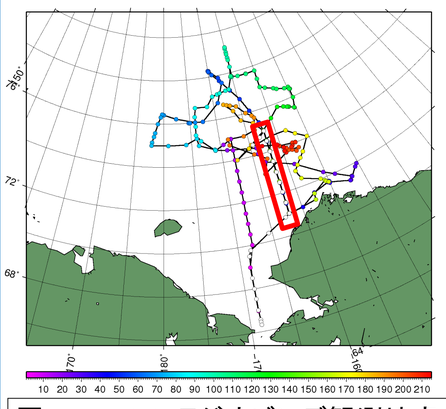


図1：MR10-05ラジオゾンデ観測地点。

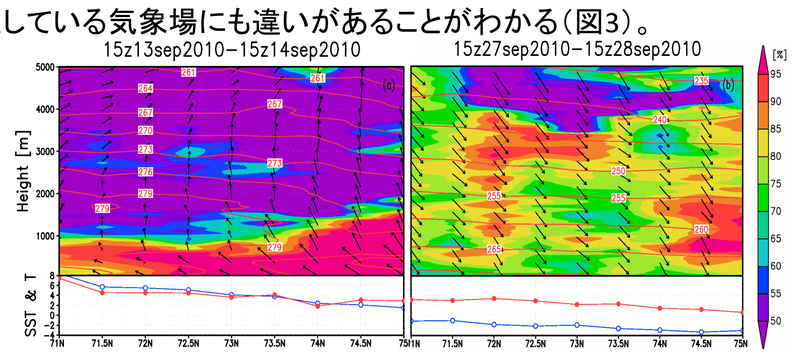


図3：ラジオゾンデで観測された、湿度、温位、水平風の時間高度断面図（上図）と海面水温（以下、SST：赤線）と気温（以下、Ts：青線）の時系列（下図）。（a）は1回目、（b）は2回目の集中観測時。

図2：3回の集中観測時の船首方向の写真。左：1回目、中：2回目、右：3回目。

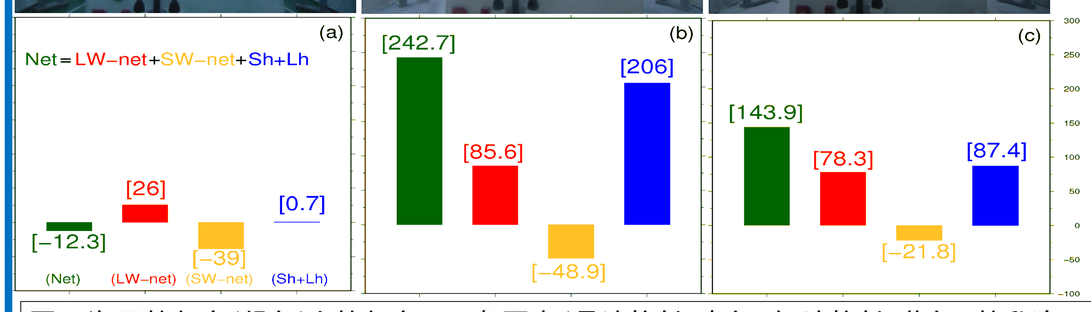


図6：海面熱収支（緑色）と熱収支への各要素（長波放射：赤色、短波放射：黄色、熱乱流フラックス：青色）の寄与を棒グラフで示した。値は上向き（海面を冷却）を正とした。（a）は1回目、（b）は2回目、（c）は3回目の集中観測時。

1回目の集中観測時

- 雲量10の雲底高度が低い層雲や霧が多かった。
- 南から流入した暖気が冷たい海面上で冷やされ凝結し、下層雲が発生。
- 海洋大気の温度差（SST-Ts）は、約0.2℃と小さかった。

2回目の集中観測時

- 雲量6と所々晴れ間があり、1回目より雲底高度が高かった。
- 海氷域から暖かい海面上への寒気移流が顕著であった。
- 風速（約10m/s）やSST-Ts（約4.7℃）が大きく、海面から大量の熱・水蒸気の供給を受け、対流性雲が発生しやすい状況であった。

