

「エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会」
at 国立極地研究所 2017年2月16日

衛星から見た極域・高緯度の下層雲の 特徴

川合秀明¹、藪将吉²、萩原雄一郎³、神代剛¹、岡本創⁴

1: 気象研究所気候研究部

2: 気象庁数値予報課

3: 宇宙航空研究開発機構

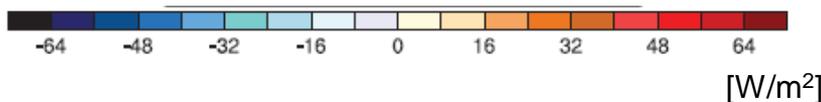
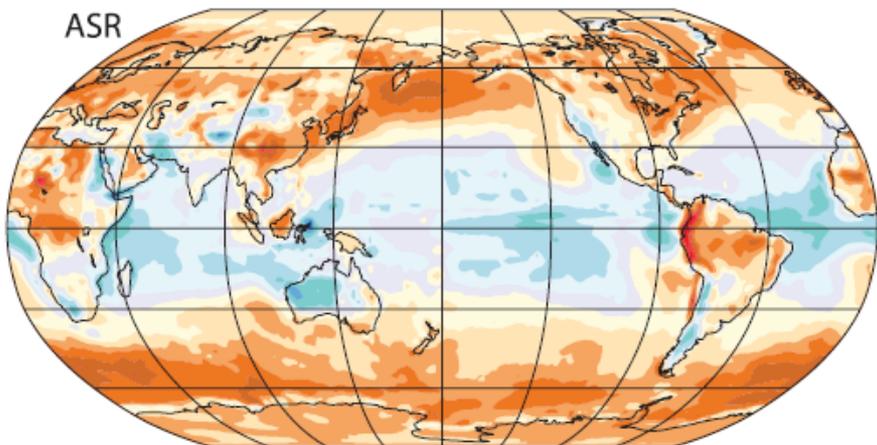
4: 九州大学応用力学研究所

0: 再現困難な南極海周辺の雲...

大気上端下向き短波放射誤差

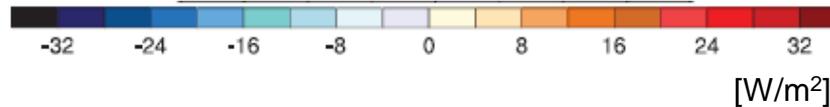
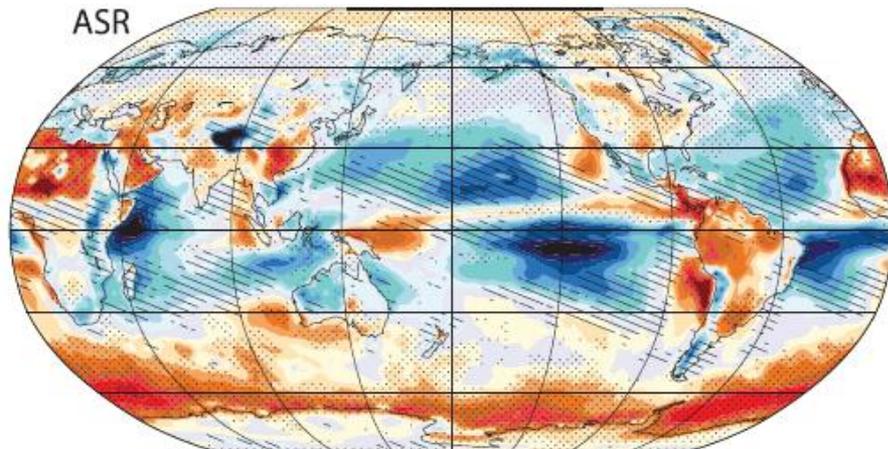
JRA25

ASR



CMIP3モデル平均

ASR



南緯60度付近の放射のバイアスが大きい。
気象庁モデルだけではなく、世界の多くの
モデルでこのバイアスは大きい...

Copied from Trenberth & Fasullo (2010)

(CERES観測値に対する誤差)

気象庁モデルは、北太平洋でもバイアスが大きい...

南極海周辺の雲の反射が不十分な原因

- そもそも、雲量自体が不十分（←特に気象庁モデル・気象研CMIP5用モデル）
- 光学的厚さが不十分
 - ・ モデルでは固体の雲水量が多く、液体の雲水量が少ない
 - 液体の雲水より氷晶の方が粒が大きいいため、雲水量が同じなら、光学的に薄くなってしまう。
 - ・ モデルでは南大洋のエアロゾルが少ない（人為起源も少なく、ダストも少ない）ため、雲粒数密度が小さくなる。

なぜ、南大洋の雲は光学的にかなり厚いのだろう...？

夏季の海上上下層雲のモデル再現性の向上

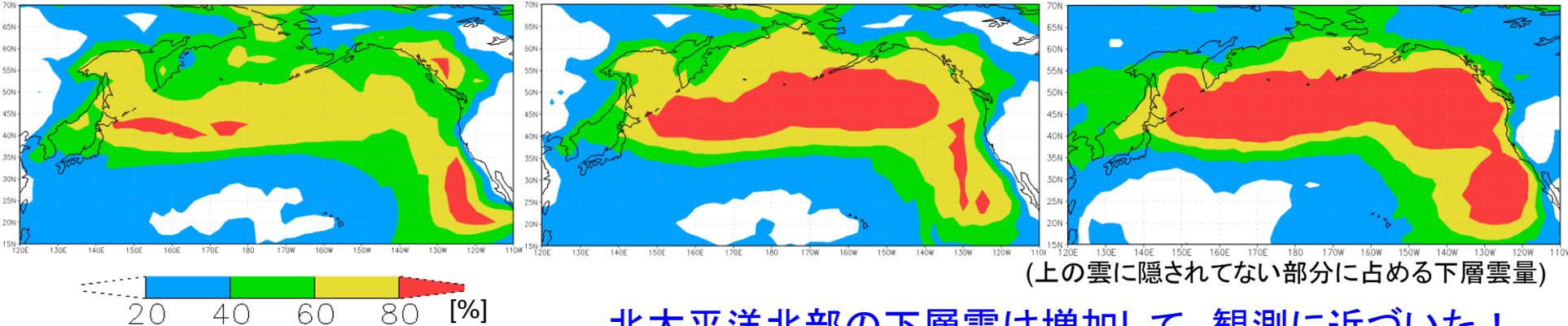
使用モデル： 気象庁GSM

下層雲量 (7月)

現業スキーム

新下層雲スキーム

ISCCP観測下層雲量

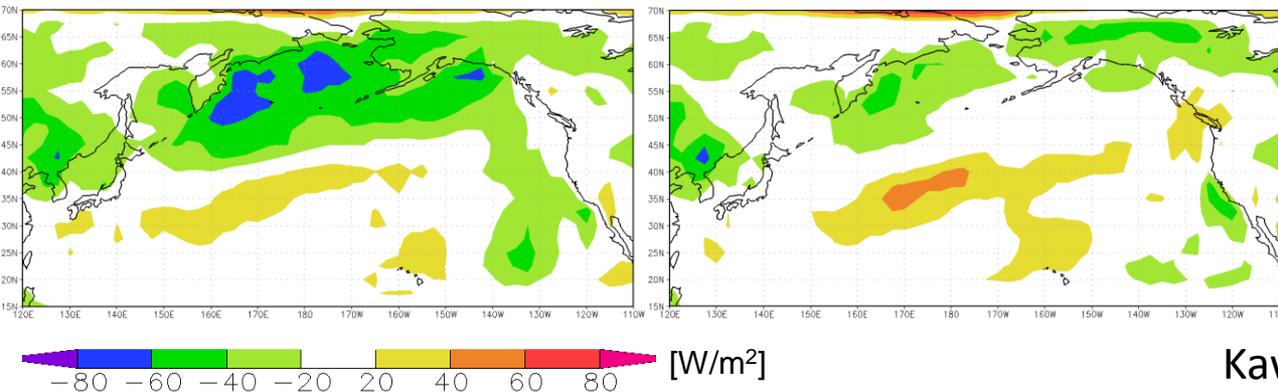


北太平洋北部の下層雲は増加して、観測に近づいた！

大気上端上向き短波放射誤差 (7月)

現業スキーム

新下層雲スキーム

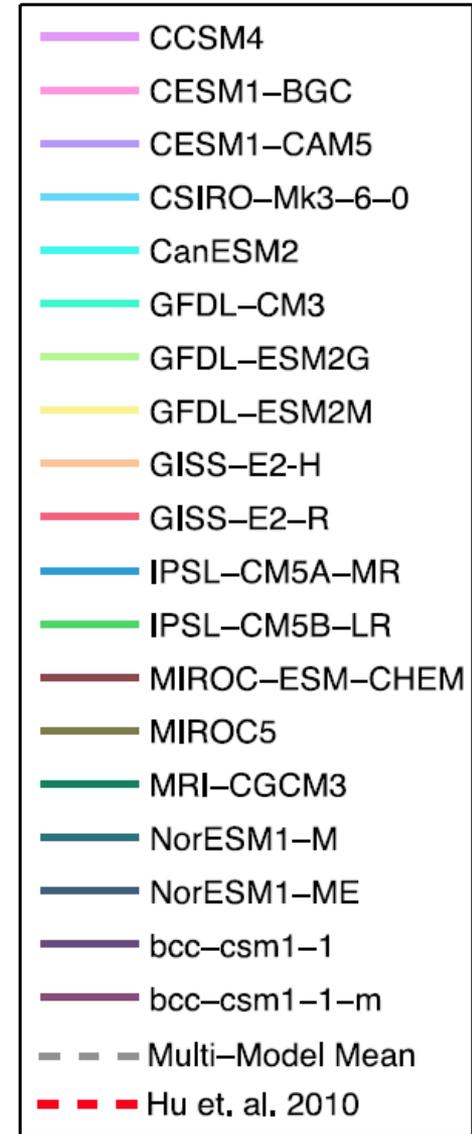
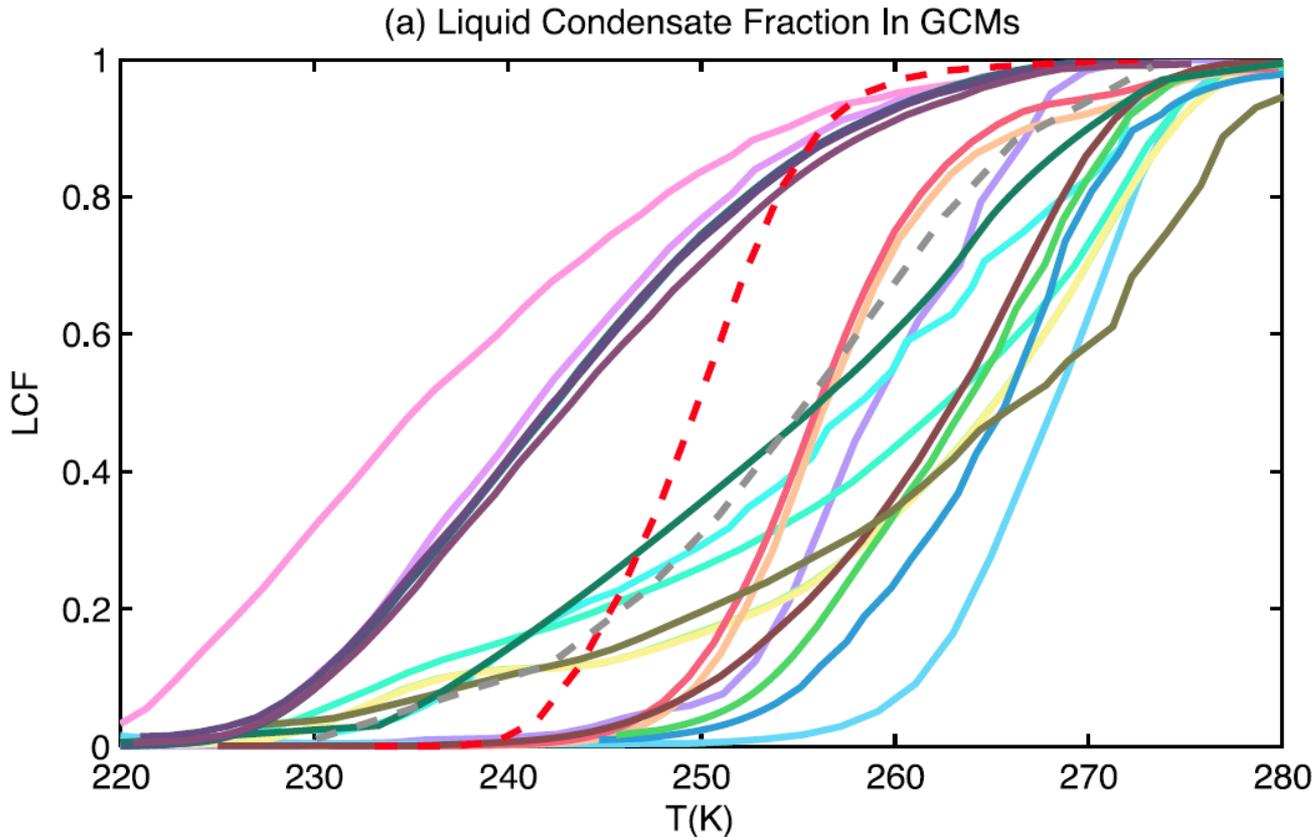


