

雲フィードバックに関するモデル相互比較プロジェクト (CFMIP) 会議2013参加報告*

小玉知央^{*1}・釜江陽一^{*2}・小倉知夫^{*3}・神代剛^{*4}
川合秀明^{*5}・野田暁^{*6}・渡部雅浩^{*7}

1. はじめに

気候システムの振る舞いを特徴づける量である、平衡気候感度（大気中 CO₂濃度倍増時の平衡応答における全球地上気温の上昇量、以下 ECS）は、過渡的な温暖化応答を理解する上でも重要な指標として用いられる。一方で、ECSを決める複数の気候フィードバックは、気候モデル間で異なるため、ECSには大きな不確実性が存在する（吉森ほか 2012a, b, c）。雲フィードバックに関するモデル相互比較プロジェクト（CFMIP）では、気候モデルの開発・改良や気候変化予測に関わる研究者が集結し、気候モデルにおける雲プロセスやその再現性、外部強制に対する応答やその不確実性の要因を探る様々な取り組みが続けられている。

6月10日から14日にかけて、ドイツ・ハンブルグのマックスプランク研究所（第1図）で、第2期CFMIP（CFMIP2）の国際会議が EUCLIPSE という欧州の大型プロジェクトと共催で行われた。会議の参加者（第2図）は約80名と盛況で、ヨーロッパからの参加者が大勢を占めたが、北米から約15名、日本から著者

ら7名が参加した。

会議は P. Siebesma (KNMI) と S. Bony (LMD/IPSL), M. Webb (UKMO) による EUCLIPSE と CFMIP の現状報告から始まった。その後、雲フィードバックや降水、モデル評価といったテーマに沿った口頭発表セッションが3日間行われた。4日目には将来構想の議論が行われ、最終日にはプロジェクトのまとめの時期に入った EUCLIPSE の成果と、翌々週に行われる雲・気候に関するサマースクール（釜江ほか 2013）の計画が話し合われた。会議の発表資料は http://www.euclipse.eu/meeting_2013_Hamburg.html (2013.10.7 閲覧) で公開されており、自由に閲覧できる。

2～7章ではセッションの内容をテーマ毎に報告する。8章では CFMIP の将来展望を述べる。本報告を通じて CFMIP コミュニティの活発な活動を知って頂くとともに、特に学生や若い研究者の方々が雲フィードバック研究に飛び込むきっかけとなれば幸いである。

(小玉知央・釜江陽一)

* Report on the Cloud Feedback Model Inter-comparison Project (CFMIP) Meeting 2013.

^{*1} (連絡責任著者) Chihiro KODAMA, 海洋研究開発機構. kodamac@jamstec.go.jp

^{*2} Youichi KAMAE, 国立環境研究所.

^{*3} Tomoo OGURA, 国立環境研究所.

^{*4} Tsuyoshi KOSHIRO, 気象研究所.

^{*5} Hideaki KAWAI, 気象研究所.

^{*6} Akira T. NODA, 海洋研究開発機構.

^{*7} Masahiro WATANABE, 東京大学大気海洋研究所.



第1図 主会場であるマックスプランク研究所。



第2図 参加者の集合写真。

2. 雲のフィードバック, 対流圏調節, 気候感度

雲フィードバックの不確実性は、部分的には気候モデルのバイアスや誤差に起因すると思われる。これまでに、気候モデルにおける雲・降水などの気候場の再現性向上のための取り組みが精力的に進められてきた。一方で、数回のCMIPを経てモデル群が改良されてきても、ECSの幅はほとんど変わっていないことも指摘されている (Maslin and Austin 2012)。この状況は残念ながらCFMIP2でも同様であり、ECSの不確実性に最も影響が大きい雲のフィードバック、とりわけ雲-短波放射のフィードバックが正なのか負なのか、未だ結論が出ていないのが現状である。

とはいえ、CFMIP2の成果がないわけではなく、放射強制の一部として対流圏調節過程が重要であるという認識が得られたこと、熱帯の雲-長波放射フィードバックが正となる理論的考察が得られたこと、亜熱帯下降流域における雲-短波放射フィードバックがどのような過程により符号が変わり得るかが分かってきたことなど、我々の雲フィードバックおよびECSの理解は確実に進んだと言える。