4. SST-Tsと雲底高度の関係：

雲底高度とSST-Tsに相関関係がある予想されたため、散布図で示した（図4）。雲底高度は、ラジオゾンデデータの湿度98%以上の湿潤領域を雲が存在すると定義し、シーロメータによる観測データも用いた。

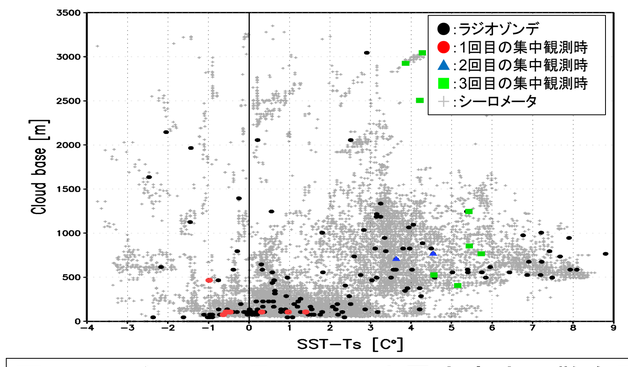


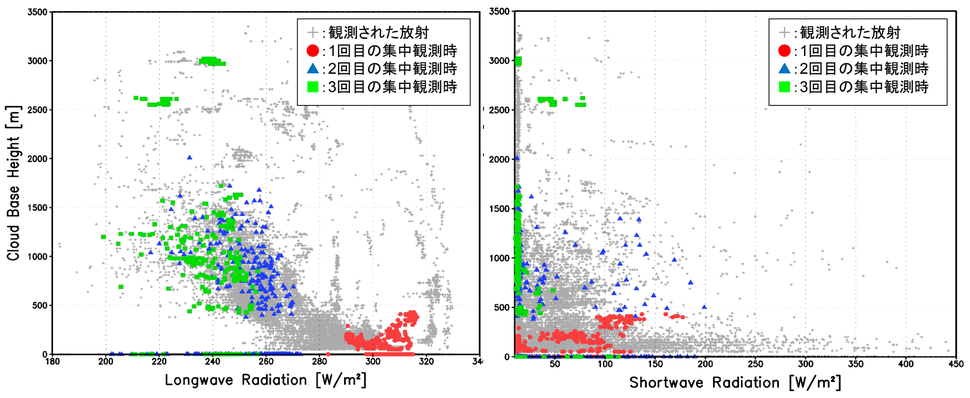
図4：2010年9～10月のSST-Tsと雲底高度の散布図。

- SST-Tsが小さい（大きい）ほど雲底高度は低い（高い）関係がある。
- SST-Tsが3℃を超えると、雲底高度の高い対流性雲が発生しやすくなっている。
- シーロメータによる観測は、3℃を境界に雲底高度が急変するなどの点でラジオゾンデと一致していることから、ラジオゾンデ観測が行われていない時を考察するのに有用である。

5. 放射と熱乱流フラックスとの関係：

雲特性の変化は、放射収支、さらに海面熱収支に影響する。そのため、雲特性が違いによる下向き長波放射への影響を調べた（図5）。また、3回の集中観測時について、雲量を考慮し、下向き放射と海面熱収支を調べた（図6）。海面熱収支は、熱乱流フラックスや上向き放射も考慮した。熱乱流フラックスの計算にはバルク式（Kondo 1975）を用いた。

図5：2010年9月～10月の放射フラックスと雲底高度の散布図。下向き長波放射（左図）、下向き短波放射（右図）。



- 2、3回目の集中観測時は、雲底高度が高く、雲量が少ない対流性雲が発生していたため、下向き長波放射が少ない。
- 2回目は雲量が少ないため、下向き短波放射が多い。しかし、3回目は季節的な日照時間の減少により少なくなっている。
- 海面冷却は熱乱流フラックスに依存しているが、太陽放射の少なくなる秋頃は、放射による海面冷却も強められる。

