

暖候期北西太平洋域における雲の季節進行と経年変動

*佐藤大卓¹・中村尚¹・宮坂貴文¹・西井和晃¹・小守信正²・吉田聡²

(1: 東大先端研、2: 海洋研究開発機構)

1. はじめに

暖流である黒潮と寒流である親潮の合流域は海面水温 (Sea surface temperature: SST) の南北勾配が顕著な領域であり、海洋前線帯と呼ばれている。海洋前線帯の南北においては大気海洋間の熱や水蒸気のやり取りが大きく変わり、惑星境界層の様子にもはっきりとした差異が現れる。

特に暖候期には、海洋前線帯の北側の冷たい海洋上において対流圏下層安定度 (Lower-troposphere stability, LTS) が高く、そこで気候平均として下層雲量が多いことが知られている (Klein and Hartmann, 1993; Norris and Leovy, 1994)。また、経年変動については、SST と下層雲が正のフィードバックを介して結合変動する可能性が示唆されている (Norris et al., 1998)。

しかしながら、これまでの研究は夏季 (JJA) 平均による解析が主であり、暖候期 (5-10 月) 内の季節進行については着目されてこなかった。そこで本研究では、北西太平洋海洋前線帯近傍における下層雲について、気候平均の季節進行および各月ごとの経年変動の要因を探ることを目的としたデータ解析を行った。

2. 用いたデータと手法

本研究の解析は全て月平均データに基づいてなされた。解析期間は 1983 年 7 月から 2008 年 6 月までの暖候期 (5 月から 10 月) 25 年分である。

雲量については International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) D2 Data (Rossow and Schiffer, 1999) の月平均データを用いた。水平解像度は 2.5 度である。ISCCP では、雲頂気圧 (CTP) と光学的厚さ (τ) で雲を分類している。本研究では、そのうちの Stratus (CTP > 680 hPa, 22.63 < τ) と Stratocumulus (CTP > 680 hPa, 3.55 < τ < 22.63) に分類される雲量 (%) の和を下層雲量 (%) とみなした。

温度、風、水蒸気等の気象場については JRA-25 (Onogi et al., 2007) 月平均データを用いた。水平解像度は 2.5 度である。SST については、NOAA の OI SST のうち水平解像度が 1 度のものを用いた。

解析期間における各月の平均値を気候平均場とし、それからのずれを偏差とする。対流圏下層安定度の指標として、Klein and Hartmann (1993)、Norris and Iacobellis (2005) などと同様に

$$LTS = \theta_{700} - \theta_{surface}$$

で定義される LTS を用いた。

3. 結果

3. 1 気候平均の季節進行

図 1 に示されるように、暖候期を通して LTS と下層雲の分布は明瞭な対応関係を示す。特に、下層雲が顕著に出現する 6 月から 8 月にかけて、日本の東の海上 (140°E 以東) で下層雲が多く現れている。およそ 40°N を境にその北側では高い安定度の下で下層雲量が多く、南側では低い安定度の

下で下層雲量が少ない。これは SST front の存在を反映したものである。

季節進行をより簡潔に見るために、図 2 に 152.5~157.5°E で平均した緯度—時間断面を示した。梅雨期（6—7月）には高い安定度の下で下層雲量が多く、秋雨期（9—10月）には低い安定度の下で下層雲量が少ないという、8月（盛夏期）を境にした非対称性があることが分かった（図 2 (a)）。このような安定度の季節進行を理解するために、40°N 以北に着目して θ_{700} と SST の季節進行を考える。図 2 (b)において、SST は 8月から 9月かけて極大になり、図 2 (c)より θ_{700} は 7月から 8月にかけて極大になることがわかる。よって、梅雨期に安定度が高いのは SST よりも θ_{700} の昇温が速いためであり、秋雨期に安定度が低いのは SST が極大を迎えている一方で θ_{700} が冷えて始めているからであると解釈される。