新下層雲スキームでは、
○これまで過剰に起きていた中緯度の下層雲の雲頂における乾燥空気の流入(、及び雲水の消散)が抑えられている。
○また、雲水から降水への過剰な変換が抑制されている。

Kawai (2013, *WGNE Blue Book*, 43)

北太平洋北部の短波放射の反射過少バイアスが減少した！

雲の液相固相比の温度依存



McCoy et al. (2015, JGR)

ほとんどのモデルは、観測よりも液体の雲の割合が少ない！

Hu et al. (2010) は、CALIPSOから比を求めている。

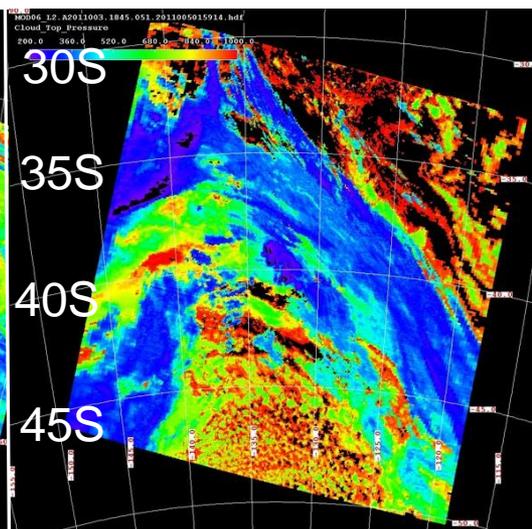
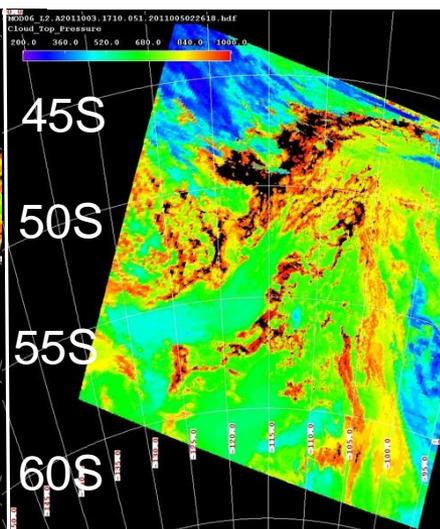
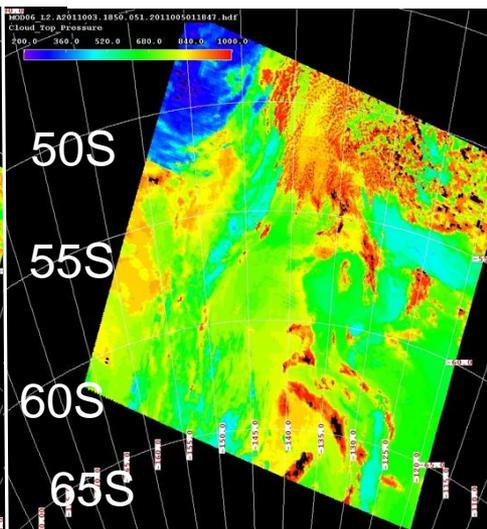
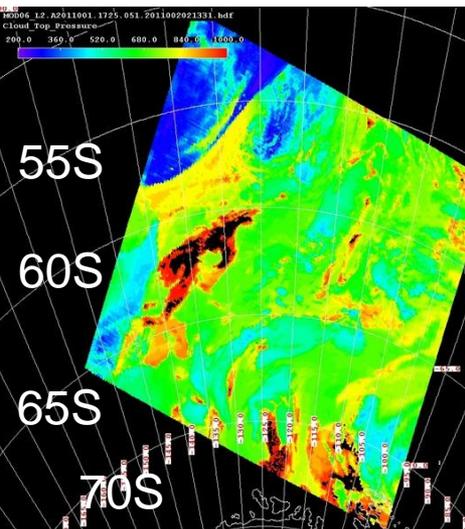
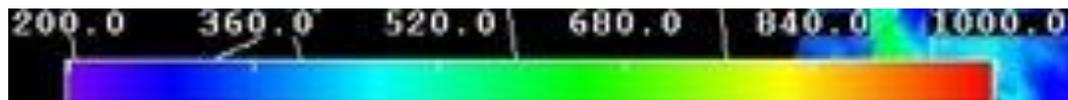
これは南大洋の比較だが、少なくとも観測は、他の領域でも似た感じ...。

気象研の気候モデルでの改善の話は、2017年春学会などで...

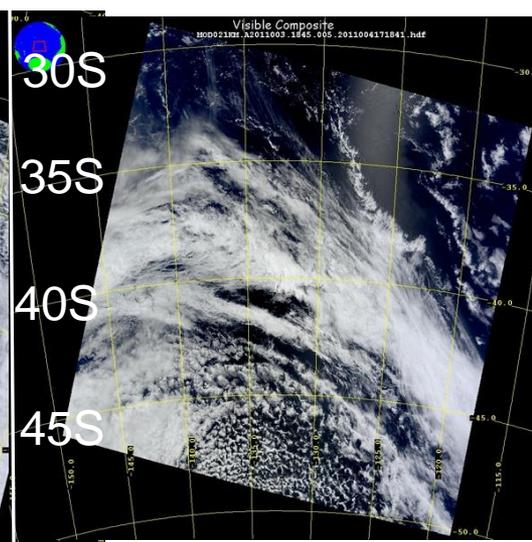
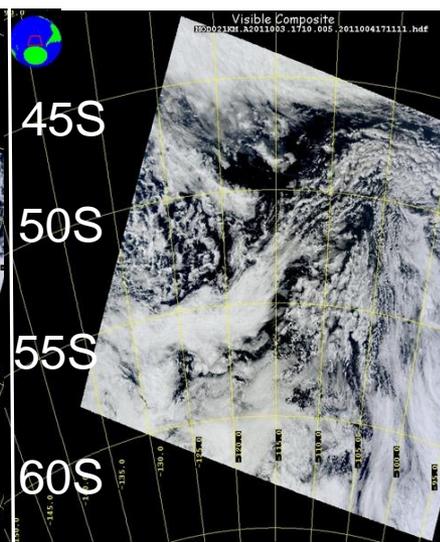
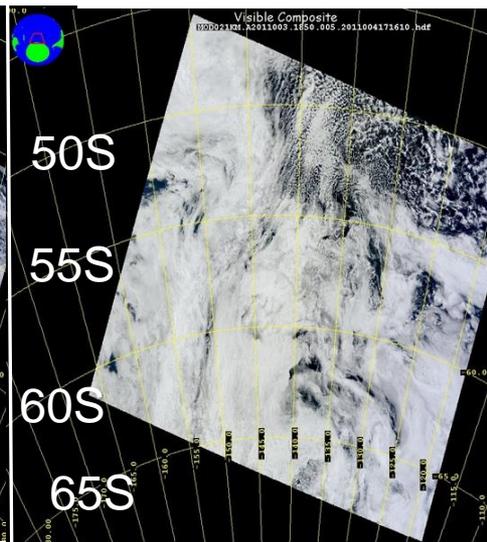
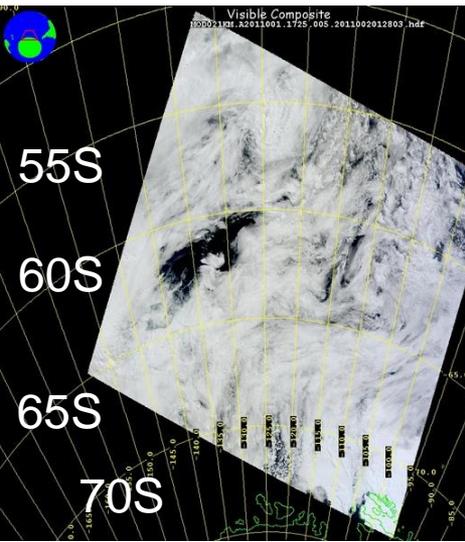
南大洋のMODISの画像を見てみると...

高緯度では、やっぱり光学的にかなり厚い...

