

下層雲量の決定要因と下層雲の将来変化

川合秀明、神代剛、Mark Webb

a). 下層雲量に関する問題

Klein and Hartmann (1993) は、亜熱帯の下層雲の雲量が、700 hPa と海面における温位の差 $\theta_{700} - \theta_{\text{surf}}$ と非常によい関係にあることを発見し、これを下層大気安定度 LTS (Lower Tropospheric Stability) と名付けた。LTS が大きい、つまり、大気が安定なほど、下層雲量は多くなる。大気場を表す極めてシンプルなこの安定度指標と、非常に複雑な物理プロセスのバランスとして形成・維持される下層雲の雲量の間に、このような高い相関があることは驚きであり、Klein and Hartmann (1993) の先駆的な研究の価値は非常に高い。この指標は、たいへん多くの研究で用いられてきた。その後、Wood and Bretherton (2006) は、LTS は亜熱帯の下層雲量との相関は非常に高いが、中緯度の下層雲量も含めると、相関はそれほど高くないことを示した。Wood and Bretherton (2006) は、自由大気中の温位プロファイルが湿潤断熱となっていることを仮定し、700 hPa と海面における温位の差 $\theta_{700} - \theta_{\text{surf}}$ から自由大気中の温位の鉛直方向の増加分を引くことなどにより、雲頂の温度逆転層強度を推定することに成功した。彼らは、この推定される温度逆転層強度が、中緯度の下層雲を含む全球的な下層雲量とたいへん高い相関を持つことを鮮やかに示し、これを推定逆転層強度 EIS (Estimated Inversion Strength) と名付けた。推定される温度逆転層強度が強い、つまり、EIS が大きいほど、下層雲量は多い。LTS も EIS も、700 hPa と海面の温度 (温位) 情報のみしか使っていないにも関わらず、下層雲量と高い相関を持っており、シンプルさの観点からも非常に有用な指標である。EIS の提唱後、多くの下層雲研究において、この指標は使われ続けている。

ただし、一つの問題点は、LTS も EIS も温度 (温位) 情報のみと下層雲量の関係であり、水蒸気の情報は全く考慮されていない点である。これが物理的に適切かどうかは、きちんと検討されるべきだと我々は考えた。

次に、別の観点からの問題を説明する。二酸化炭素を増加させた際の地球の温度上昇幅には大きな不確実性があり、シミュレーションを行う気候モデルにより大きなばらつきがあるが、その主な原因は、下層雲の増減の不確実性に起因することが近年わかってきた。しかし、現状では、気候モデルにおける下層雲の表現が不十分であるために、モデルでシミュレートされた下層雲の将来変化の信頼性は高くない。一方、温度や水蒸気のプロファイルの変化の信頼性はそれに比べて高いため、温度や水蒸気のプロファイルと下層雲の間に明瞭な関係があれば、その変化から、より信頼性の高い下層雲の将来変化を推定することができると考えられる。そこで、EIS の将来変化から、下層雲量の将来変化を解釈しようという試みが多くなされてきた。CMIP に参加した多くのモデルにおいては、一般に EIS は将来増加するため、EIS と雲量との関係から単純に推定すると、下層雲は増加するようと思われる。しかし、多くの気候モデルは、将来気候において EIS は増加するにも関わらず、下層雲は減少するという結果を示している (例えば、Webb et al. 2013、Webb and Lock 2013)。一方、Qu et al. (2014) は、下層雲量 (LCC) の将来変化は、EIS の将来変化のみではなく、EIS と海面水温 (SST) の将来変化の線形結合で書けることを提唱した。

$$\Delta LCC \approx \left(\frac{\partial LCC}{\partial EIS} \right)_{\text{SST}} \cdot \Delta EIS + \left(\frac{\partial LCC}{\partial SST} \right)_{\text{EIS}} \cdot \Delta SST \quad (1)$$

彼らによれば、将来は EIS は増加するため、それだけを考えて下層雲量は増える方向だが、SST の変化と下層雲量の変化には負の相関があり、将来は SST が上昇するために、結果として SST の上昇の効果が勝り、下層雲量は減少するというものである。しかし、SST の変動と下層雲量が関係していることの物理的な説明は十分になされていない。さらに、下層雲の将来の減少は、下層の湿潤静的エネルギーの鉛直勾配が大きくなることの結果であるとしている研究もある (Brient

and Bony 2013)。こうした研究に統合的な解釈を与えることは、下層雲の将来変化に信頼できる根拠を与えることになり、ひいては、地球の将来の温度上昇の大きさを適切に推定することにつながるため、極めて重要である。

b). 新しい下層雲指標

LTS や EIS のように気候モデルからシンプルに計算でき、かつ、温度構造のみではなく水蒸気構造も考慮した指標を作成することを考える。さて、下層雲の形成・維持は、下層雲を崩壊させるプロセスである雲頂エントレインメント (CTE) の起きやすさと密接な関係にあることが長年議論されてきた。そして、雲頂エントレインメントが起きずに、下層雲が維持される条件は、次の不等式で表されるということが多くの研究者によって調査・確認されている (例えば、MacVean 1993)。

$$\Delta_{\text{inv}}\theta_e > k \frac{L}{c_p} \Delta_{\text{inv}}q_t \quad (2)$$