3. 2 経年変動

次に各月ごとに下層雲の経年変動について調べた。以下では特に下層雲量が多い夏季（6月—8月）についての結果を示す。

まず各格子点において、各月ごとに下層雲量偏差と LTS 偏差との相関係数を計算した（図 3）。気候平均場では、LTS の高い領域では下層雲量も多いという明瞭な対応関係が見出されたが、経年変動についてはその限りでないことがわかった。6月、7月の 30°N 以南、8月の SST 前線付近では両者の間に正の相関が見られ、気候平均と整合的であるが、特に下層雲が多く出現する亜寒帯海洋上においては両者の間には相関関係が見られない。さらに 7月の千島列島の東においては負の相関関係すら見られる。すなわち LTS が低い年は下層雲量が多い年になりやすいことを示しているもの

であり、直感に反する結果である。

図 4 は SST front の直上 (KOE region: [35~45°N, 140°E~180°]の海上) とその南北 (SUBTROPICS region: [20~35°N, 120°E~180]の海上, SUBARCTIC region: [45~60°N, 140°E~180°]の海上) に領域を区切り、各領域において全期間のデータを用いて作った散布図である。図 5 は図 4 同様の散布図であるが、偏差のみを用いた点が異なる。ここでは KOE region と SUBARCTIC region について述べる。図 4 より、KOE region では夏季を通して LTS と下層雲量の間には正の相関関係があるが、SUBARCTIC region では 6月、7月には明瞭な対応関係が見られないことがわかる。一方、偏差で見ると、8月の KOE region では正の相関、7月の SUBARCTIC region では負の相関があるように見えるが、それ以外については明瞭な関係は見出されない（図 5）。すなわち、これらの領域の下層雲量の経年変動を単純に LTS の高低に結びつけた説明ができないことが示唆される。

図 6 は、各格子点で全期間中において雲量が最大および最小になるときの雲量と LTS を基に描いた散布図である。ここでは KOE region についてのみ示してある。6月に最も顕著に見られるように、雲量が最大のケース、最小のケースいずれも LTS と下層雲量の間には正の相関があるが、LTS が高くなるほど、雲量の最大値と最小値の差が広がっていくことがわかる。すなわち、LTS が高いことは下層雲量が多く出る機会を与えはするが、逆に LTS が高いからと言って必ずしも下層雲量が多いわけではないということである。言い換えれば、LTS が高いことは下層雲量が多いための必要条件に過ぎないことが示唆される。

次に下層雲量と南北風との関係を見る。図7はKOE regionにおける雲量のヒストグラムであり、南北風の値に応じて3通りは色分けされている。Percentageは領域内の全グリッド(80個)に対する存在比である。雲量が最大のケースと最小のケースを比較すると、どの月についても、最小のケースは最大のケースよりも南風の割合が高いことがわかる。すなわち雲量が少ない時は南風が吹く傾向にあるといえる。6月は特にその傾向が顕著であるが、7月と8月は雲量が多いビンでも南風の割合は少なくない。

しかしながら、月平均南北風が弱いことは必ずしもその月を通して南北風が弱いわけではなく、むしろ頻繁に北風、南風が変わるような状況であった可能性も考えられる。Norris and Iacobellis (2005)やTanimoto et al. (2009)によれば、梅雨期のKOE regionにおいて、SST frontの北側で南風が吹く場合には海上に霧が発生しやすく、南側で北風が吹く場合には混合層の発達に伴って層積雲系の雲が出やすい。したがって、雲量が多いビンで月平均南北風が弱いことは、submonthlyの南北風変動が活発だった状況の現れの可能性がある。

すなわち、下層雲量と南北風との関係をより精細に捉えるためには、今後はsubmonthlyデータを使って解析しなければならないと考える。

4. まとめ

・気候平均の下層雲の季節進行

暖候期を通して、下層雲とLTSの間には明瞭な対応関係があることが確かめられた。さらに、梅雨期(6-7月)には高い安定度のもとで下層雲量が多く、秋雨期(9-10月)には安定度の低下にともなって下層

雲量が少ないという、盛夏期(8月)を境にした非対称性も見出された。安定度の季節進行には、SSTの昇温が大気の昇温に比べて遅れることが効いていると考えられ、それにもなって下層雲量も季節変化している。

・下層雲の経年変動

直感に反して、気候平均で雲量が多い亜寒帯海洋上では、LTSと下層雲量の間には有意な正の相関関係が見出されなかった。雲量が最大および最小になる時の雲量とLTSとの散布図から、LTSが高いことは下層雲量が多いための必要条件に過ぎないことが示唆された。