雲頂気圧



可視画像

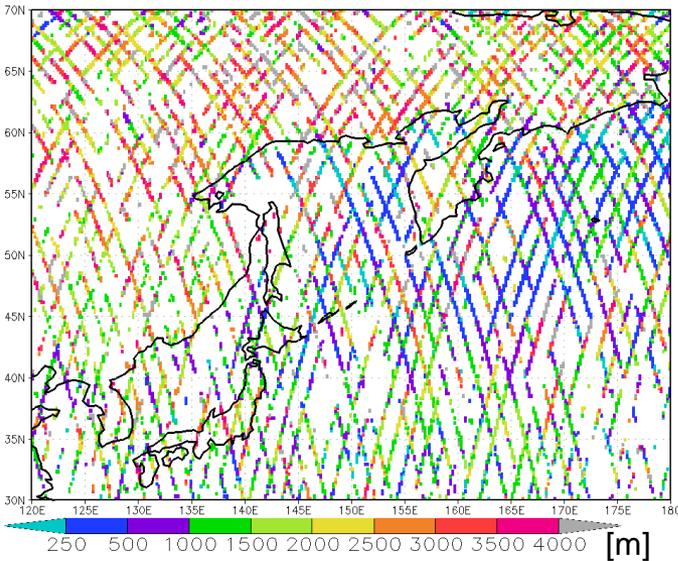


1. 中緯度の下層雲

データ

使用衛星データ: 九大雲マスクデータ
(C2: CALIPSO)
使用データ期間: 2007-2009
下層雲の定義: 雲頂5 km 以下の雲
使用気象データ: ERA-Interimデータ

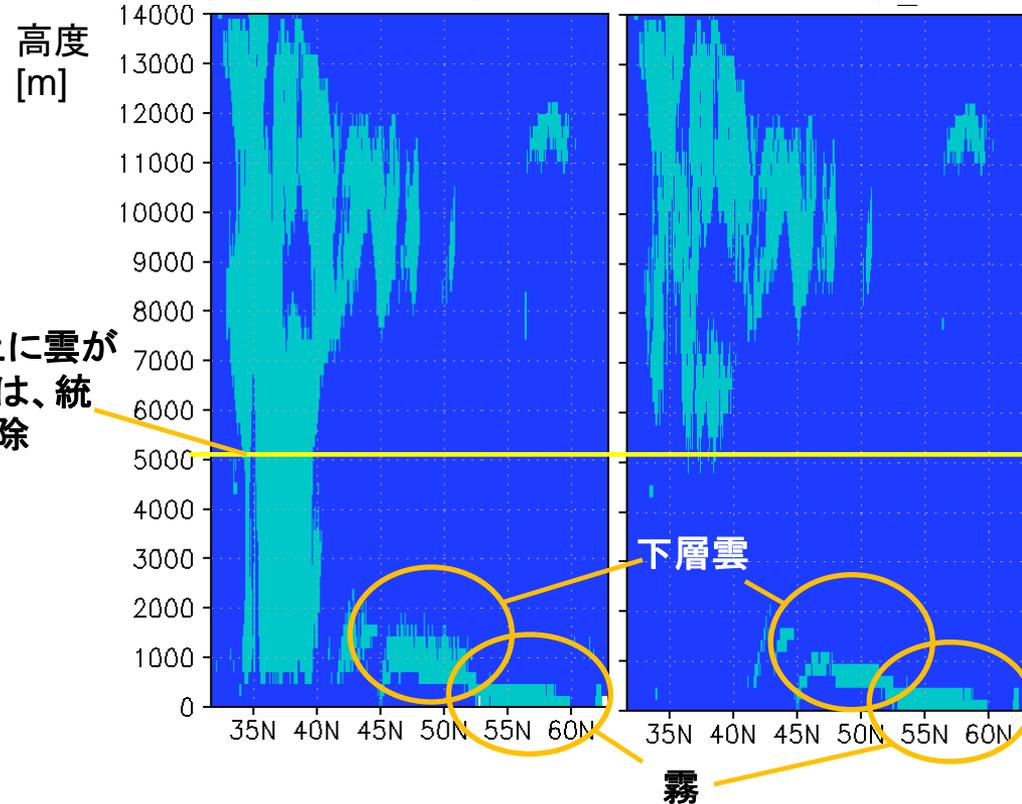
九大雲マスクの水平分布 — 雲頂高度 —



7月

軌道の間隔は $1.5^{\circ} \times 2.0^{\circ}$ 程度。
地球全体を覆うのに18日かかる(1日14周)

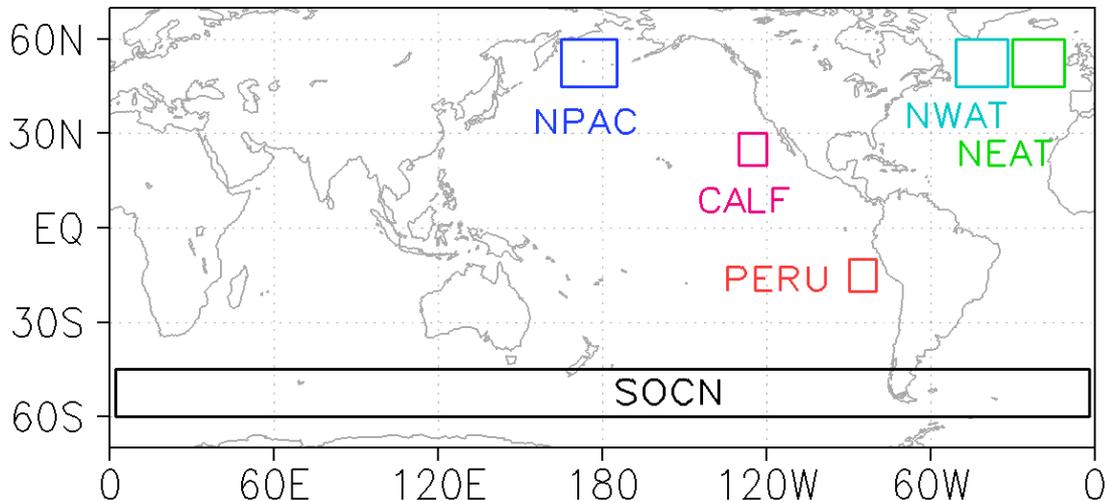
九大雲マスク(軌道データ)の例 C4データ C2データ



175E付近を通る軌道

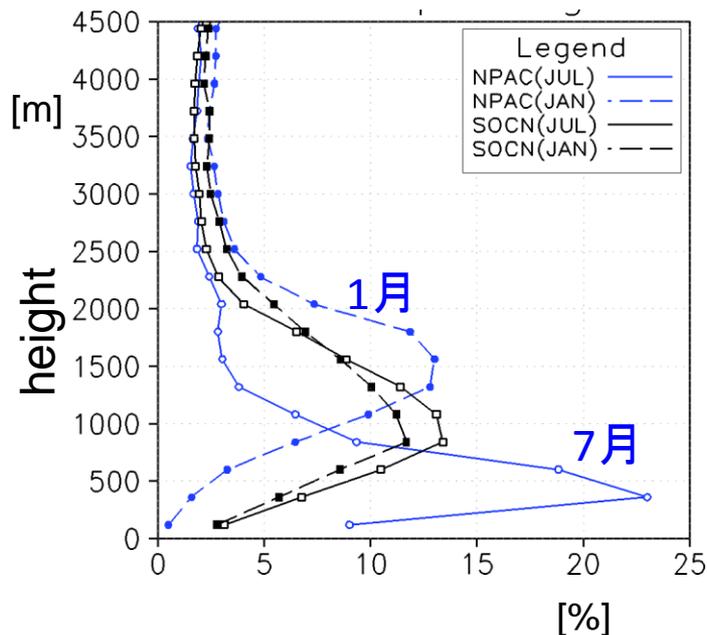
水平解像度: 1.1km
鉛直解像度: 240m

調査対象領域



北半球と南半球の中緯度下層雲の鉛直構造の比較

雲頂高度の相対出現頻度



北太平洋

南大洋

1月 or 7月データ

北半球:

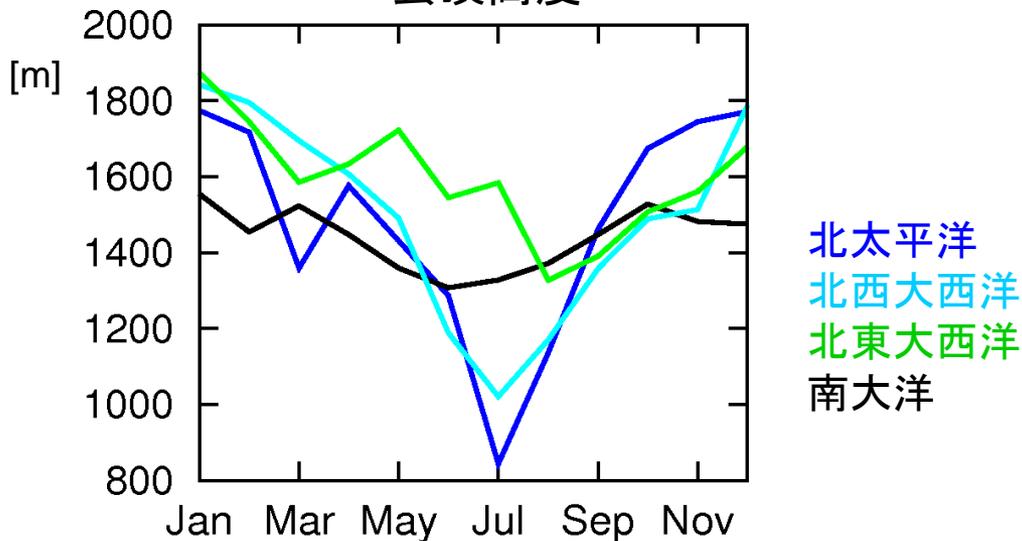
中緯度の下層雲は、夏には雲頂は非常に低く、冬にはかなり高い。

南半球:

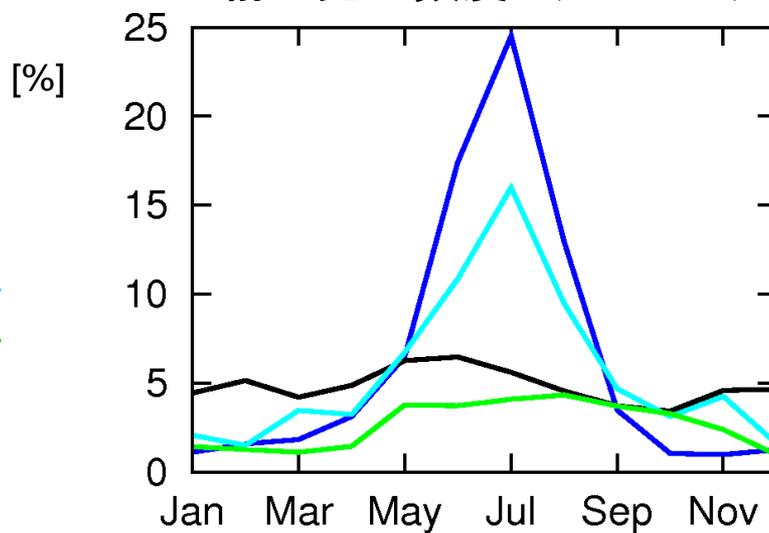
夏・冬の違いは極めて小さい。

中緯度下層雲の鉛直構造の季節変化

雲頂高度



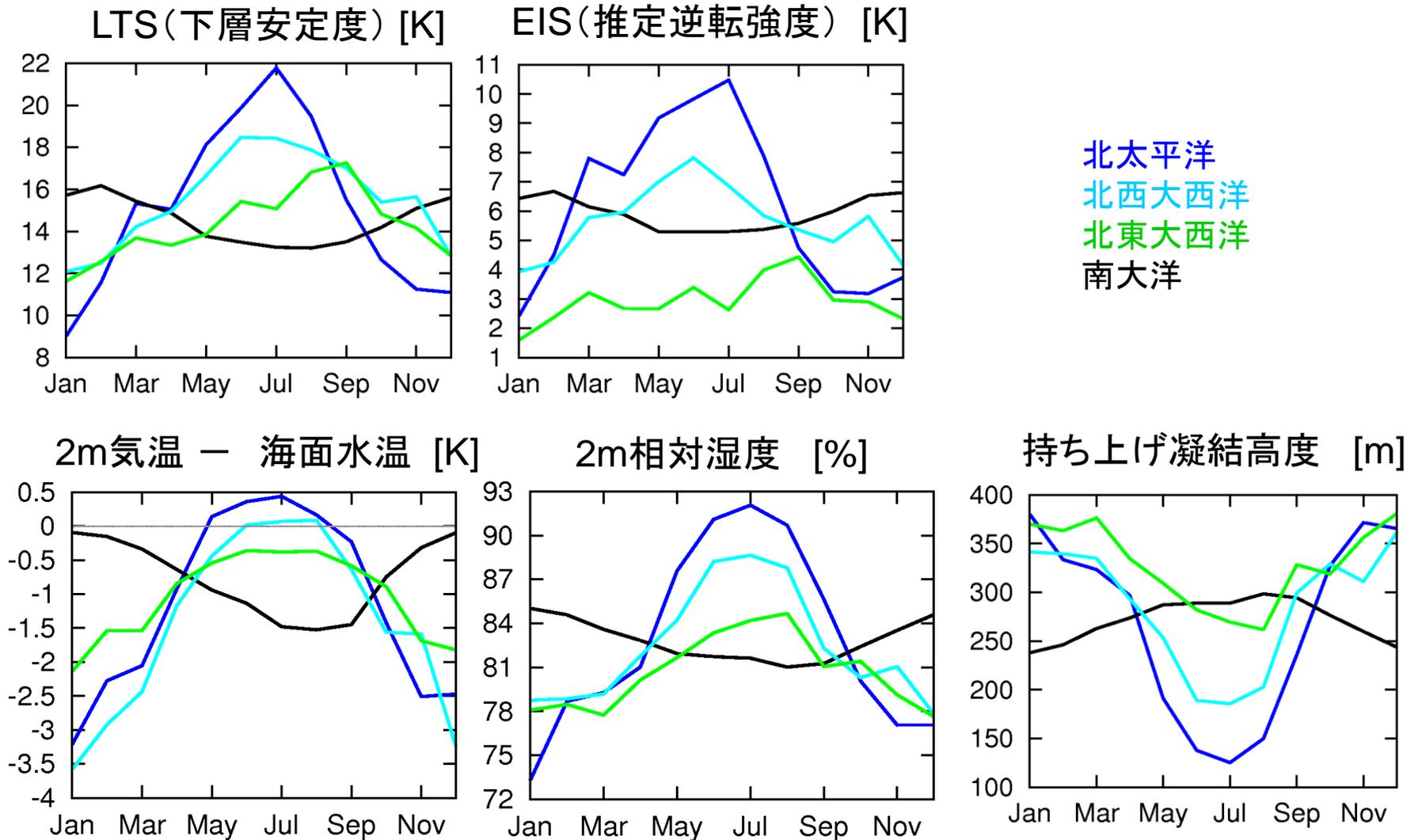
霧の発生頻度 (0-240m)



- 北半球の中緯度の下層雲は、夏期には雲頂高度は非常に低く、冬期にはかなり高くなる。
- 南半球の中緯度の下層雲は、雲頂高度に季節変化がほとんど見られない。

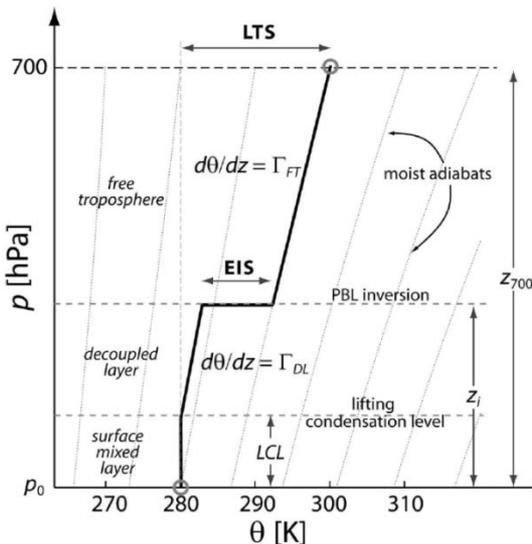
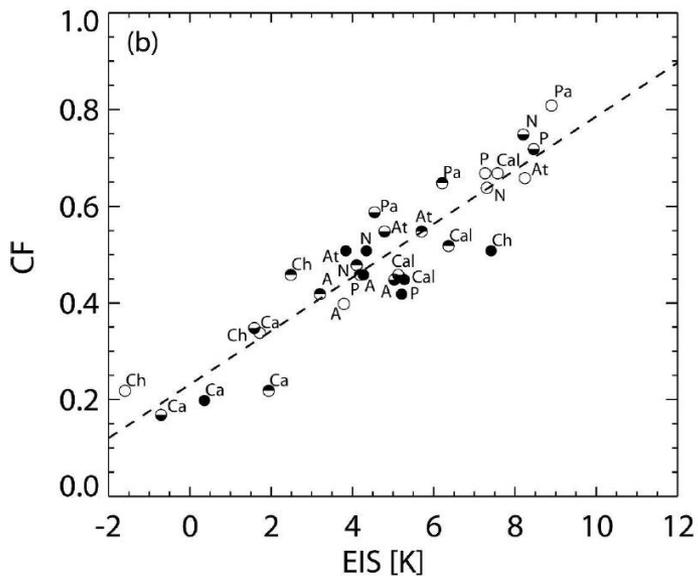
- 雲が、0 - 240mに発生する頻度は北半球では、夏期に高く冬期に低い。つまり、夏期に霧が多く、冬期に霧が少ない。
- 南半球では、霧は年間を通して少なめで、季節変化はほとんど見られない。

気象要素の季節変化



北半球(特に、北太平洋、北西大西洋)では、雲の構造に関係しそうな気象要素の季節変化も明瞭であるが、南半球では、そうした季節変化が非常に小さい。

下層雲量に関わる安定度指標LTSとEIS

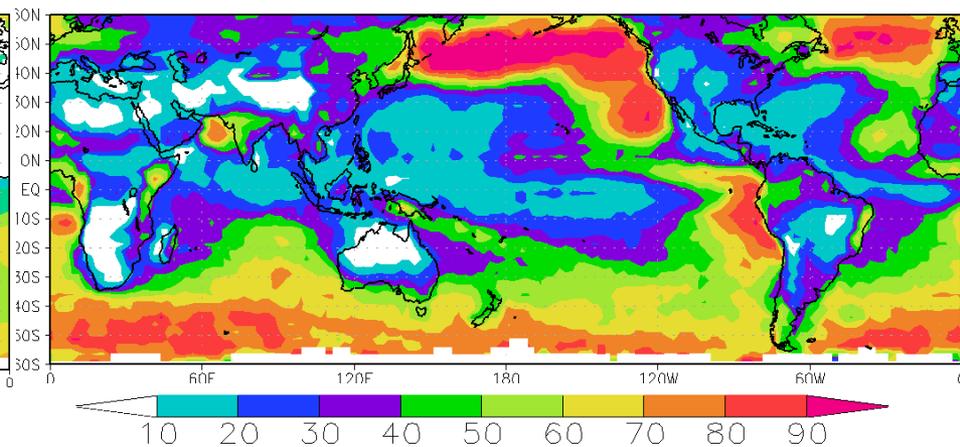
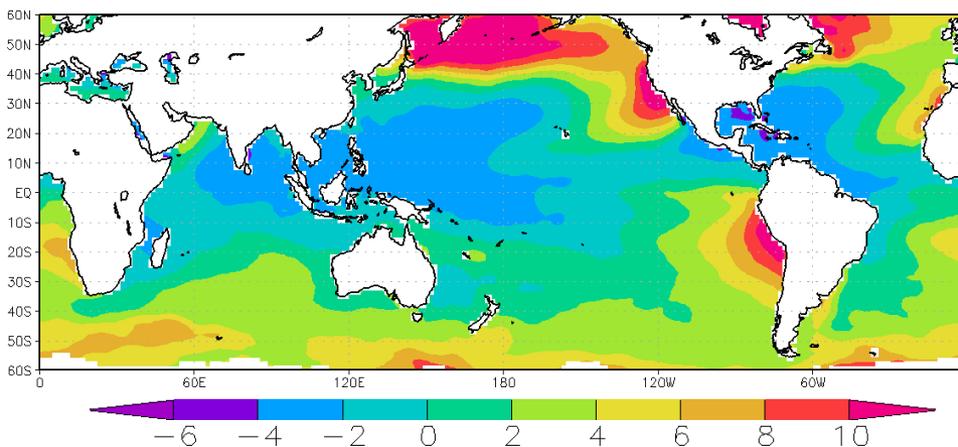


EIS (推定逆転強度, Wood & Bretherton, 2006) は、下層雲量のよい指標

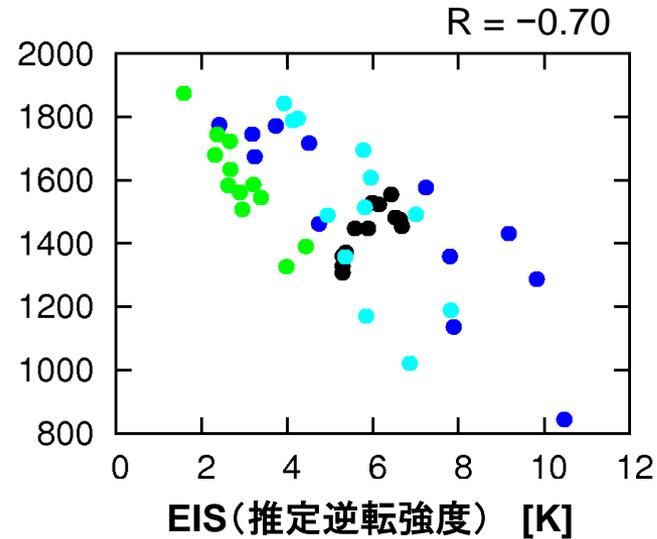
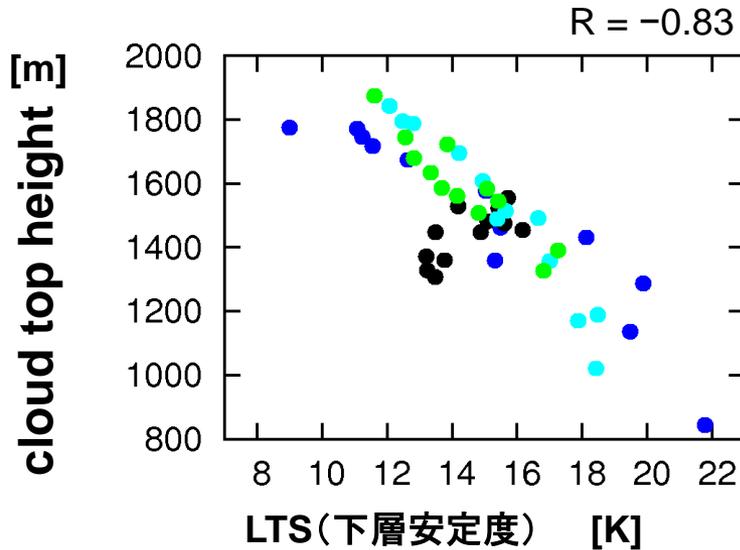
Copied from Wood & Bretherton (2006)

