

課題名	気候モデルにおける下層雲のパラメタリゼーションの改善に関する研究		
担当研究機関	国土交通省気象庁気象研究所		
研究期間	平成16-18年度	合計予算額 (当初予算額 ベース)	37,574千円 (うち18年度 11,277千円)
研究体制	気候モデルにおける下層雲のパラメタリゼーションの改善に関する研究 (国土交通省気象庁気象研究所)		
研究概要	<p>1. 序 (研究背景等)</p> <p>地球温暖化対策技術の評価に際しては、気候モデルによる予測が十分な精度を持っていることが不可欠である。現状の気候モデルにおける予測精度の不確実性の一因に気候モデルでの雲の表現が十分でないことが挙げられている。たとえば、炭酸ガス倍増に伴う実験で、気候感度は各モデルにより1.5~5.0Kの違いが見られ、下層雲の雲量が少ないほど気候感度が大きいことが報告されている。このことから下層雲を精度良く表現できるかどうかは気候モデルの改善に関わる重要な課題の一つと言える。</p> <p>雲は太陽からの放射エネルギーを反射し、地球大気に流入するエネルギーを減少させる。また、地表面からの赤外放射エネルギーを吸収し、地球大気外への放出エネルギーを減少させるとともに雲頂からの放射により、地球大気外に赤外放射エネルギーを流失させる。このような放射エネルギーのやりとりを通じて雲は気候の形成に大きな影響を及ぼしている。雲の放射エネルギー収支に与える影響は雲の種類によって異なる。下層雲は背の低い(雲頂高度がおおよそ1500m)、光学的に厚い雲として特徴づけられる。このため、長波長放射として宇宙空間への放出量が多く、太陽光の反射も強く地球大気への放射エネルギーの流入を減少させる。結果として地球大気を冷却する効果が他の中・上層雲に比べて大きい(Inoue and Ackerman, 2002)。また、国際衛星雲気候計画(ISCCP)の解析から、積乱雲のような放射収支に大きな影響を与える雲は地球全体で占める面積は小さいのに対し、同程度の放射効果を持つ下層雲はカリフォルニア沖、ペルー沖やアフリカ大陸沖などの大陸西岸沖の海面温度の低い海域に広く分布する。このため放射収支に与える影響は非常に大きい。</p> <p>下層雲は様々な物理プロセスの非常に複雑な相互作用によって形成・維持されている(Duynkerke and Teixeira, 2001など)。下層雲は50~500m程度の厚さを持ち、水蒸気の供給源は地表面からの乱流輸送である。また、雲頂からの長波長放射の冷却により雲層を含む大気境界層を不安定化させ、水蒸気の鉛直輸送を活発化させる。さらに、地表面からの長波長放射によって雲底がわずかながら加熱され雲層が不安定化される。水蒸気の雲粒への変化による凝結熱も雲層内の乱流を形成する。また、雲頂での温度逆転層が存在し、雲頂への乾いた暖かい空気のエントレインメントは下層雲の消滅に影響している。そのほか、日中の短波長放射の影響や霧雨の発生による影響など様々な物理プロセスの相互作用が下層雲の形成・維持に関わっている。気候モデルでは現在のところこれらすべてのプロセスを組み込むことができないため、なんらかのパラメタリゼーションを行う必要がある。</p> <p>このように気候モデルでの下層雲のパラメタリゼーション法を改善することは重要な課題であるといえる。下層雲のパラメタリゼーション法の改善については全球エネルギー・水循環実験(GEWEX/WCRP)でも巻雲や深い対流のパラメタリゼーション法の改善とともに重要な課題の一つとなっている。このために、最新の衛星データ解析手法を用いて算定される下層雲の雲パラメータと気象・海洋要素との対応を調査し、下層雲の形成・維持・変動について解析することは、気候モデルの下層雲のパラメタリゼーション法を改善する上で重要であると考えられる。</p>		

## 2. 研究目的

地球温暖化予測についてのモデル比較から、温暖化の割合は1.5~5.0Kと異なり、下層雲の雲量が少ないほど温暖化がより大きいという報告(Climate Process Team)がある。このことは、地球温暖化予測の精度向上のため気候モデルにおける下層雲の正確な表現が重要であることを示している。現在の気候モデルでの下層雲の再現は、衛星によって算定された雲量との比較ではどのモデルも十分ではない。また、雲が解像できる非静力学モデルによる気候変動予測は当分の間見込まれない。このため下層雲のパラメタリゼーション法を改善する必要がある。