ある程度以上に成層安定で下層雲量が多ければ、下層雲量は成層度に対して鈍感であり、他の要因(水蒸気輸送、温度移流など)が雲量の多寡に効いてくるであろうと考えられるが、それはまだ特定できていない。今後は6-hourlyのデータから計算した水蒸気輸送、温度移流などを用いて、雲量変動との関係を明らかにしていきたいと考えている。

参考文献

- Klein, S. A., and D. L. Hartmann, 1993: The seasonal cycle of low stratiform clouds. *J. Climate*, **6**, 1587-1606.
- Norris, J. R., and C. B. Leovy, 1994: Interannual variability in stratiform cloudiness and sea surface temperature. *J. Climate*, **7**, 1915-1925.
- Norris, J. R., and Y. Zhang., and J. M. Wallace, 1998: Role of low clouds in summertime atmosphere-ocean

interactions over the North Pacific. *J. Climate*, **11**, 2482-2490.

Norris, J. R., and S. F. Iacobellis, 2005: North Pacific cloud feedbacks inferred from synoptic-scale dynamic and thermodynamic relationships. *J. Climate*, **18**, 4862-4878.

Onogi, K., and Coauthors, 2007: The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.

Rossow, W. B., and R. A. Schiffer, 1999: Advances in understanding clouds from ISCCP. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 2261-2287.

Tanimoto, Y., S.-P. Xie, K. Kai, H. Okajima, H. Tokinaga, T. Murayama, M. Nonaka, and H. Nakamura, 2009: Observations of marine atmospheric boundary layer transitions across the summer Kuroshio Extension. *J. Climate*, **22**, 1360-1374.

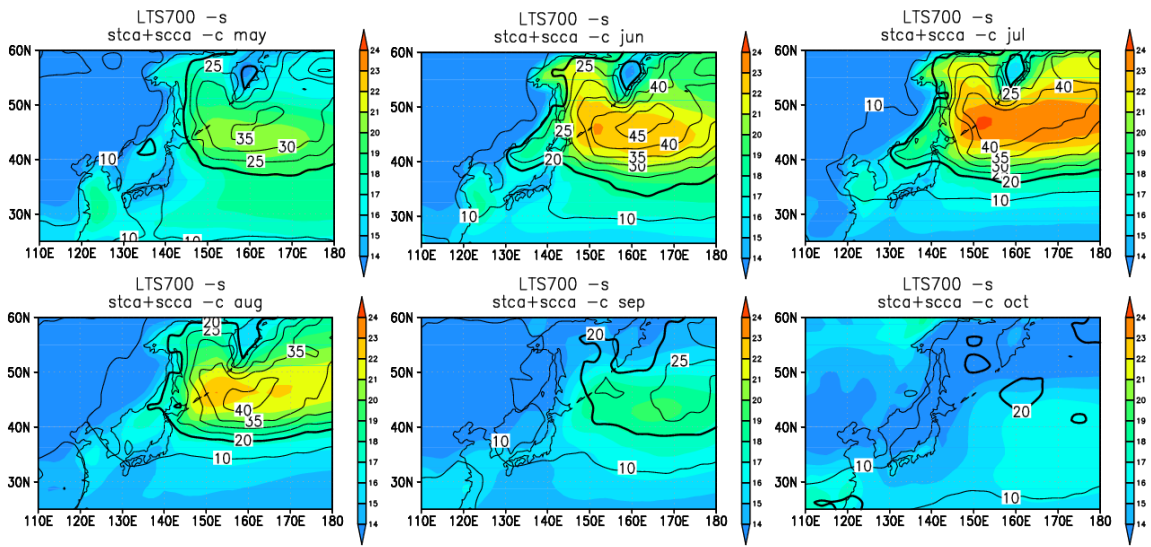


図1： 暖候期（5月から10月）の気候平均。解析期間は1983年7月から2008年6月。等値線は下層雲量（単位は%）。カラーはLTS（単位はK）。.