当日の雲フィードバックおよびECSに関するセッションでは、モデル間のばらつきに着目した研究成果が多く発表された。J. Vial (LMD/IPSL) はCMIP5マルチモデル間の対流圏調節・フィードバックのばらつきに起因するECSのばらつきの大きさを定量的に診断する手法とその結果を報告した (Vial *et al.* 2013)。M. Zelinka (LLNL) はISCCPシミュレータによる診断雲量と放射カーネルにより、対流圏調節に伴う雲量と雲放射強制力の変化、雲フィードバックを異なる高度、光学的厚さの雲タイプごとに調べた結果を報告した。釜江と小倉は対流圏調節のメカニズムに

ついて、それぞれ相対湿度変化と下層雲の応答、瞬時放射強制力に着目した研究成果について報告した。M. Cai (フロリダ州立大学) は気温変化に対するフィードバックの寄与率を分離する、CFRAMと呼ばれる診断法について紹介した。渡部は海面水温 (SST) の上昇に対する境界層・自由大気の上昇差が、逆転の強度、積雲マス

フラックスの変化を通して下層雲フィードバックを左右する要素の一つであるとする研究結果を報告した。なお、本セッションで報告された研究成果の多くは、CMIP3/5の数値実験結果を利用したものであった。特に、CMIP5では海面水温固定や全球水惑星などの理想的な設定の実験を多く実施しており、それらの結果はECSの不確実性を理解する上で有効に機能している印象を受けた。

ECSのばらつきの最大の要因として、雲のフィードバックに大きな不確実性が伴う状況は依然として変わっていない。しかし、その中で、モデル間で傾向が一貫した部分と不確実な部分を切り分ける診断方法の提案と活用が進むことにより、問題点がより明確になってきている。こうした問題点の絞り込みは、気候モデルの改良をECSのばらつきの低減につなげる上で重要である。今後、シンプルモデルや理想化実験を通じた検証が進むにつれ、より一層の理解の進展が期待される。 (釜江陽一・小倉知夫・渡部雅浩)

3. 降水の将来変化

今回の会議では、降水の将来変化についてのセッションも設けられた。これは、水循環強度の変化が大気の放射収支・エネルギーバランスによって制御されており、ECSや雲フィードバックと共通する議論が行われる場合が多いためである。

R. Chadwick (UKMO) は、rich-get-richerメカニズム (温暖化時の降水量は、気候場の降水量の多い領域でより大きな増加を示す) は、水蒸気量の増加と対流マスフラックスの減少とが相殺するために有効とは言えず、むしろ熱帯収束域のシフトによって説明されることを示した。D. Popke (マックスプランク研

究所)は、放射対流平衡 (RCE) 状態を仮定した大気における水循環 (降水) 感度は、地球気候を想定したモデル実験よりも強く、それは大気からの長波放射冷却が効率よく強まることに起因していることを示した。理想的な条件下における降水感度を調べることは、実際の気候システムの変動メカニズムを探る上で重要なアプローチであると言えよう。(釜江陽一)

4. 雲・放射過程に関する理想実験 (COOKIE & CREAM)

CFMIP では、雲-気候フィードバック過程のさらなる理解を目指して、階層化された様々な理想実験の比較プロトコルが継続して提案されている。COOKIE はその1つであり、雲と放射の相互作用なし (すなわち、雲は水循環の意味では存在するが、放射に対しては透明) の設定で気候モデルを走らせるという実験プロトコルである (Stevens *et al.* 2012)。このような大胆な設定の実験は Slingo and Slingo (1988) も行っているが、雲過程が精緻化された最新の気候モデルで同様の実験を行い、CMIP5 の水惑星および AMIP タイプの実験結果と比較することで、雲フィードバックや降水の現在気候・温暖化応答、それらのモデル間のばらつき等の理解に役立つことが期待される。

S. Fermepin (LMD/IPSL) は下層雲のみ雲放射相互作用を切った設定の COOKIE 実験結果を解析し、下層雲と放射の相互作用は海洋上の降水を増加させることを示した。また、H. Douville (フランス気象局) は COOKIE を用いて夏のヨーロッパの地上気温バイアスに対する雲の影響を調べ、雲放射相互作用の有無による違いはあまり見られないという結果を示した。しかし、いずれの発表でも検証に用いるモデルの数が足りないように感じた。COOKIE は昨年立ち上がったばかりのプロジェクトであり、ぜひ多くの機関に参加してほしいとの呼びかけがあった。日本からは MIROC グループ、気象研究所、NICAM グループが参加を表明している。今後多くのモデルの結果が提出され、来年の会議ではさらに活発な議論が行われるであろう。