EIS (推定逆転強度) [K]

上の雲に隠されていない部分に占める下層雲量



雲頂高度と気象要素の関係



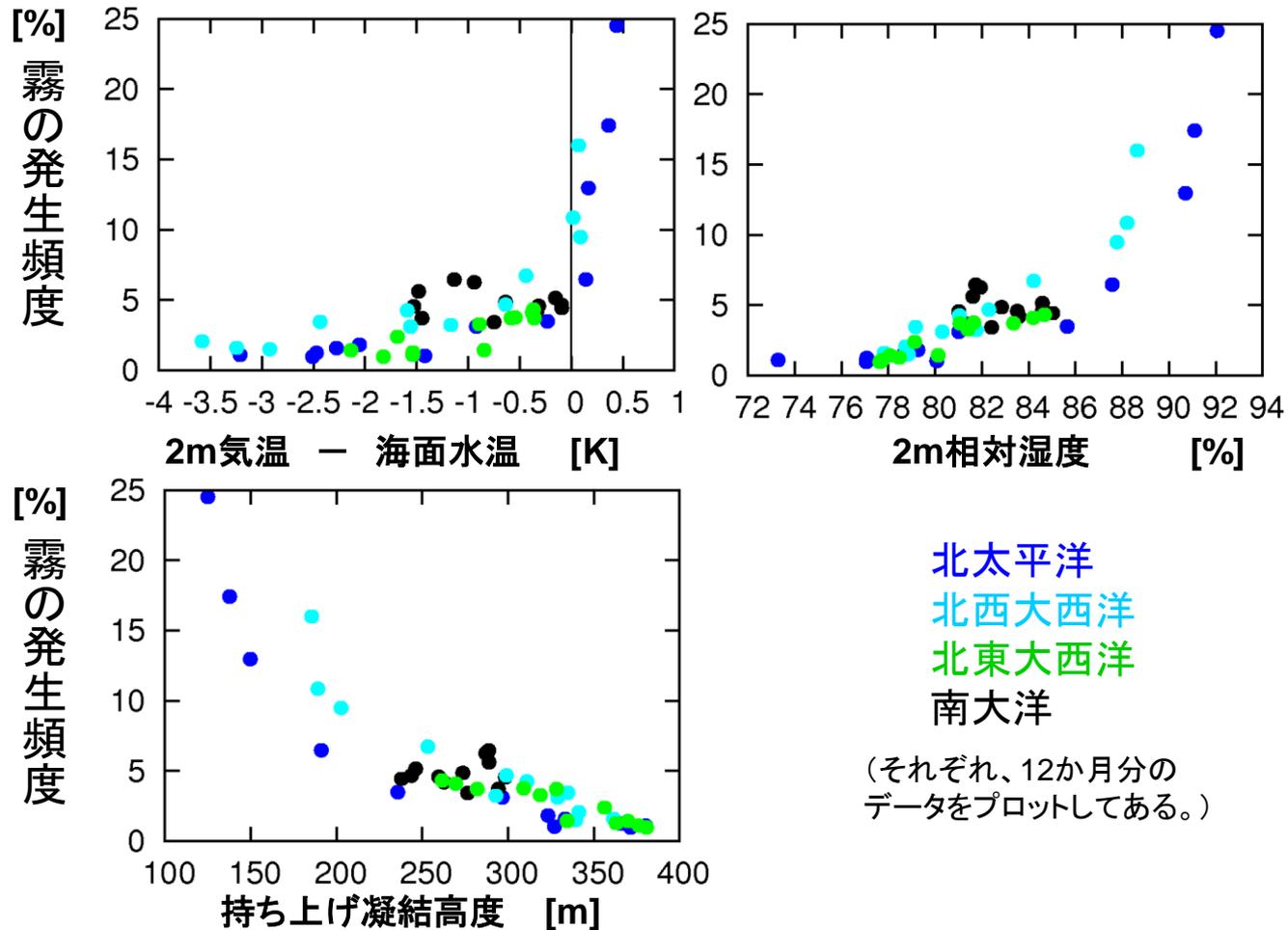
安定度が大きい[小さい]ほど、雲頂高度が低く[高く]なるという、よい相関があることがわかる。南半球は、気象要素の季節変化も、雲の高さの季節変化も小さい。

北太平洋
北西大西洋
北東大西洋
南大洋

(それぞれ、12か月分のデータをプロットしてある。)

なぜ、EISよりLTSの方が相関が高いのだろう...?

霧 (0 - 240mに存在する雲) の発生頻度と気象要素



霧は、大気的气温が海面水温より高い状態で発生している。この時、2m 相対湿度は高い(したがって、持ち上げ凝結高度は低い)。こうした時、潜熱フラックスは小さく、顕熱フラックスも小さい、または大気から海洋に向かっていている(図略)。大気安定度が高い状態で発生する(図略)。

モデルにおける雲の鉛直構造

Kawai et al. (2016, ASL)

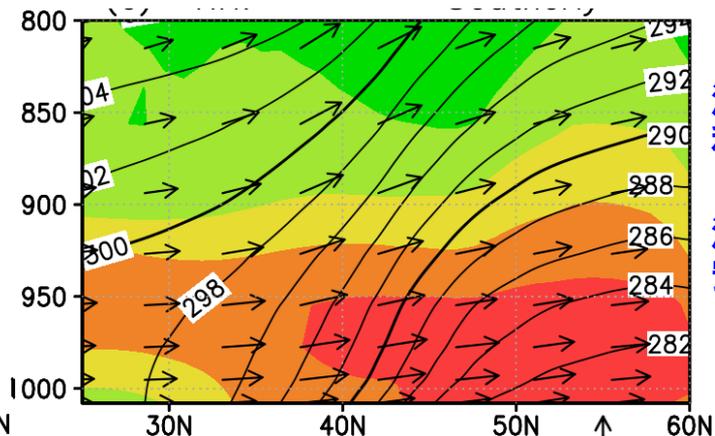
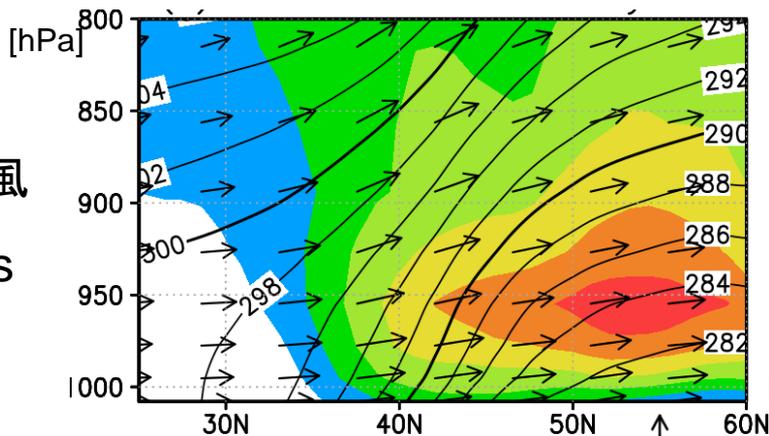
北太平洋 (7月, 平均: 170E-170W)

雲量

相対湿度

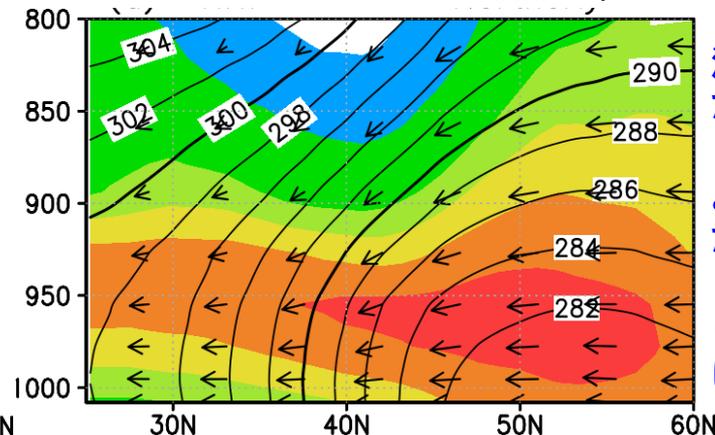
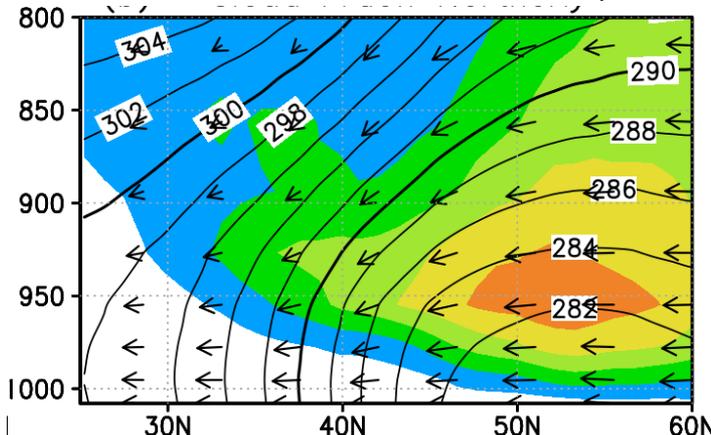
南よりの風
 $V > 2\text{m/s}$

北よりの風
 $V < -2\text{m/s}$



海面に接した
移流霧

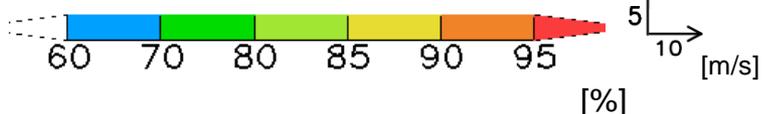
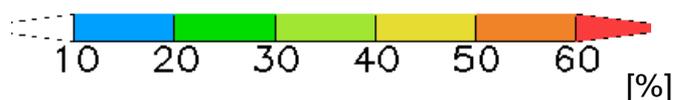
海面近くから
安定層