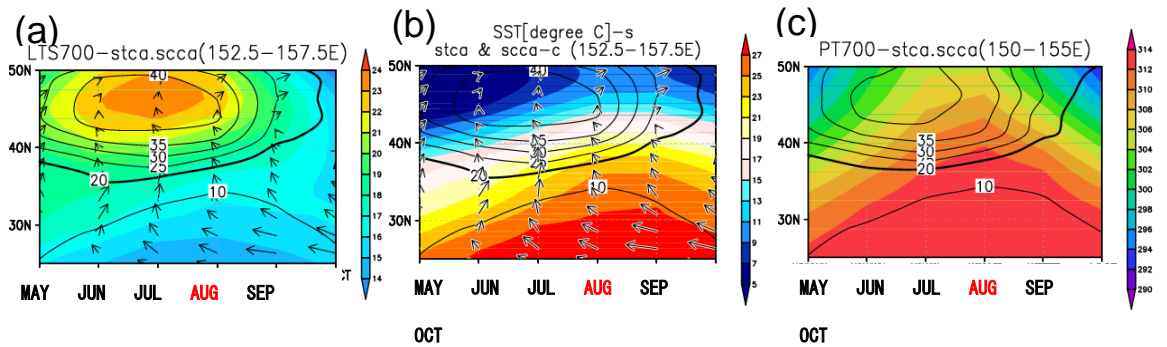


図2： 152.5~155°E 平均した緯度時間断面。等値線は全ての図において下層雲量（単位は%）を表す。カラーは(a) LTS、(b) SST、(c) θ_{700} 。