本研究では、気象衛星の可視・赤外多チャンネルデータを用いて下層雲の雲パラメータ（雲量、形態、高度等）の抽出手法の改善・開発を行う。算定された下層雲の雲パラメータとラジオゾンデや地球観測衛星などにより算定される気象要素との対応を調べ、下層雲発生時の気象要素の特徴を抽出する。また、雲パラメータの季節変化や日変化およびそれに伴う気象要素の対応を調査する。これらの情報から気候モデルによる下層雲の表現を改善するパラメタリゼーション法を開発し、開発されたパラメタリゼーション法による現在気候における実験の下層雲の表現と既存の雲気候値との比較検証を行う。また、炭酸ガス倍増時の環境での実験で表現された下層雲と現在気候の下層雲の表現を比較する。

## 3. 研究の内容・成果

下層雲が広域に発生するカリフォルニア西岸に位置するReyes岬におけるラジオゾンデの観測と衛星による雲パラメータの解析との比較を行った。その結果、①曇天時には晴天時に比べ逆転層（安定度）がより強く（晴天時にも弱いながらも存在）、逆転層より下層で湿度がより高く、風速が弱い。②地表面近傍の安定度は曇天時に比べ、晴天時により高い。③曇天時には逆転層より上層（850hPa以下）で非常に湿度が低いことが分かった。また、より光学的厚い雲が存在するほど、より逆転層が強く、湿度の高い領域がより厚く、風速が弱いことが分かった。曇天時の温度の逆転層の高さの平均値は940~950hPaと背が低いことが確認できた。

これらの解析を考慮して、以下のパラメタリゼーション法（V-1）を開発した。①地表面の安定度が強くないこと、②温位の強い勾配（逆転層）があること、③その逆転層の高度が940hPa以下に存在することを下層雲の発生条件とした。この条件を満たすとき、下層雲を発生させ、その雲量は安定度に依存して与えた。また、下層雲が発生した場合、拡散係数の平滑化は行わない。その結果、大陸西岸近傍に国際衛星雲気候計画（ISCCP）の観測に近い下層雲が発生することが確認できた（図1）。また、季節変化や日変化についてもよく表現できていることが確認できた。さらに④相対湿度が80%以上であることを条件に追加し、下層雲が発生した場合に拡散係数の平滑化を910hPa以下では行わないことにした。この改良版パラメタリゼーション（V-2）では相対湿度の条件を付加したため、観測から得られているカリフォルニア沖からハワイ沖にかけて下層雲の雲頂高度が高くなっている状況についても表現できていることが分かった（図2）。

気象庁の再解析ではこのパラメタリゼーションの初期バージョンが用いられている。ヨーロッパ中期予報センター（ECMWF）や米国環境予報センター（NCEP）の再解析と比較した結果、大陸西岸の下層雲の表現については気象庁の再解析の結果がよいことが分かった（表1）。また、炭酸ガスを2倍、海面温度も2080年前後を想定した温暖化条件下で、このパラメタリゼーションを用いた実験も行った。その結果、大陸西岸における下層雲の雲量ではカリフォルニア沖以外は現在気候値に比べやや増加傾向を示したが大きな違いは見られなかった。他の領域では、ハワイ近傍やインド洋での下層雲も現在気候値に比べやや増加した（図3）。

衛星データの新しい利用法として、Split-Windowデータを用いて下層雲の雲パラメータ（光学的厚さおよび雲粒の有効半径）を算定する手法を開発した。水雲の吸収率が $11\mu\text{m}$ と $12\mu\text{m}$ で異なるため雲パラメータに依存した輝度温度と輝度温度差を示す（図4）ことを利用した。これまでの雲パラメータ算定法では可視データが不可欠であり解析は日中に限定されていたが、赤外2チャンネル（Split-Window）と $8.7\mu\text{m}$ を用いることにより、下層雲の雲パラメータについては昼夜に関係なく同じ算定できるようになった。

また、下層雲の変動（季節変化や日変化）と気象要素の対応を調べた。ペルー沖に発生する下層雲の季節変化は海面温度、海上風と密接に関連していることが分かった。さらにこれらの気象要素の変動は中部太平洋の積雲対流活動と関連していることが示唆された。

衛星画像データを用い、雲の空間分布の特徴を調べた。領域を設定し、その領域内で空間相関を距離の関数として計算し、領域内での標準距離を定義した。この空間相関距離を用いることにより、下層雲の形態を判別できることが分かった。