6. 海氷上（SHEBA）との比較と海洋上での経年変化：

海氷減少が雲へのどのような影響を与えているか、経年変化を調べた。図7は「みらい」のシーロメータにて海洋上で行われた観測と海氷上で行われたSHEBA観測（1997年10月～1998年10月）の雲底高度の発生高度頻度を示している。図8は、観測期間中の平均雲量と観測日数を示している。

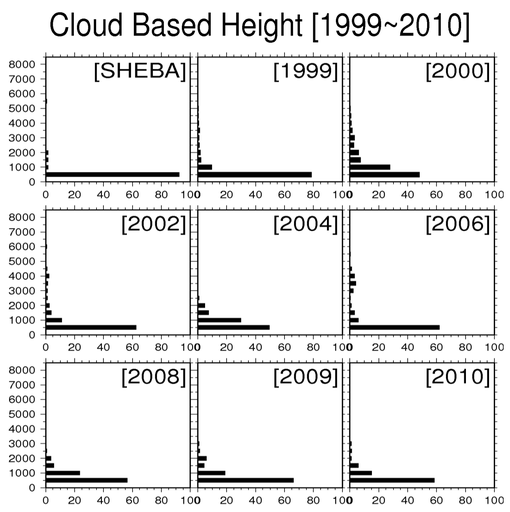


図7:SHEBAと各年の「みらい」における雲底高度の発生高度頻度。縦軸は雲底高度500m以下を500mとし、そこから500m毎に8000mまで示している。

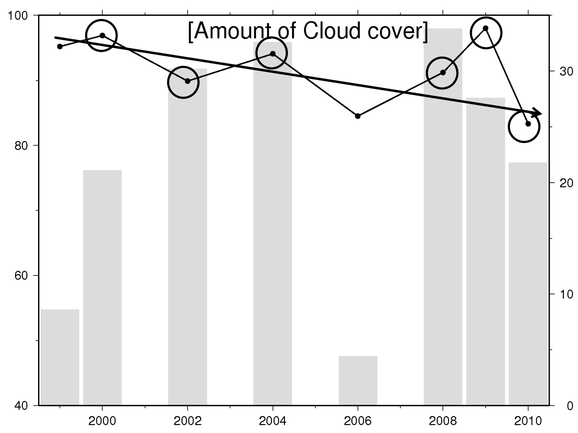


図8：「みらい」で観測された雲量の経年変化（黒線）。灰色棒グラフは観測日数を示している。

海氷の無くなった海洋上では、海氷上(SHEBA)に比べ、雲底高度の高い（500m以上）雲の出現頻度が多くなっている。また、海洋上では雲量が年々減少傾向にあり、近年対流性雲が発生しやすくなっている可能性がある。

7. 秋のSST-Tsの年々変動と海氷面積の回復：

ERA-Inteirm再解析データを用いて、「みらい」観測時以外の領域や季節について解析を行った。図4からSST-Ts>3（以下、ΔT3）の時に対流性雲が発生しているとし、最近10年間の日数トレンドを調べた（図9）。また、対流性雲が発生により海面冷却強められることで大気への熱放出が増加するため、最近10年間の気温トレンドについても調べた（図10）。