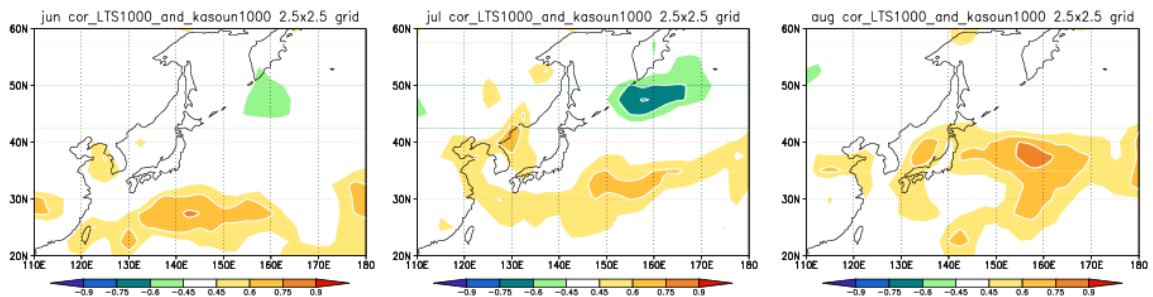


図3： 各格子点における下層雲量偏差と LTS 偏差の相関係数。左から6月、7月、8月。色はt検定で95%以上有意であることを示す。

JUN

JUL

AUG

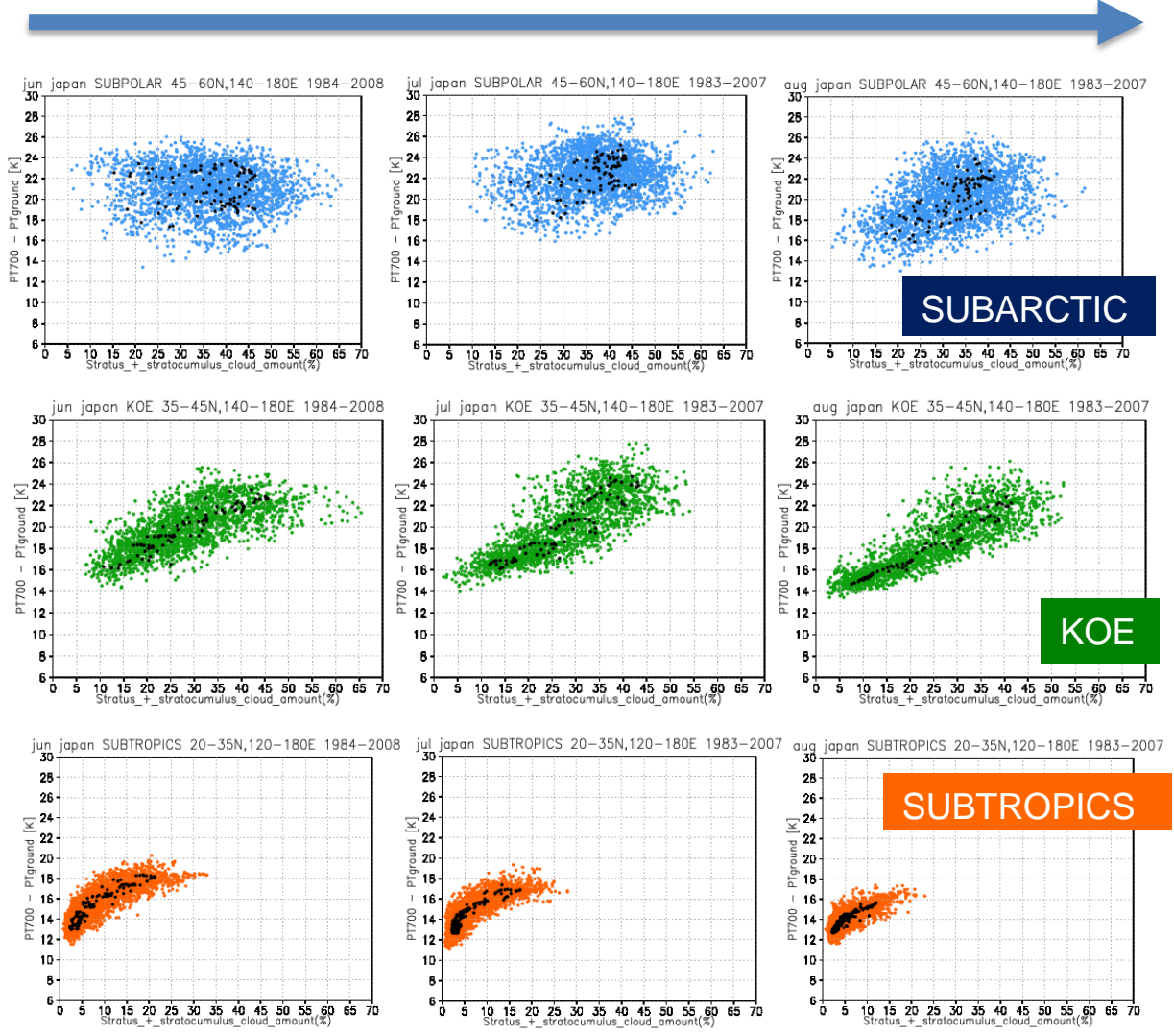


図4：全期間のデータを用いた各領域における下層雲量（横軸）と LTS（縦軸）の散布図。左から6月、7月、8月。上段は SUBARCTIC region [45~60°N, 140°E~180°]の海上、中段は KOE region [35~45°N, 140°E~180°]の海上、下段は SUBTROPICS region [20~35°N, 120°E~180°]の海上。黒点は気候値を示す。