## 4. 考察

気候モデルによる下層雲の再現性が良くない原因としては、鉛直分解能が不足していることが挙

げられる。そのため、モデルでは下層雲の上端で観測される強い逆転層が表現できていない可能性がある。また、下層雲を形成するのに必要な地上からの鉛直方向の水蒸気輸送が、境界層の中で十分に表現できていない可能性もある。このことはモデルでの下層がメリハリの少ない高湿度域が分布することに対応していると思われる。これらのことを考慮して安定度を主として用いるパラメタリゼーション法を開発し、大陸西岸のごく近傍でも下層雲の再現に成功した。観測からは湿度と下層雲の相関は高いため、モデルでの湿度の振る舞いを精査し、パラメタリゼーションへの導入を検討し、相対湿度の条件を付加することにより、鉛直60層のモデルで、カリフォルニア西岸からハワイ沖にかけて下層雲の雲頂高度が徐々に上がる状況が再現できた。気象研の気候モデルによる3年実験では新しいパラメタリゼーションにより大陸西岸沖での雲の反射率および短波長放射は改善したが、全球平均では放射収支の不均衡が増加した。この原因については下層雲スキームだけでなく放射スキームも含めたモデル全体としての検討が必要と考える。

カリフォルニア西岸に位置するReyes岬で、下層雲と気象要素との比較・解析を行った。その結果、下層雲発生時に安定度や湿度の重要性は再確認できたが、日本付近での逆転層の高さに比較してより低いことが分かった。この一因には日本付近での下層雲の定義に温帯低気圧に伴うやや高い雲も含まれていたことが考えられる。気候へのフィードバックを考えると大陸西岸沖の下層雲の表現が重要である。今回のパラメタリゼーションではカリフォルニア沖、ペルー沖、ナミビア沖、モーリタニア沖など主要な大陸西岸沖で広く発生する下層雲を表現できている。これらの領域では下層雲の背は非常に低いことが示唆される。

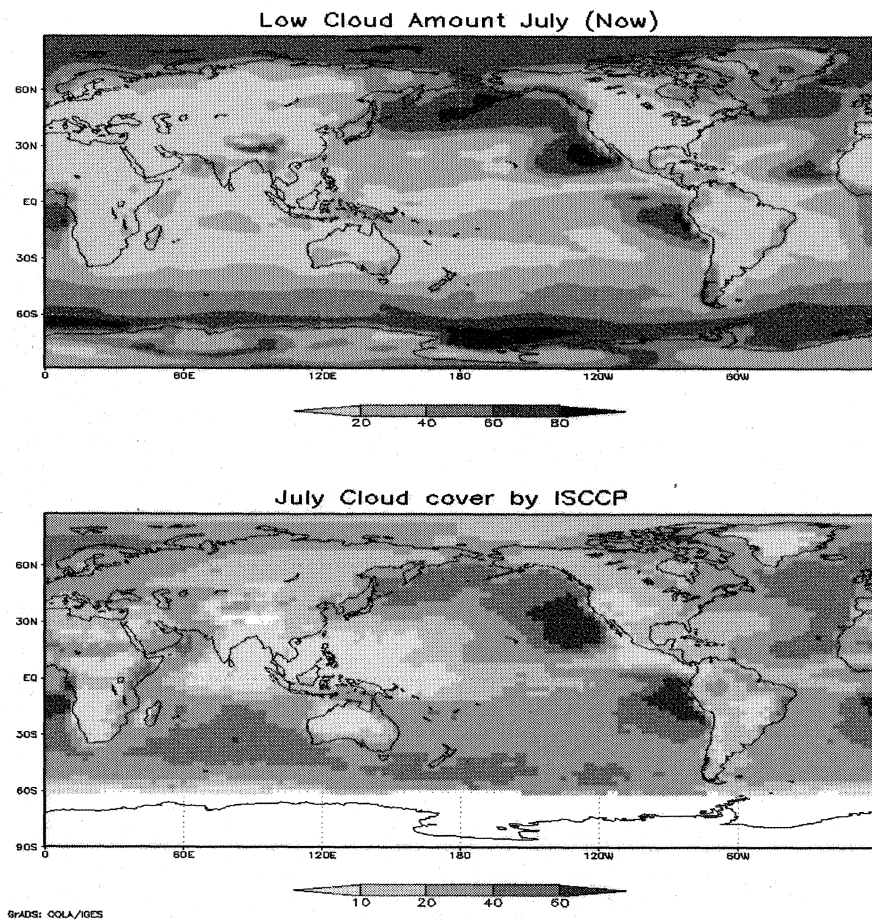


図1 本パラメタリゼーション用いたモデルでの現在気候における7月の下層雲の雲量分布（上）およびISCCPによる衛星観測による下層雲の雲量分布

表1 各再解析の各領域での下層雲量の平均値。( )内は、ISCCPとのr.m.s.誤差

	ISCCP	JRA25	ERA40	NCEP40
カリフォルニア沖	72.3%	82.6%(13.6%)	62.0%(12.4%)	67.6%(9.2%)
ペルー沖	70.1%	62.6%(15.4%)	56.3%(17.3%)	45.2%(28.4%)
ナミビア沖	69.8%	56.0%(15.5%)	45.5%(25.2%)	40.6%(30.5%)