加えて、CREAM という追加実験プロトコルも検討されている。こちらには RCE 実験やエアロゾルの効果を調べる実験などが含まれている。RCE 実験は Manabe and Wetherald (1967) に代表されるような鉛直 1 次元実験がよく知られているが、ここでは 3 次

元の全球モデルを用いて、全球一律の条件の下で平衡に達するまで積分する実験を指す。このような実験については、今回の会議では COOKIE & CREAM の枠組み以外でも多くの発表が行われていた (3 章, 5 章を参照)。また、本会議中に積雲対流スキームをオフにした比較実験もやってはどうかという話が持ち上がり、実現に向けて話が進んでいる。今まさに、世界的な協力体制のもとで最先端の雲フィードバック研究が動き出していることを肌で感じ、非常に刺激的であった。(神代 剛・小玉知央)

5. 雲・対流の組織化

熱帯対流の組織化についてのセッションでは、組織化が気候に与える影響について、観測と雲解像モデルの結果から議論した S. Bony の発表が印象的であった。対流の組織化は大気上端における上向き長波放射の増加と上向き短波放射の減少をもたらすことが観測・雲解像モデル双方から指摘されている。雲解像モデルを用いた RCE 実験の結果は SST 上昇が対流の組織化を招くことを示唆しているが、いわゆる気候モデルでは対流の組織化を十分表現できていないため、組織化が気候へ与える影響は未だ明らかになっていない。

以上のような組織化の観点からも、水平解像度数 km 以下で実験可能な唯一の全球非静力学モデルである NICAM には大きな期待が集まっている。野田は NICAM の温暖化実験を上層雲の空間スケールに着目して解析し、対流性雲と広い面積をもつアンビルは減少するものの、狭い面積のアンビルは増加することを示した。小玉は全球 870 m 解像度実験 (Miyamoto *et al.* 2013)、MJO 予報実験、および長期気候実験という最近の NICAM の成果について速報し、特にこれまでに例を見ないような高解像度の全球 870 m 実験については、会場から驚きの声が上がった。(小玉知央)

6. 下層雲フィードバックに関するモデル間比較プロジェクト CGILS

温暖化時に下層雲が温暖化を強めるか否かは、気候モデルごとに符号すら一致しておらず、極めて難しい問題となっている。その下層雲のフィードバックのプロセスを、より単純化された条件の下で理解しようというのが、LES と SCM (気候モデルの鉛直次元版モデル) を使ったモデル間比較プロジェクト CGILS (Zhang *et al.* 2012; 吉森ほか 2012b) である。これは

層雲, 層積雲, 浅い対流を対象に, SST を2K 上昇させたときの下層雲の変化をモデル間で比較する取り組みである。これまで, LES, SCM それぞれ 8, 15 モデルが参加しており, 日本からも気象庁全球モデルをもとにした SCM が参加している (Kawai 2012)。

CFMIP や EUCLIPSE の会合においては, 毎回, CGILS に関するセッションが設けられ, 進捗が報告されている。

M. Zhang (ニューヨーク州立大学ストーニーブルック校) は, SCM の比較結果について話した。層積雲の領域においては, (浅い) 対流スキームが働いているモデルでは, 温暖化によって下層雲が減少 (すなわち, 正の雲フィードバック) する一方, 対流スキームが働かず, 乱流スキームのみが働いているモデルでは, 下層雲は増加する (負のフィードバック) 傾向が強いことを報告した。これは, 以下のようなメカニズムであると解釈されている。SST が上昇し, 下降流が弱まる将来気候において, 乱流スキームのみが働く場合には, 水蒸気輸送が活発化し, 下層雲の雲層は厚くなる。しかし, 対流スキームが同時に働く場合には, 対流が境界層内の水蒸気をより効果的に自由大気へと運ぶようになるため, 下層雲は減少する。こうした理想化された実験により, モデルの雲フィードバックのメカニズムが解き明かされていくのは, 温暖化予測研究にとって, 非常に重要な進展であると言える。