ここで、 k は定数、 L は潜熱比熱、 c_p は定圧比熱、 Δ_{inv} は雲層中と雲頂直上の自由大気間の物理量のジャンプの大きさ、 θ_e は相当温位、 q_t は総水量である。つまり、雲頂エントレインメントの起こりやすさは、温位の逆転の強さのみではなく、湿りの構造にも大きく依存するのである。上の不等式を、逆転層直下の総水量は海面近くの比湿と近く、逆転層直上の総水量は 700 hPa の比湿と近いと仮定して変形すると、不等式(2)は以下ようになる。

$$\Delta_{\text{inv}}\theta - (1 - k) \frac{L}{c_p} (q_{\text{surf}} - q_{700}) C_{\text{qgap}} > 0 \quad (3)$$

C_{qgap} は補正係数である。左辺の温位のギャップを EIS で置換し、この不等式の左辺を ECTEI (推定 CTE 指標) と呼ぶことにする。

$$\text{ECTEI} = \text{EIS} - \beta \frac{L}{c_p} (q_{\text{surf}} - q_{700}) > 0 \quad (4)$$

$$\beta \equiv (1 - k) C_{\text{qgap}} \quad (5)$$

ここで、MacVean (1993) に基づき、 $k = 0.7$ とし、また、ゾンデ観測に基づき、 $C_{\text{qgap}} = 0.76$ としている。この指標の値が大きいほど、雲頂エントレインメントは起こりにくく、下層雲量は大きくなることが予想される。なお、この指標は、Kawai and Teixeira (2010) の CGLMSE の考え方をベースにしたものである。

図 1 に、船舶観測の下層雲量データの気候値 (Hahn and Warren 2009, Koshiro and Shiotani 2014) と LTS、EIS、ECTEI の全球的な気候値分布を示す。図から、全球的な下層雲量の分布は、ECTEI の全球的な分布と最もよく合っていることがわかる。特徴を一言で言えば、LTS は亜熱帯で大きく、相対的に中緯度では小さいが、EIS は中緯度で相対的に大きくなり、ECTEI は中緯度でより大きくなっている。さらに、図 2 に、船舶観測の下層雲量と各安定度指標の関係を示す。中緯度海洋上を含めた全球データでは、LTS と下層雲量の相関係数は 0.23 と低い、EIS との相関は 0.83 と非常に高くなっており、ECTEI と下層雲量の相関はさらに高く、0.90 となっている。したがって、我々が開発した、水蒸気の情報を含む下層雲量指標 ECTEI は、下層雲量と非常によく対応することが示されたと言える。