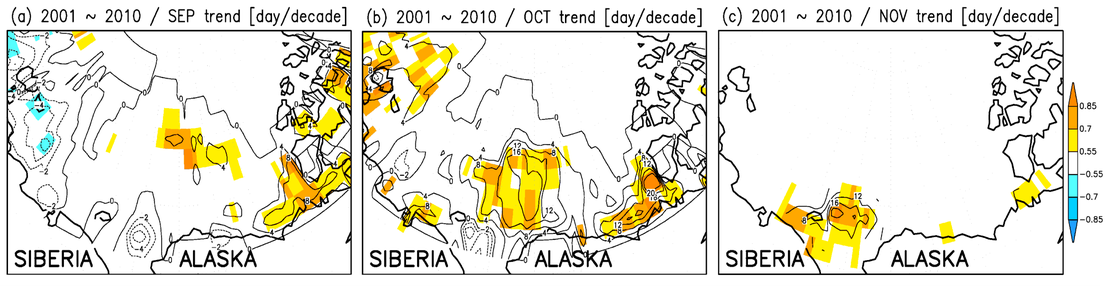


図9：最近10年のΔT3の日数トレンド図。有意水準90%以上の領域を着色。9（a）、10（b）、11（c）月。

9～11月ΔT3の日数は増加傾向で、特に近年の10、11月は10年間で2週間以上の増加を示していた（図9b,c）。これは海面から熱乱流フラックスが増加し、対流性雲が発生しやすくなっていることが考えられる。また、この領域内では気温も年々上昇傾向にあり（図10b,c）、秋に対流雲が発生しやすくなることで海面の熱が大気へ放出されやすくなり、海面の冷却が急速に進むことを示している。そのため、夏にいくら海氷面積が減少しても、11月頃に海氷面積が急回復し、冬にはどの年もほぼ同じ海氷面積になると考えられる。

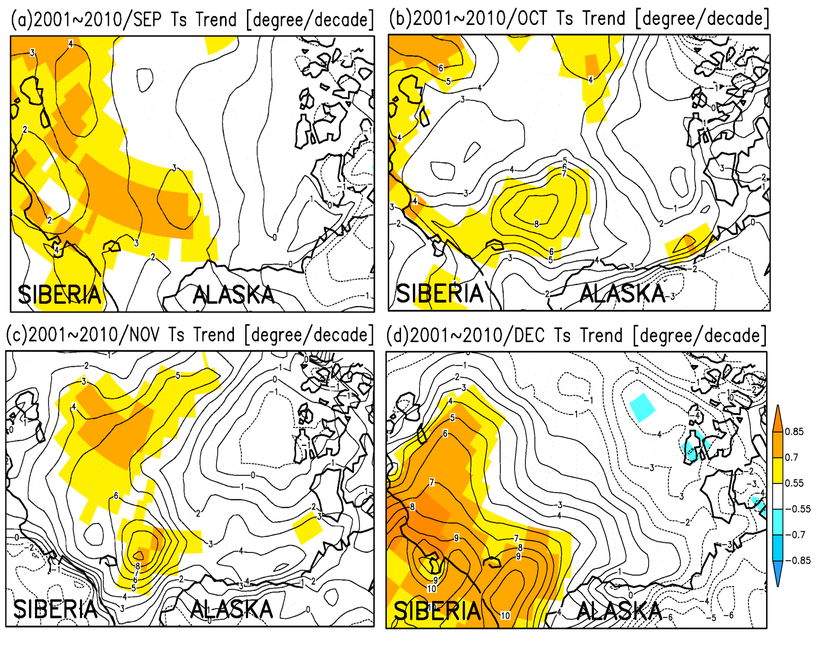


図10：最近10年間の気温トレンド図。有意水準90%以上の領域を着色。9（a）,10（b）,11（c）,12（d）月。

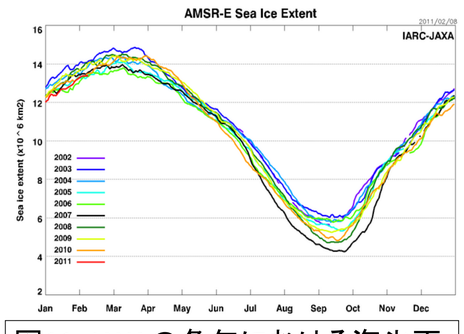


図11：JAXAの各年における海氷面積の季節変動。

謝辞：　MR10-05航海にあたり、観測技術員、「みらい」船員の皆様には大変お世話になりました。

8. まとめ：

海面上に海氷上からの冷たい空気が流入して海面大気の温度差が3℃以上になると対流性雲が発生しやすくなっていた。対流性雲の発生で下向き長波放射は減少し、海面冷却作用が働く。特に太陽放射の弱くなる秋頃に顕著となる。また、秋は近年対流性雲の発生頻度が増加しており、雲特性の変化により海面冷却が強まることで、近年秋頃の海氷面積急回復のプロセスに影響していると考えられる。さらに、海氷の急回復に伴い、大気への熱放出が増加することで、秋や初冬の温暖化の一因になっている可能性がある。