また, LES 相互比較に関する発表もなされた。LES は, 雲フィードバックのより信頼できるシミュレーションを可能にすると共に, 現実に起こりうる雲フィードバックメカニズムを理解するための最も有用なツールであろう。LES 相互比較では, 第 1 期の解析が一段落し, 現在では第 2 期への移行期間に入っている。第 1 期では, 下層雲の振る舞いは環境場の成層の違いに加え, 大規模循環に伴う下降流の強さの重要性を認識する結果となった。第 2 期では, SST を固定して CO₂濃度を 4 倍にした場合や, CMIP3 で得られた温暖化応答結果を参考に境界層上端付近の温度逆転の強さを変動させた場合についての感度実験が行われており, C. Bretherton (ワシントン大学) は 5 つの LES モデルを用いた初期結果を示した。今後は SST や湿度, 地表面と大気間の熱交換係数, 環境場の風の強さなど, 境界層雲に強く影響を与えると思われるパラメータの感度を調べる方向に進んでいる。更に, 新たな試みとして季節毎の雲の応答の違いを調

べる提案もなされた。

S. de Roode (デルフト工科大学) は, LES を使い, 現在気候と将来気候で雲頂エントレインメントが変化するのを許すか許さないかで雲フィードバックが逆になるという結果を示した。LES を用いた, こうした解析的な研究が, 下層雲フィードバックの不確実性を次第に小さくするのではないかと期待が高まる。LES 間で起こる雲の振る舞いの違いは依然として大きな問題として残されているが, その原因の包括的な理解にはまだ時間を要する。現在は, 比較的整合性が確認されているモデルの結果に着目し, そこで起きている雲応答プロセスを理解することに力が注がれている。

また, 下層雲を主な対象とした最近の観測計画として, C. Bretherton は MAGIC を紹介した。ここではカリフォルニア州とハワイ諸島を結ぶ貨物船に気象測器を積むことで, 洋上でのデータ取得を行っている。今後の詳細なデータ解析により, 亜熱帯から熱帯にかけて起こる下層雲の形態の遷移機構の理解が進展するとともに, 現実大気における LES と SCM の再現性を検証する基礎資料となることが期待される。

(川合秀明・野田 暁)

7. モデルの評価と改良

ここでは, モデルにおける雲表現の評価と改良に関連する話題の中から, 著者たちの関心をひいたいくつかのテーマについて述べる。

7.1 南大洋の雲

CMIP3/5 において, 南大洋の雲が十分に表現されていないことは多くの気候モデルに共通する問題となっている (Trenberth and Fasullo 2010)。これは, 海洋への過剰な短波入射を引き起こし, SST に正のバイアスを生み, ひいては海洋の循環に悪影響をもたらす。そのため, 南大洋の雲は最近のホットな話題の一つであり, 今回の会合でも, これに関連する発表があった。

A. Bodas-Salcedo (UKMO) は, 南大洋に発生する雲を雲タイプ別に分類し, それぞれの種類別の雲の発生頻度や, 雲のタイプ別のアルベドについて, CMIP5 のモデルを検証した結果を示した。ここでは, 南大洋に発生する低気圧をコンポジットし, 低気圧の周囲の雲の構造を検証するという手法 (Bodas-Salcedo *et al.* 2012) を用いている。多くのモデルにおいて, 低気圧の周囲の中層雲が過少であり, 浅い積雲が多

ぎるなどの結果が得られたことは、気候モデルの今後の改良に大きな手がかりをもたらしてくれるだろう。

川合は、気象庁現業全球モデル GSM で顕著な、南大洋を含む中緯度海洋下層雲の過少を改善するための下層雲のパラメタリゼーションの改良について話した。この短波放射バイアスは、GSM を予報モデルとして用いている再解析 JRA (Onogi *et al.* 2007) でも顕著 (Trenberth and Fasullo 2010) である。中緯度海洋下層雲の雲頂からの過剰な乾燥空気の流れを防止することで、下層雲が壊れにくくなり、雲量・放射バイアスが軽減されたという結果 (Kawai 2013) を報告した。

(川合秀明)