海面から離れた
下層雲

よくかき混ぜた
混合層

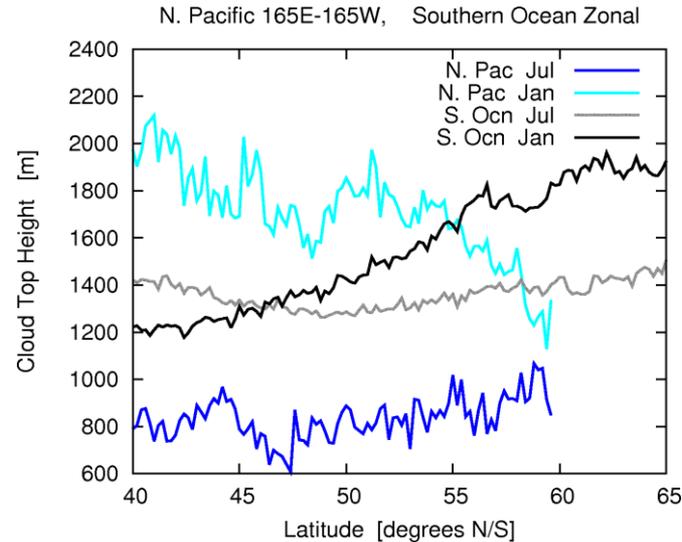
(ヤマセの雲
はこのタイプ)



色： 雲量 or 相対湿度
等値線： 温位

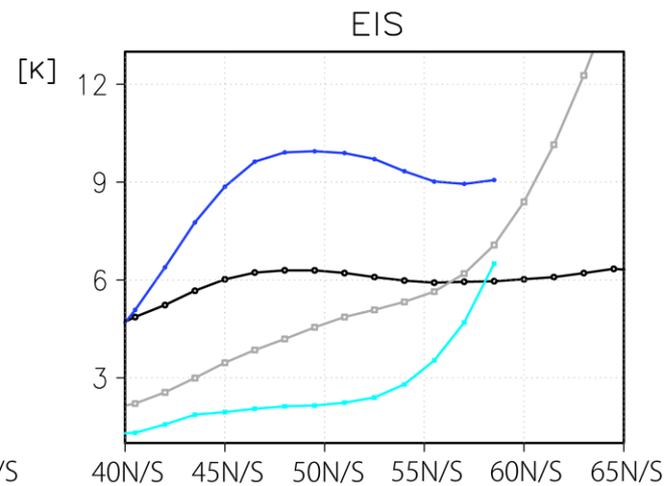
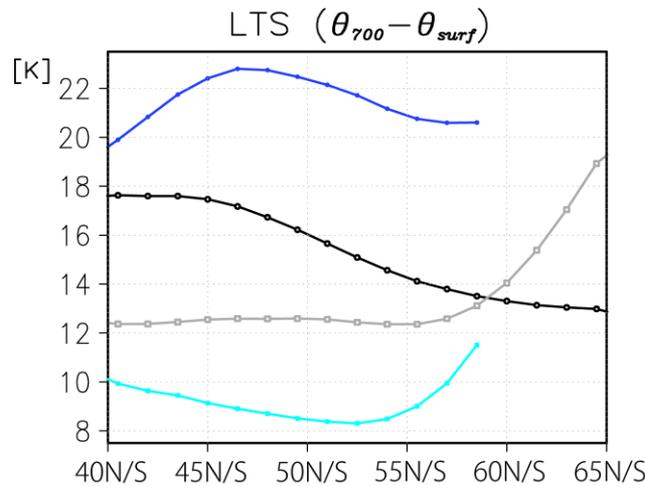
日平均データ使用

南北半球の雲頂高度と気象要素の緯度分布の違い



南大洋の夏は、南に行くほど雲頂高度が高くなる

なぜ??



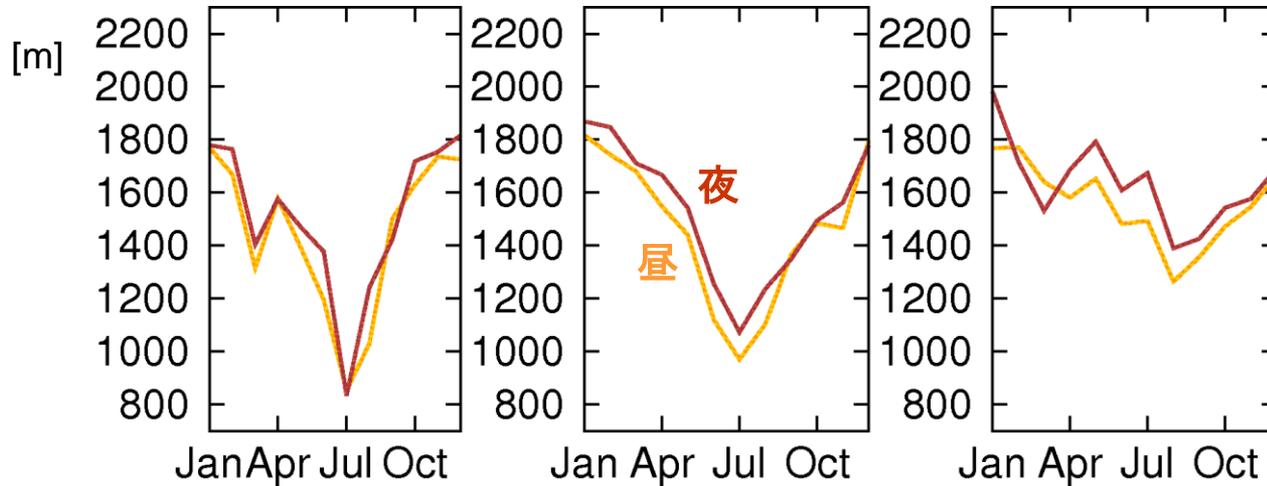
やっぱり、LTSの方が雲頂高度と対応がよいようだが、なぜ??

下層雲の雲頂高度 一日中と夜間の違い

北太平洋北部

北大西洋北西部

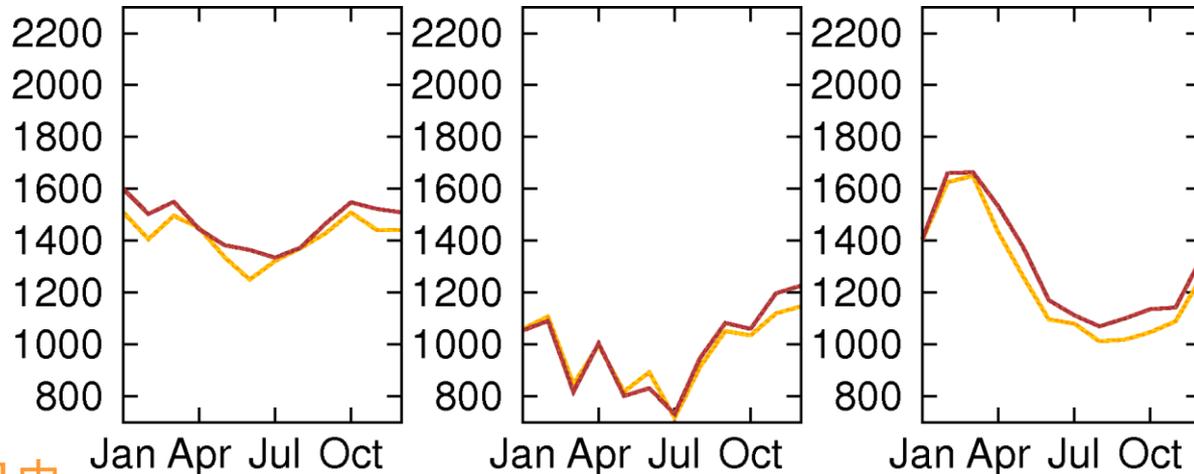
北大西洋北東部



南大洋

カリフォルニア沖

ペルー沖



夜間の方が雲頂高度がやや高くなっている。

C2データは、CALIPSOのみのデータ。

CALIPSOの昼夜の検出限界の違いも寄与している？

C1データ(CloudSatのみのデータ)で調べたが、やはり、夜間の方が雲頂高度がやや高くなっている。

検出限界の違いのせいではない。

淡線: 日中
濃線: 夜間

雲頂高度日変化メカニズム

夜間の方が雲頂高度が高くなるのはなぜだろう...？

1. 夜間に雲頂冷却により、雲頂以下が不安定化し、対流が活発化するから？
2. 夜間の方が、雲頂エントレインメントがさかんになるから？
3. 雲頂より少し上あたりの下降流が夜間に弱まる？
4. 日中に、雲頂付近の雲水が蒸発によりなくなるから？（雲の残骸が観測されているから？）

まとめ（中緯度下層雲 1）

1. 九大雲マスクデータ(CALIPSOデータ)を用い、下層雲の詳細な鉛直構造を調査した。
2. 北半球、南半球の雲の雲頂高度の違い、全球の霧の発生頻度、及び、それらの季節変化が明らかになった。
3. 下層雲の雲頂高度と気象要素との関係を調べ、大気安定度との関係を明らかにした。霧と気象要素との関係も調べ、2m相対湿度や持ち上げ凝結高度、2m気温と海面水温の差などについても相関を明らかにした。
4. 世界のモデルにおいて再現が困難である、南大洋の雲について、その雲頂高度の地理的分布を示し、その分布と、大規模な気象場との関係を考察した。

まとめ（中緯度下層雲 2）

5. CALIPSO（、CloudSat）の、昼の軌道と夜の軌道から得られたデータを用い、日中と夜間の下層雲の雲頂高度の違いを示した。

文献

- Kawai, H., 2013: Improvement of a Stratocumulus Scheme for Mid-latitude Marine Low Clouds. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling/WMO*, **43**, 4.03-4.04.
- Kawai, H., S. Yabu, Y. Hagihara, T. Koshiro, and H. Okamoto, 2015: Characteristics of the Cloud Top Heights of Marine Boundary Layer Clouds and the Frequency of Marine Fog over Mid-Latitudes. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 613-628.
- Kawai, H., S. Yabu, and Y. Hagihara, 2014: The Evaluation of the Vertical Structures of Marine Boundary Layer Clouds over Mid-Latitudes. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling/WMO*, **44**, 6.11-6.12.
- Kawai, H., T. Koshiro, H. Endo, O. Arakawa, and Y. Hagihara, 2016: Changes in marine fog in a warmer climate. *Atmos. Sci. Let.*, **17**, 548-555.