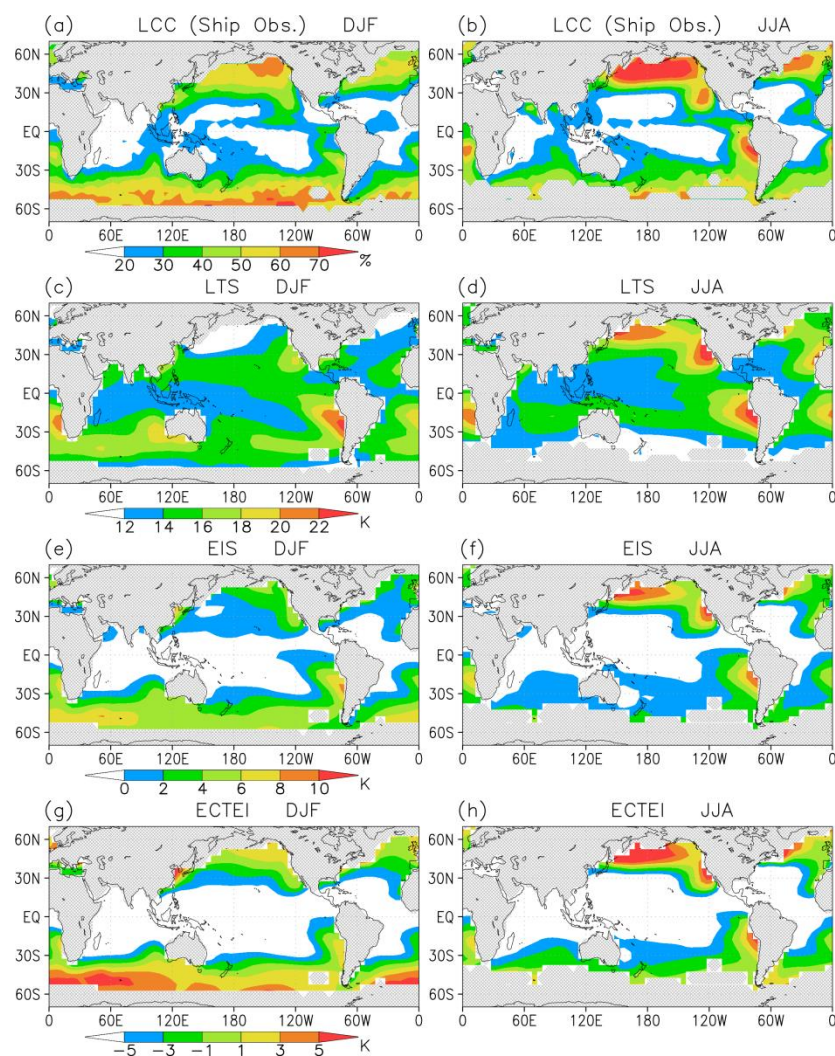


図1 (a, b) 船舶観測下層雲量 (単位 : %) と安定度指標 (c, d) LTS、(e, f) EIS、(g, h) ECTEI (単位 : K) の全球分布。左列は 12-2 月、右列は 6-8 月のデータ。1957 年-2002 年の気候値。下層雲量データは EECRA 船舶観測データの層雲、層積雲、霧の雲量を合計したものであり、安定度指標は ERA40 データを用いて計算している。

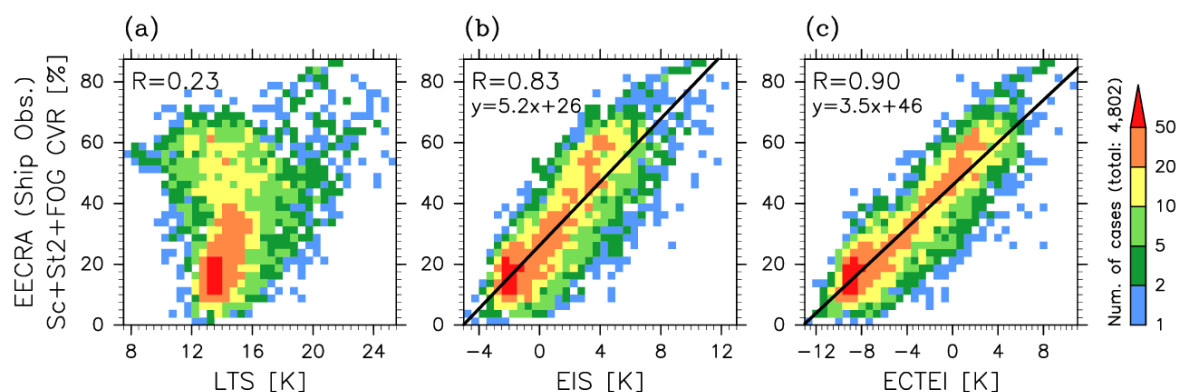


図2 各安定度指標 (単位 : K) と下層雲量 (単位 : %) の関係。安定度指標として、左から、(a) LTS、(b) EIS、(c) ECTEI を使用した結果。R は相関係数。安定度指標は ERA40 から計算し、下層雲量は、EECRA 船舶観測データによるものである。全球の海上のデータを用いて計算しており、季節別気候値同士の関係を示している。

c).温暖化時の下層雲量の変化

ECTEI は (4)式で表されるが、この右辺第 2 項は SST に非常に敏感である。700 hPa の比湿は海面付近での比湿に比べ値がかなり小さいため、この項は海面付近の比湿により支配的に決定されるが、この比湿は SST でかなりの程度決定されるためである。すなわち、SST が高ければ q_{surf} が大きくなり、この第二項は符号が負であるため、結果的に ECTEI を小さくする。つまり、EIS が同じであれば SST が高い方が ECTEI は小さくなり、下層雲量も小さくなるということである。温暖化時の下層雲量の変化を考えると、もし下層雲量 LCC が EIS の関数だとすれば、Qu et al. (2014) の(1)式の右辺第 2 項は出てこない。しかし、下層雲量が ECTEI の関数だとすれば、この第 2 項から、SST の下層雲量依存性が導き出されるのである。数式で書けば、

$$\Delta LCC = \frac{dLCC}{dECTEI} \cdot \Delta ECTEI \approx \frac{dLCC}{dECTEI} \cdot \Delta EIS + \frac{dLCC}{dECTEI} \left(\frac{\partial ECTEI}{\partial SST} \right)_{EIS} \cdot \Delta SST \quad (6)$$