7.2 雲の相

G. Cesana (LMD/IPSL) は、気候モデルによる雲の相 (thermodynamic phase) の計算結果を衛星観測データ CALIPSO-GOCCP と比較した結果について発表した。彼らはまず、衛星搭載ライダー-CALIOP の観測データから雲の相を診断する手法を開発し、CALIPSO 衛星のデータに適用することで液相と固相の雲量の全球 3 次元気候値を作成した。また、衛星シミュレータ COSP に雲の相を診断する機能を追加し、さらに同シミュレータを気候モデルに組み込むことで、モデルの雲の相を CALIPSO データと統合的な方法で診断できるようにした。最後に、CALIPSO データとモデルの出力から診断された雲の相について相互に比較し、気候モデルの性能を評価した。

本研究で印象的だったのは、衛星データと衛星シミュレータを活用することにより、気候モデルの出力で従来は評価が難しかった側面についても検討が可能

となった点である。雲の相は雲フィードバックにも影響することが知られているため、本研究は気候予測の不確実性低減に向けても重要な意義を持つ。なお、本研究で使用された衛星データ (CALIPSO-GOCCP cloud phase climatology) は <http://climserv.ipsl.polytechnique.fr/cfmip-obs/> (2013.9.24 閲覧) から取得可能であり、COSP の次期バージョンには雲の相診断モジュールが含まれる予定である。こうした研究資源を活用し、気候モデルの性能向上につなげることが今後ますます重要になると思われる。

(小倉知夫)

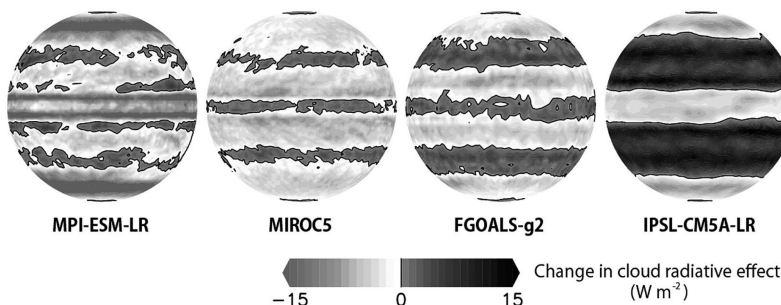
7.3 海洋上での下層雲量と下部対流圏温度逆転強度の関係

船舶からの目視雲観測データにもとづいて、下層雲量と下部対流圏温度逆転強度の間に強い正相関がみられることはよく知られているが (Klein and Hartmann 1993; Wood and Bretherton 2006)、ここでいう下層雲とは、層積雲・層雲・霧といった異なる雲タイプを含んだかなり広いカテゴリであった。神代は、これら 3 タイプそれぞれの雲量と逆転強度の関係について調べ、SST 約 16°C を境目として、層積雲のみが卓越する暖水域と、3 タイプいずれもみられる冷水域に分けられることを示した。これらの関係は、温度逆転が強まる高度や海上での寒気・暖気移流と関連している。本研究で導入した層別の逆転強度の指標を用いると、目視観測の雲タイプとの対応が不明確であった、衛星観測データや気候モデル中の下層雲を分類することが可能になる。これを活用した新しい評価方法が、気候モデルで再現される下層雲の改善につながる

ことが期待される。

今回の会議には、本研究の重要な先行研究の著者である S. Klein (LLNL) と C. Bretherton も参加しており、彼らの前で発表できて大変嬉しかった。コーヒープレイクの際に個人的に話をすることもでき、温かくも厳しいコメントをいただいて、今後の励みになる忘れられない機会となった。

(神代 剛)



第3図 海面水温を固定した水惑星実験の設定により、4つの気候モデルにおける雲フィードバック (海面水温を一律に 4°C 上昇させたときの雲放射強制力の変化, $W m^{-2}$) のばらつきを示した例。気候モデルと実験設定の詳細は Stevens and Bony (2013) およびその引用文献を参照のこと。図は彼らの Fig. 1 をもとに作成。

8. 将来構想

今回の会合は、CFMIP2としてはまとめに入る曲がり角ともいうべきものであった。CFMIPはこれまでCMIPと歩調を揃えてすすめられており、CMIP6のキックオフを見据えて、次年度の会合でまとめを行うと同時に、第3期CFMIP (CFMIP3)を開始する予定になっている。