JUN

JUL

AUG



SUBARCTIC

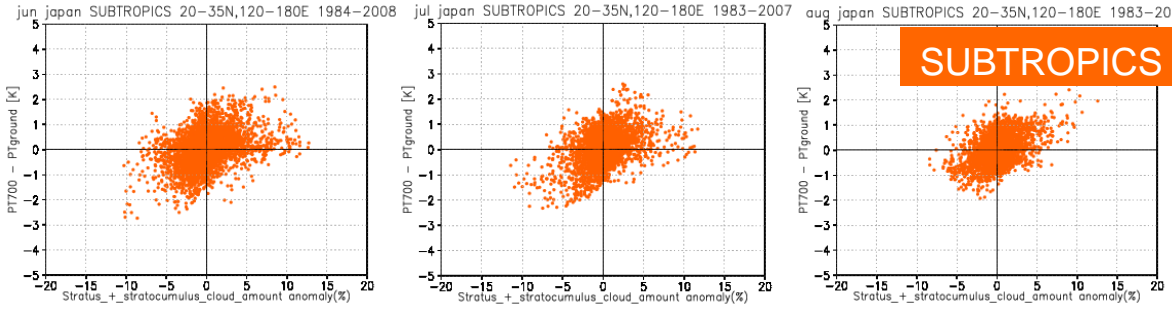
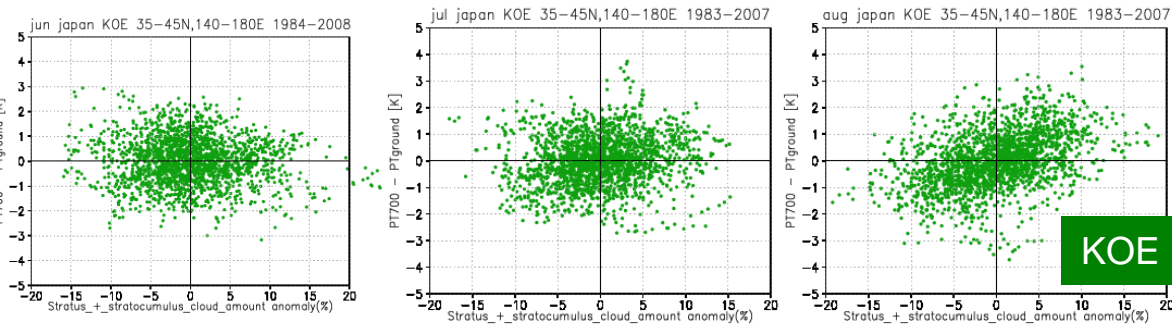
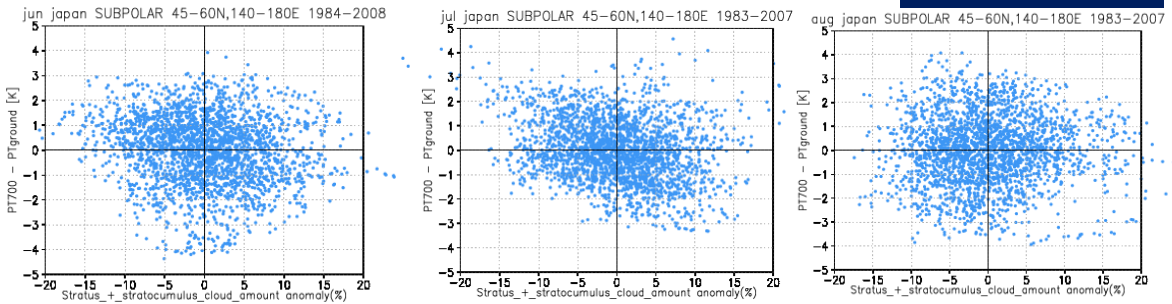


図5： 図4において用いたデータを気候平均からの偏差に変えたもの。

JUN

JUL

AUG

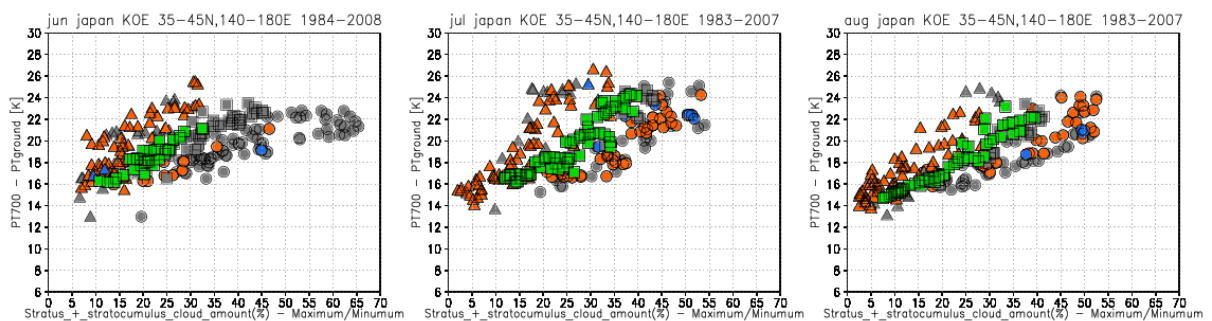


図6： KOE region の各格子点において雲量が最大および最小になるときの雲量（横軸）と LTS（縦軸）の散布図。左から6月、7月、8月。●印は雲量が最大の場合、▲は雲量が最小の場合で、■は気候値を示す。さらに橙色は10m 南北風（v10）が1m/s 以上になる点、灰色はv10 の大きさが1m/s 以下の点、青色はv10 が-1m/s 以下になる点を示す。右凡例参照。