本研究の一部は、文部科学省の気候変動リスク情報創生プログラム、及び、気候変動適応技術社会実装プログラムの支援によりなされたものです。

2. 北極海の下層雲

この部分は、後日公開

Backup Slides

現業全球モデルGSMは、中緯度の海洋下層雲の不足が深刻である(JRA再解析値でも同様)。

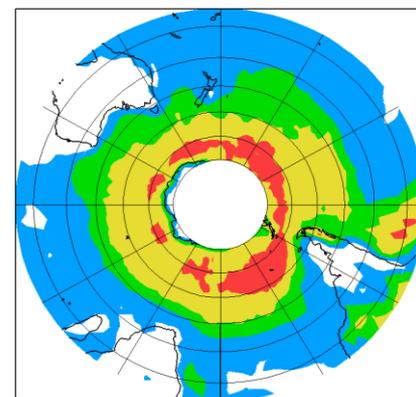
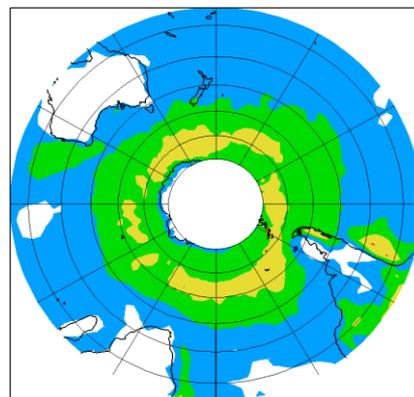
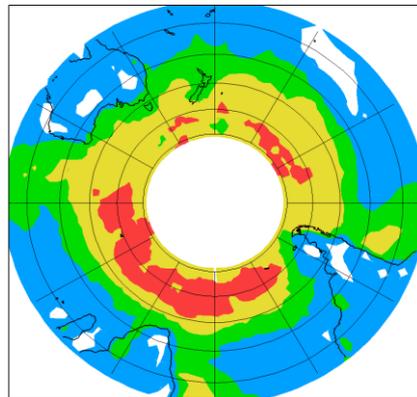
大気海洋結合モデルでは、それによる海面への過剰な短波入射が大きな問題となっている。

観測 (ISCCP)

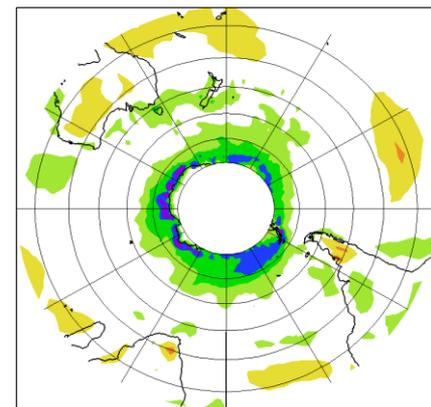
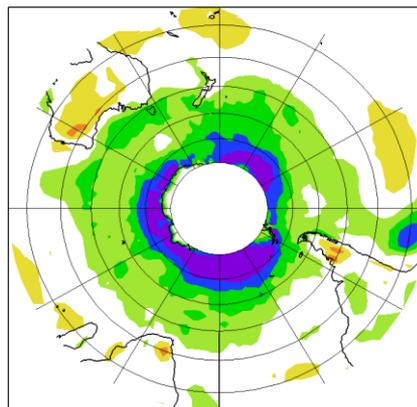
これまでの現業スキーム

新層積雲スキーム

下層雲量



大気上端上向き
短波放射バイアス



1月の1か月平均
(1987-1989)

Kawai (2013, *WGNE Blue Book*, 43)

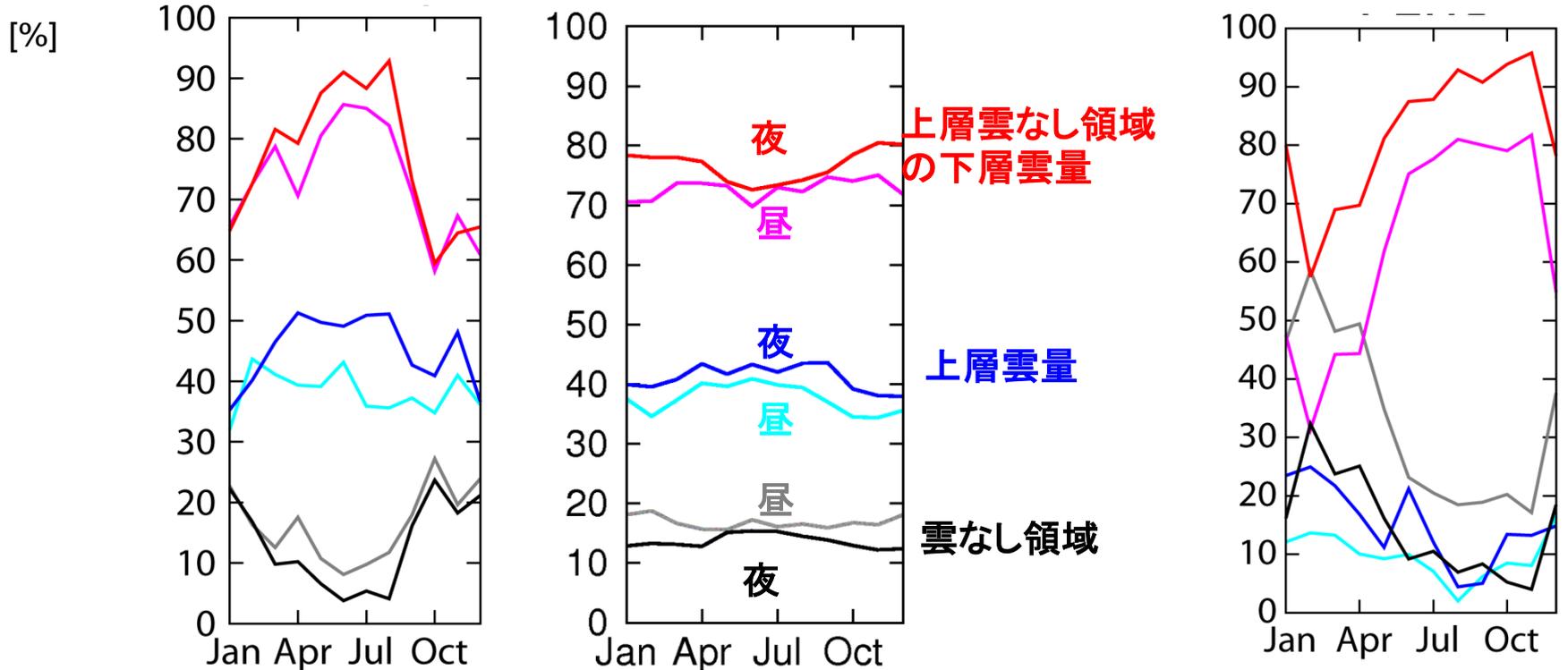
新層積雲スキームにより、中高緯度の下層雲は増加して、観測に近づいた！

中緯度下層雲の雲量 一日中と夜間の違い

北太平洋北部

南大洋

ペルー沖

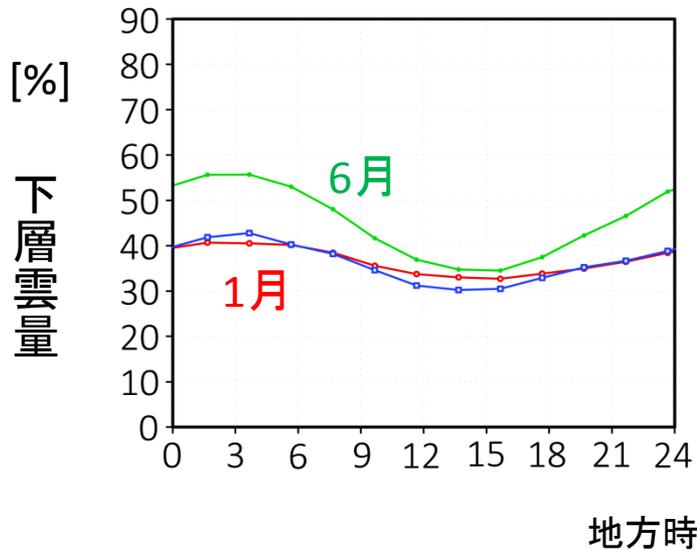


淡色： 日中 1:30 p.m. (local time)
 濃色： 夜間 1:30 a.m. (local time)

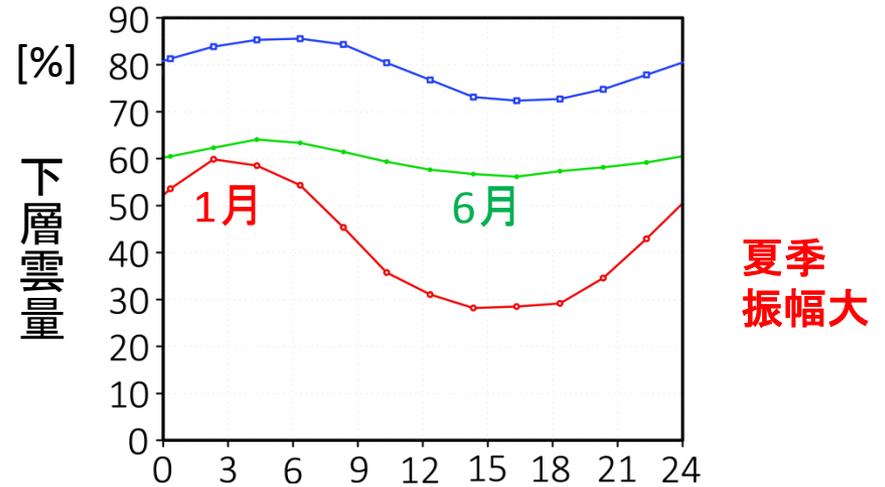
- 上層雲(ここでの”上層雲”は、5kmより高いところにある雲)も、上層雲のない領域に占める下層雲量も、夜間の方がやや大きくなっている。
- 夏半球における日変化の方が、冬半球における日変化より大きい。

モデルにおける下層雲量日変化の振幅 (GSM)

カリフォルニア沖(北半球)



ナミビア沖(南半球)



Kawai & Inoue (2006, SOLA)