CFMIP2の運営上の特筆すべき点は、GCSSで詳細な亜熱帯の雲の振る舞いを調べてきたグループと連携したことであろう。まだ十分とは言えないものの、これによりGCMからSCM, LESというモデルのヒエラルキーを駆使してさまざまなレベルで雲フィードバックを研究する体制が構築されつつある。一方で、モデル間の雲フィードバックのばらつきについては、どのレベルのモデルでも収束しないことが明白になってきた。具体的には、同じ大規模場の条件で駆動したLESといえどもSST昇温時の雲の応答はばらつき、実験設定をうんとシンプルにした水惑星GCMでSSTを一様に上げても雲フィードバックはモデル同士の不一致が大きい(第3図; Stevens and Bony 2013)。

この「痛い事実」を前にして、基本に立ち返って雲と気候感度の問題に取り組むべきという意見が出ている。具体化の第一歩として、世界気候研究計画(WCRP)が今後5~10年の間に解決すべき重要な課題として挙げた5つのGrand Challenges (GC, <http://www.wcrp-climate.org/grandcha.shtml>, 2013.9.24閲覧)の一つに、「雲、循環、およびECS」というテーマがGC #4として取り上げられた。これはCFMIP2のCo-ChairであるS. Bonyの努力によるところが大きいと思う。現在、GC #4では5つのイニシアティブを中心に、より具体的な課題の検討、ポジションペーパー(公式見解)の執筆、ワーキンググループの策定、国際的な予算獲得の方策などの議論が始まったところである。筆者はイニシアティブリーダーの一人として参加しているが、重要なことは夜の飲み会で決まるあたり日本とさほど変わらない、と変なところに感心している。

現在までのCFMIPはヨーロッパのモデリングセンター(英ハドレーセンター、仏IPSL、独マックスプランク研究所)が中心となって推進してきた経緯があり、米国からの参加は比較的少ない(モデリングセンターとしてはNCARくらい)。特にCFMIP2ではヨーロッパのコミュニティがEUのプロジェクト予算

(EUCLIPSE)を獲得したため、彼らの主導力が強まった。その中で、日本からはここ数年3つのグループ(MIROC, 気象研究所, NICAM)が積極的に参加しており、それなりにプレゼンスを示している。日本のグループは参加人数に比してCFMIPをリードする力が不足しているきらいがあるが、CFMIP3では日本の研究コミュニティからの提案や展望をより強く打ち出していけるものと考えている。若手の人の参加に期待したい。(渡部雅浩)

略語一覧

- AMIP: Atmospheric Model Intercomparison Project
大気モデル相互比較プロジェクト
- CALIOP: Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization
直交偏光を利用した雲エアロゾルライダー
- CALIPSO: Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation
雲エアロゾルライダーおよび赤外探査衛星観測
- CFMIP: Cloud Feedback Model Intercomparison Project
雲フィードバックに関するモデル相互比較プロジェクト
- CFRAM: Climate Feedback-Response Analysis Method
- CGILS: CFMIP-GCSS Intercomparison of Large Eddy Models and Single Column Models
- CLIVAR: Climate Variability and Predictability Project
気候変動及び予測可能性研究計画
- CMIP: Coupled Model Intercomparison Project
結合モデル相互比較プロジェクト
- COOKIE: Clouds On-Off Climate Intercomparison Experiment
雲の有無が気候に与える影響に関する比較実験
- COSP: CFMIP Observational Simulator Package
CFMIP 観測シミュレータパッケージ
- CREAM: Clouds Radiation, Easy Aerosol and More
- ECS: Equilibrium Climate Sensitivity
平衡気候感度
- EU: European Union
ヨーロッパ連合
- EUCLIPSE: European Union Cloud Intercomparison, Process Study & Evaluation Project
ヨーロッパ連合雲比較・物理過程・評価研究プロジェクト
- GCM: General Circulation Model
大循環モデル
- GCSS: GEWEX Cloud System Studies
GEWEX 雲システム研究
- GFDL: Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
地球流体力学研究所
- GOCCP: GCM-Oriented CALIPSO Cloud Product
GCM 指向 CALIPSO 雲プロダクト