- : 雲量最大 & $v_{10} > 1$ m/s
- : 雲量最大 & $|v_{10}| < 1$ m/s
- : 雲量最大 & $v_{10} < -1$ m/s
- ▲ : 雲量最小 & $v_{10} > 1$ m/s
- ▲ : 雲量最小 & $|v_{10}| < 1$ m/s
- ▲ : 雲量最小 & $v_{10} < -1$ m/s
- : 気候値 & $v_{10} > 1$ m/s
- : 気候値 & $|v_{10}| < 1$ m/s

JUN

JUL

AUG

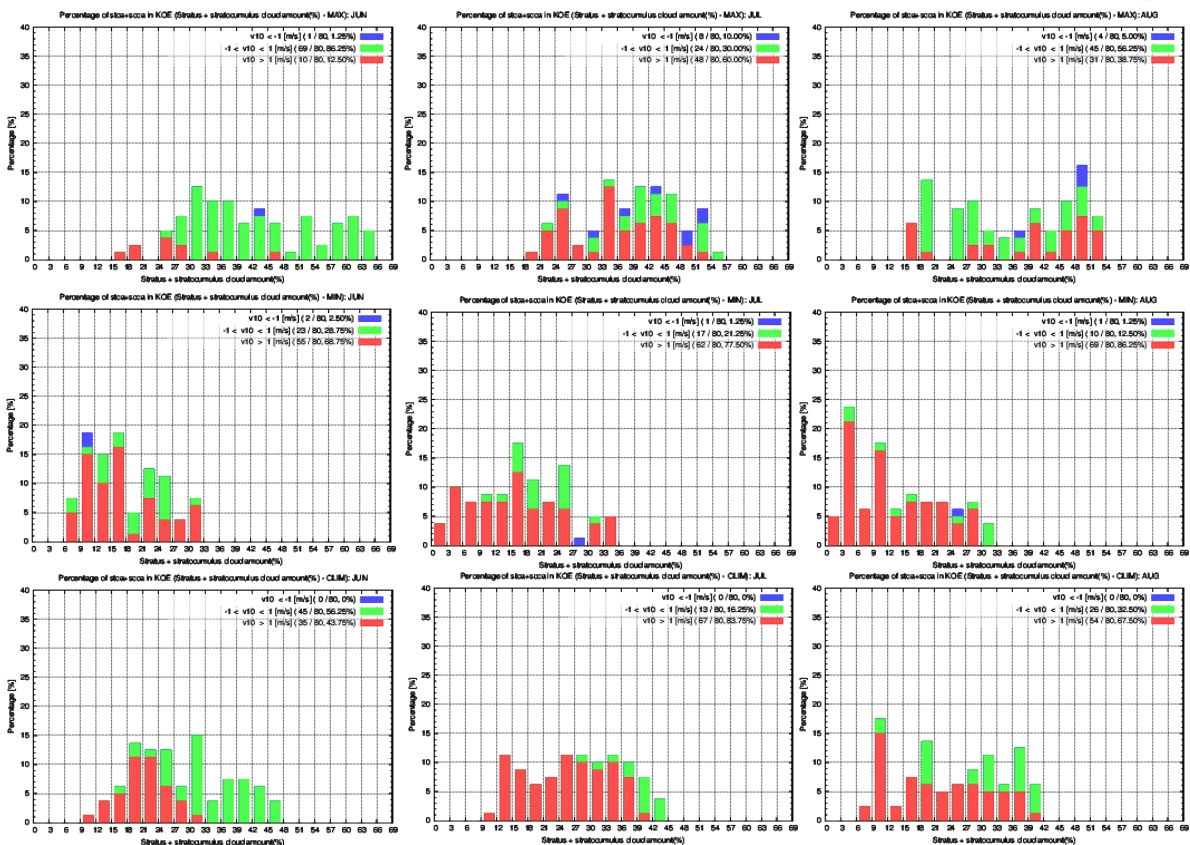


図7： KOE region における各雲量ビンの存在比ヒストグラム。左から6月、7月、8月。上段は雲量が最大の場合、中段は雲量が最小の場合、下段は気候平均を表す。赤は10m南北風 (v10) が1m/s以上になる点、緑色はv10の大きさが1m/s以下の点、青色はv10が-1m/s以下になる点を反映している。