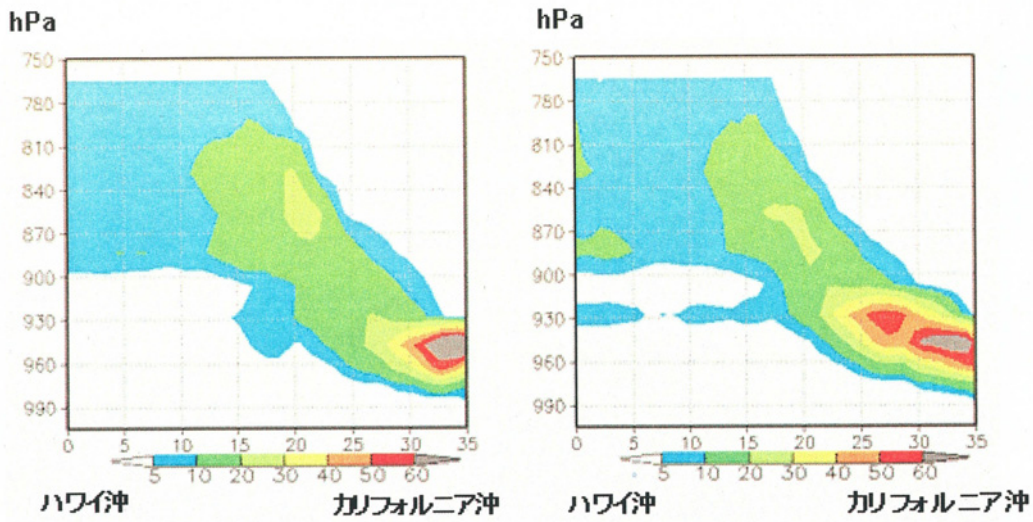


図2 本パラメタリゼーション（左）と改良版パラメタリゼーション（右）によるカリフォルニア沖からハワイ沖にかけての雲の鉛直分布

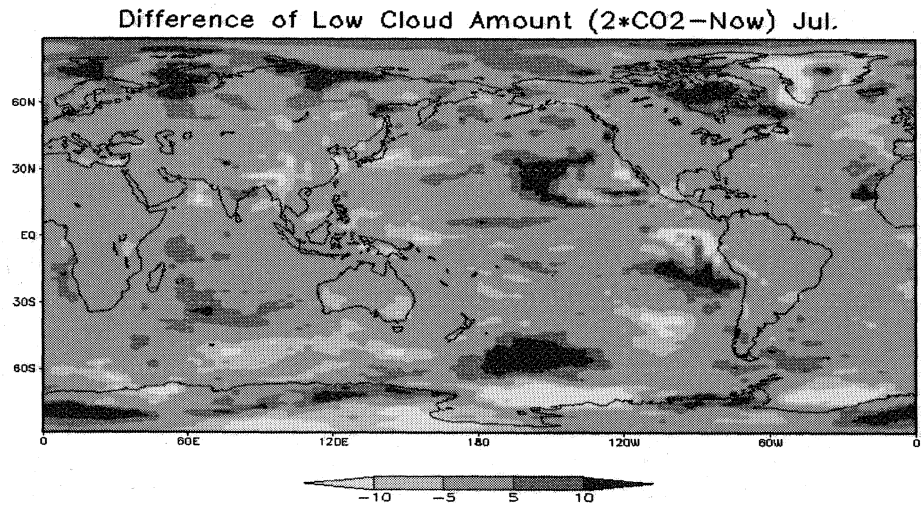


図3 温暖化時と現在気候での下層雲の雲量の差

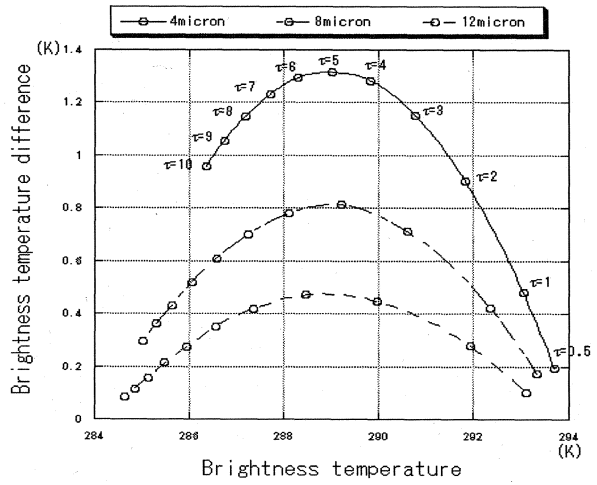


図4 下層雲の雲パラメータと Split-Window による輝度温度と輝度温度差の関係