- GSM : Global Spectral Model 気象庁の現業全球モデル
 ISCCP : International Satellite Cloud Climatology Project 国際衛星雲気候計画
 KNMI : Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut オランダ国立気象研究所
 LES : Large Eddy Simulation ラージ・エディ・シミュレーション
 LLNL : Lawrence Livermore National Laboratory ローレンス・リバモア国立研究所
 LMD/IPSL : Laboratoire de Météorologie Dynamique, Institut Pierre Simon Laplace ピエール・サイモン・ラプラス研究所, 気象力学研究所
 MAGIC : Marine atmospheric radiation measurement GCSS pacific cross-section intercomparison Investigation of Clouds
 MIROC : Model for Interdisciplinary Research on Climate 東京大学大気海洋研究所・国立環境研究所・海洋研究開発機構で開発された全球気候モデル
 MJO : Madden Julian Oscillation マッデン・ジュリアン振動
 NCAR : National Center for Atmospheric Research 米国大気研究センター
 NICAM : Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model 東京大学大気海洋研究所・海洋研究開発機構で開発された全球雲解像 GCM
 RCE : Radiative Convective Equilibrium 放射対流平衡
 SCM : Single Column Model 鉛直1次元モデル
 UKMO : UK Met Office 英国気象局
 SST : Sea Surface Temperature 海面水温
 WCRP : World Climate Research Programme 世界気候研究計画
- Oceanic Modelling, (43), 4.3-4.4.
 Klein, S. A. and D. L. Hartmann, 1993: The seasonal cycle of low stratiform clouds. *J. Climate*, **6**, 1587-1606.
 Manabe, S. and R. T. Wetherald, 1967: Thermal equilibrium of atmosphere with a given distribution of relative humidity. *J. Atmos. Sci.*, **24**, 241-259.
 Maslin, M. and P. Austin, 2012: Uncertainty: Climate models at their limit? *Nature*, **486**, 183-184.
 Miyamoto, Y., Y. Kajikawa, R. Yoshida, T. Yamaura, H. Yashiro and H. Tomita, 2013: Deep moist atmospheric convection in a subkilometer global simulation. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, doi: 10.1002/grl.50944.
 Onogi, K. *et al.*, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
 Slingo, A. and J. M. Slingo, 1988: The response of a general circulation model to cloud longwave radiative forcing. I: Introduction and initial experiments. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **114**, 1027-1062.
 Stevens, B. and S. Bony, 2013: What are climate models missing? *Science*, **340**, 1053-1054.
 Stevens, B., S. Bony and M. Webb, 2012: Clouds On-Off Klimate Intercomparison Experiment (COOKIE). <http://www.euclipse.eu/downloads/Cookie.pdf> (2013.8.7閲覧).
 Trenberth, K. E. and J. T. Fasullo, 2010: Simulation of present-day and twenty-first-century energy budgets of the Southern Oceans. *J. Climate*, **23**, 440-454.
 Vial, J., J.-L. Dufresne and S. Bony, 2013: On the interpretation of inter-model spread in CMIP5 climate sensitivity estimates. *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-013-1725-9.
 Wood, R. and C. S. Bretherton, 2006: On the relationship between stratiform low cloud cover and lower-tropospheric stability. *J. Climate*, **19**, 6425-6432.
 吉森正和ほか, 2012a: 気候感度 Part 1: 気候フィードバックの概念と理解の現状. *天気*, **59**, 5-22.
 吉森正和ほか, 2012b: 気候感度 Part 2: 不確実性の低減への努力. *天気*, **59**, 91-109.
 吉森正和ほか, 2012c: 気候感度 Part 3: 古環境からの検証. *天気*, **59**, 143-150.
 Zhang, M., C. S. Bretherton, P. N. Blossey, S. Bony, F. Briant and J.-C. Golaz, 2012: The CGILS experimental design to investigate low cloud feedbacks in general circulation models by using single-column and large eddy simulation models. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **4**, M12001, doi:10.1029/2012MS000182.

参考文献

- Bodas-Salcedo, A., K. D. Williams, P. R. Field and A. P. Lock, 2012: The surface downwelling solar radiation surplus over the Southern Ocean in the Met Office Model: The role of midlatitude cyclone clouds. *J. Climate*, **25**, 7467-7486.
 釜江陽一, 小玉知央, 武石あずさ, 2013: EUCLIPSE 雲と気候に関するサマースクール参加報告. *天気*, **60**, 797-802.
 Kawai, H., 2012: Examples of mechanisms for negative cloud feedback of stratocumulus and stratus in cloud parameterizations. *SOLA*, **8**, 150-154.
 Kawai, H., 2013: Improvement of a stratocumulus scheme for mid-latitude marine low clouds. CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and