ということになる。 $dLCC/dECTEI$ は図 2 c の傾きから求められ、 $(\partial ECTEI / \partial SST)_{EIS}$ は、適当な大気プロファイルを仮定すれば、(4)式の第 2 項から簡単に推定でき、この偏微分係数は負である。この(6)式は、まさに(1)式に対応するものである。しかも、ここで推定されたこの偏微分係数の値、すなわち下層雲量の SST 依存性は、Qu et al. (2015)などにおいて現在気候の観測データから重回帰的に求められた値と整合している。つまり、ECTEI が下層雲量のより適切な指標であることを受け入れれば、(1)式は自然に導出され、SST が上昇すると下層雲量が減少することを必然的に結論付けられるのである。したがって、全ての気候モデルにおいて EIS は将来増加するのに、多くの気候モデルでは将来下層雲は減少するというパラドクスも、ECTEI という新しい下層雲指標により解決されるのである。そして、ECTEI は、この SST 依存の項は雲頂エントレインメントの起こりやすさが SST を通して現れた結果だという物理的な解釈を与えているのである。

さらに、この指標に基づく議論は、SST の依存性を説明できるのにとどまらない。詳細は省略するが、簡単な近似をすることで、現在気候において発見された下層雲量と下層の湿潤静的エネルギーの鉛直差の関係 (Kubar et al. 2011)、そして、下層雲の将来の減少は下層の湿潤静的エネルギーの鉛直勾配が大きくなることの帰結であるとしている研究 (Brient and Bony 2013) も統合的に説明できる (Kawai et al. 2017)。さらに、ECTEI の式をより深く検討することで、大気中層の湿りと下層雲変化の関係や、中層雲量と下層雲変化の関係も説明できる可能性があると共に、この指標の式からは、熱帯・亜熱帯と中緯度では、将来同じ SST 上昇があったとしても中緯度より亜熱帯・熱帯の下層雲量の減少の方が大きいという示唆も得られる。以上のように、ECTEI という新しい下層雲量の指標の発見は、下層雲の将来変化の議論とその予測を大きく前進させる可能性を秘めている。

参考文献

- Brient, F., and S. Bony, 2013: Interpretation of the positive low-cloud feedback predicted by a climate model under global warming. *Clim. Dyn.*, **40**, 2415–2431.
- Hahn, C. J., and S. G. Warren, 2009: Extended edited synoptic cloud reports from ships and land stations over the globe, 1952-1996 (2009 update). NDP-026C, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 79 pp.
- 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., and J. Teixeira, 2010: Probability Density Functions of Liquid Water Path and Cloud Amount of Marine Boundary Layer Clouds: Geographical and Seasonal Variations and Controlling Meteorological Factors. *J. Climate*, **23**, 2079–2092.
- Kawai, H., T. Koshiro, and M. J. Webb, 2017: Interpretation of Factors Controlling Low Cloud

- Cover and Low Cloud Feedback Using a Unified Predictive Index. *J. Climate*, **30**, 9119–9131.
- Klein, S. A., and D. L. Hartmann, 1993: The seasonal cycle of low stratiform clouds, *J. Climate*, **6**, 1587–1606.
- Koshiro, T., and M. Shiotani, 2014: Relationship between low stratiform cloud amount and estimated inversion strength in the lower troposphere over the global ocean in terms of cloud types. *J. Meteor. Soc. Japan*, **92**, 107–120.
- Kubar, T. L., D. E. Waliser, and J. L. Li, 2011: Boundary layer and cloud structure controls on tropical low cloud cover using A-Train satellite data and ECMWF analyses. *J. Clim.*, **24**, 194–215.
- MacVean, M., 1993: A Numerical Investigation of the Criterion for Cloud-Top Entrainment Instability. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 2481–2495.
- Qu, X., A. Hall, S. A. Klein, and P. M. Caldwell, 2014: On the spread of changes in marine low cloud cover in climate model simulations of the 21st century. *Clim. Dyn.*, **42**, 2603–2626.
- Qu, X., A. Hall, S. A. Klein, and A. M. Deangelis, 2015: Positive tropical marine low-cloud cover feedback inferred from cloud-controlling factors, *Geophys. Res. Lett.*, 42(18), 7767–7775.
- Webb, M. J., and A. P. Lock, 2013: Coupling between subtropical cloud feedback and the local hydrological cycle in a climate model. *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-012-1608-5.
- Webb, M. J., Lambert, F. H. and Gregory, J. M. 2013: Origins of differences in climate sensitivity, forcing and feedback in climate models. *Clim. Dyn.*, **40**, 677–707.
- Wood, R., and C. S. Bretherton, 2006: On the relationship between stratiform low cloud cover and lower-tropospheric stability. *J. Climate*, **19**, 6425–6432.