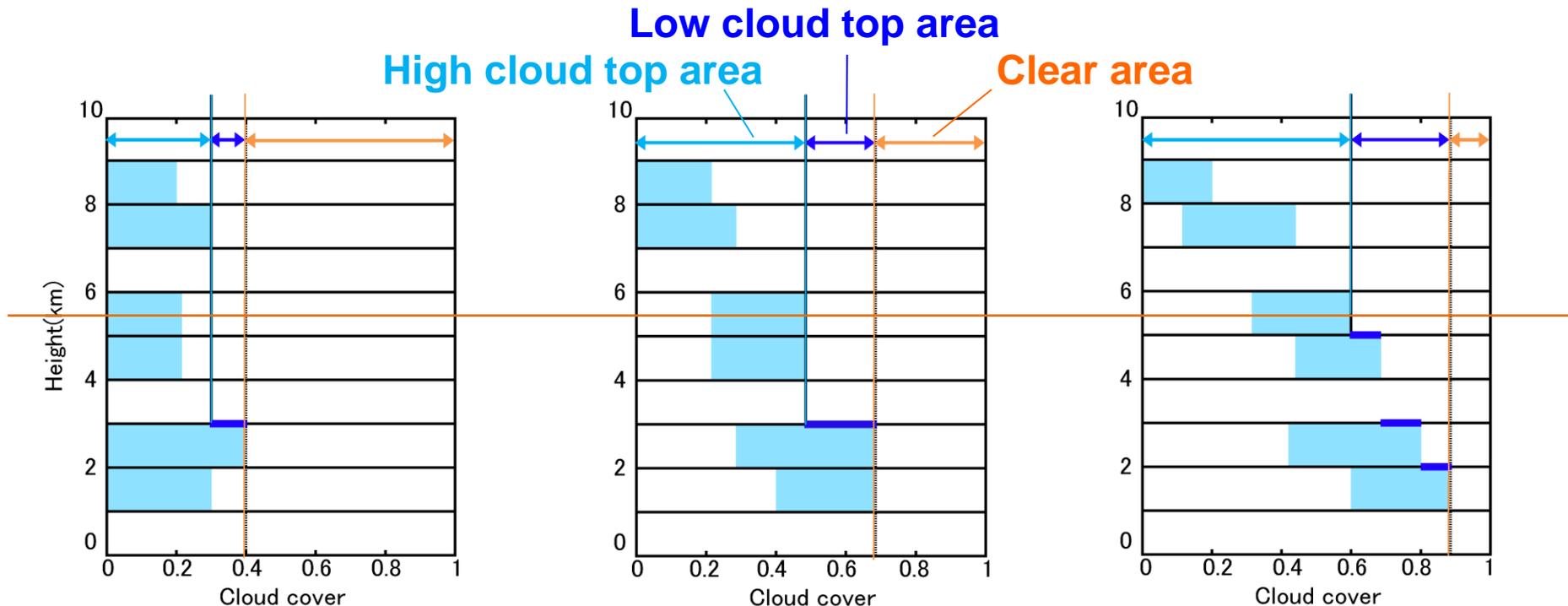
Teixeira & Hogan (2002)とも整合的な結果

- 比較には、モデルのオリジナル鉛直層データ (TL159L60) を使用.
- 3種類の雲オーバーラップ法の違いも調べる(JMA-GSMの放射過程では、マキシマムランダムオーバーラップ法が仮定されている.).

Maximum

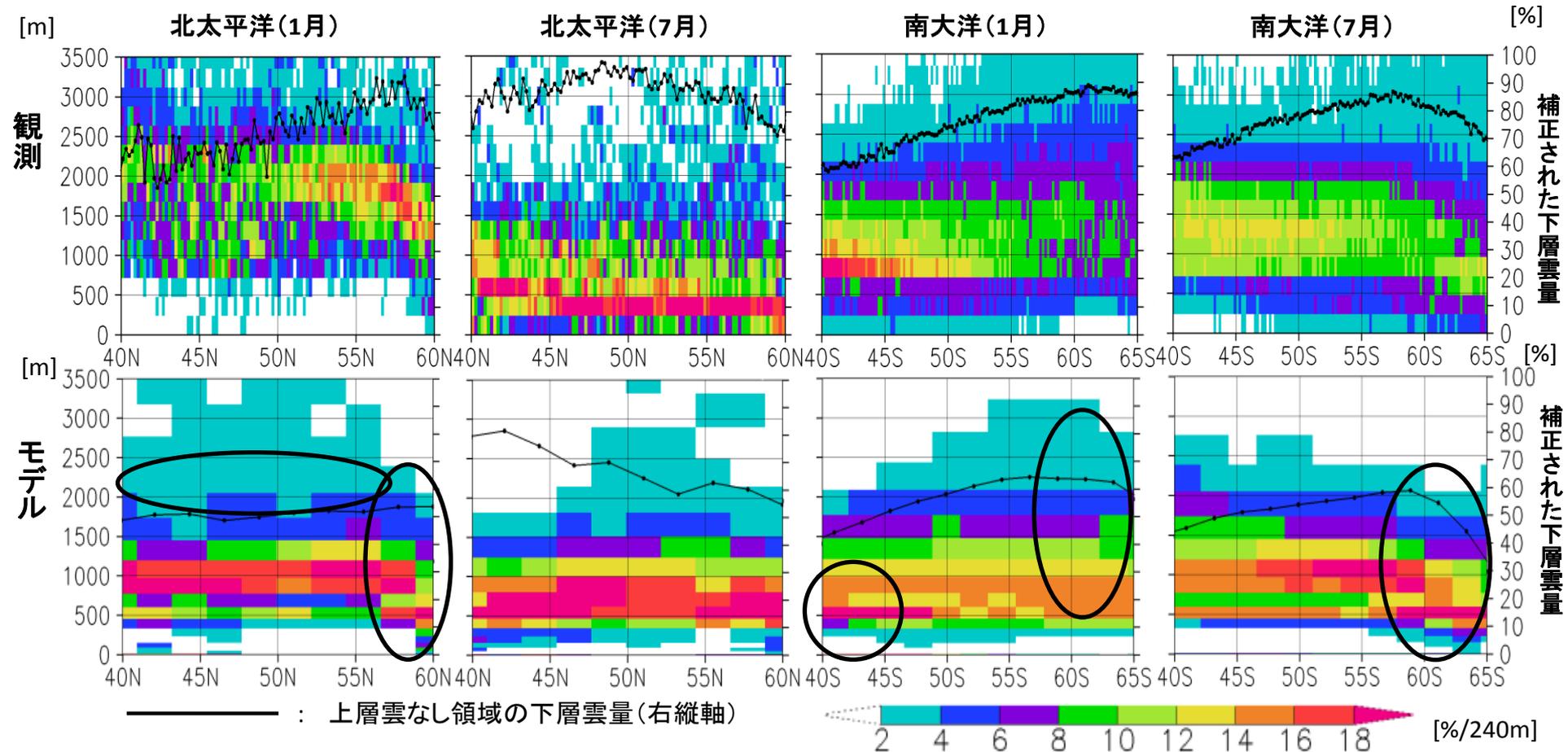
Maximum-Random

Random



- 雲頂高度の頻度は、下層(500hPaより下)に雲頂を持つ領域面積で規格化する(青矢印の区画).
- 上層雲(500hPaより高い)がない、または、少ない格子の雲頂高度データのみ利用

モデルと観測の雲頂高度の比較



- 雲頂高度は、冬に非常に高く、夏には非常に低い。モデルの季節変化は、観測に比べて小さい。特に、冬にかなり低い。
- 夏季に観測で見られる、高緯度へ向かって雲頂高度が高くなっていく様子がモデルでははっきりしない。
- 冬季には、観測では、60S-65S付近で雲頂高度が低い(海氷領域か?)が、モデルでも定性的にはそれは表現されている。
- 観測では、40S-55S付近で、冬季の方が夏季より雲頂高度が高い。モデルはこの季節変化をある程度表している。だが、モデルの雲頂高度は観測より低い。
- (上層雲に隠されていない領域の下層雲量は、モデルでは観測に比べて小さい。)

雲オーバーラップ法の影響

Observation

JMA-GSM

Maximum Overlap

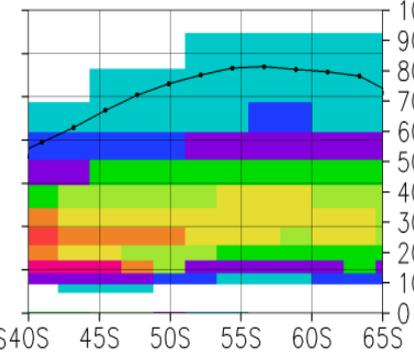
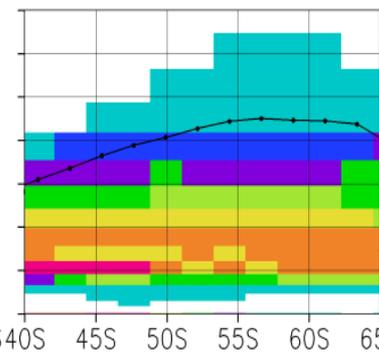
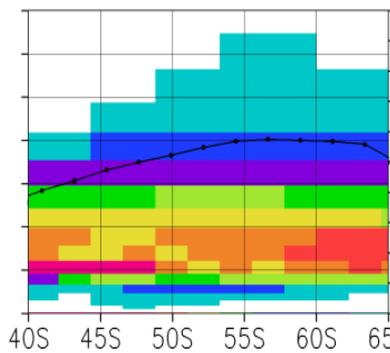
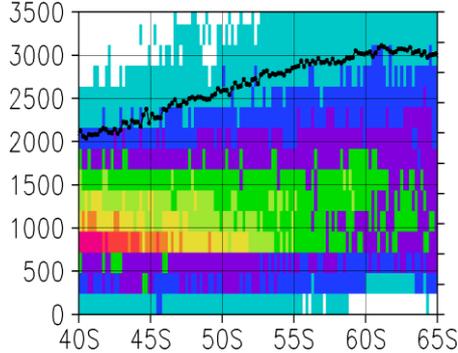
Maximum-Random Overlap

Random Overlap

[%]

[m]

南大洋
(1月)



補正された下層雲量

[%]

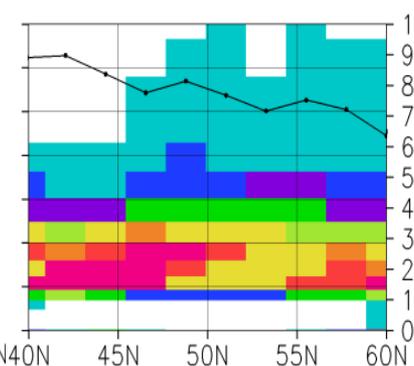
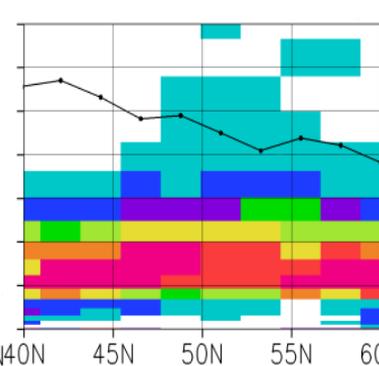
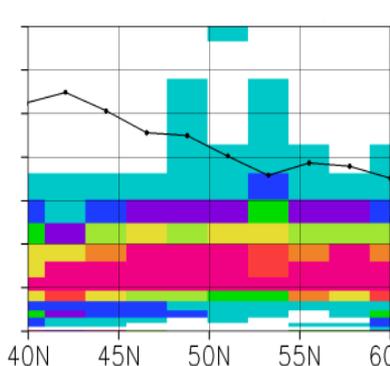
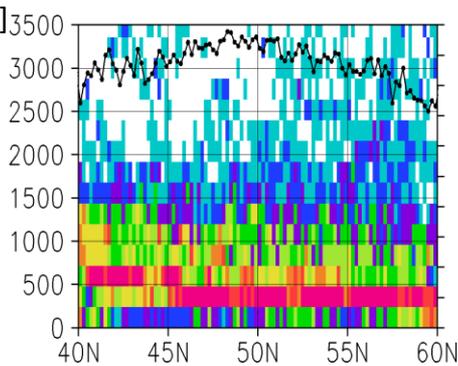
補正された下層雲量

[%/240m]



[m]

北太平洋
(7月)



- 雲オーバーラップ仮定による雲頂高度分布の違いは、モデルと観測の間の系統的な差よりは小さかった。
- マキシマムオーバーラップとマキシマムランダムオーバーラップは、似た結果を示した。ランダムオーバーラップを用いると、雲頂高度分布は、より広い分布を示した。