

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04046

研究課題名(和文) 夏季北太平洋における多層雲・放射・降水過程と海洋混合層の相互作用の解明

研究課題名(英文) A study on the interaction among multi-layer cloud, radiation, precipitation, and ocean mixed layer

研究代表者

早坂 忠裕 (Hayasaka, Tadahiro)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：40202262

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：様々な衛星観測データ、再解析データ、船舶観測データ、アルゴフロート観測データを用いて総合的に解析した。また、領域気象モデルWRFを用いて海面水温と雲の関係性のシミュレーションを実施した。その結果、今まで海面水温と大気の安定度といった比較的単純な視点で解析されてきた夏季北太平洋の下層雲は西部と中央部で微細構造が異なることが示された。また、北太平洋西部では西岸境界流である黒潮および黒潮続流が支配的であり、雲の変動が海に及ぼす影響は少ない。一方、北太平洋中央部では、海洋混合層が浅く、海面水温も雲に影響を及ぼすが、雲の変動も海洋混合層に影響を及ぼすことが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

夏季北太平洋の中高緯度領域は、ほぼ全域で下層雲が頻繁に出現し、持続する。以前から、この海域の大気海洋相互作用、雲量と海面水温の関係に関する研究例は少なくないが、北太平洋中高緯度全域に着目し、雲の多層構造から海洋混合層まで大気海洋の鉛直構造に着目して実施した例はほとんどなかった。本研究の成果は、夏季北太平洋の下層雲と海面水温さらには海洋混合層の関係解明に一石を投じたものと言える。また、気候の将来予測において、大きな不確定要因の一つは下層雲を含む大気境界層であり、本研究の成果はこの点においても意義のあるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：A comprehensive analysis was performed using various satellite observation data, reanalysis data, ship observation data, and Argo float observation data. In addition, the simulation of the relationship between sea surface temperature and clouds was performed using the regional meteorological model WRF. As a result, it was shown that the low clouds in the summer North Pacific, which have been analyzed from relatively simple viewpoints such as sea surface temperature and atmospheric stability, have different fine structures in the western and central regions. In the western part of the North Pacific Ocean, the Kuroshio and Kuroshio Extension are dominant, and cloud fluctuations have little effect on the sea. On the other hand, in the central part of the North Pacific Ocean, it is suggested that the ocean mixing layer is shallow and the sea surface temperature affects the clouds, but the fluctuation of the clouds also influences the ocean mixing layer.

研究分野：大気物理学

キーワード：雲 大気海洋相互作用 北太平洋

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

夏季北太平洋の中高緯度領域は、ほぼ全域で下層雲が頻繁に出現し、持続する。気圧場の関係から西部から中央部にかけては上層雲も出現し、西部、特に黒潮続流域では降水量も比較的多いが、東部では上層雲は少なく降水量も少ない。また、この海域では、雲量の多い北緯約 40 度以北では 1950 年代以降表層の塩分が長期的に減少し、雲の少ない亜熱帯域では逆に塩分が増加しており、その一因として北部では降水量の増加が、また、亜熱帯域では蒸発量の増加があげられている (IPCC AR5, 2013)。しかしながら、下層雲、多層雲からの降水量および短波・長波放射の正確な評価とその変動メカニズムの解明は不十分である。以前から、この海域の大気海洋相互作用、雲量と海面水温の関係に関する研究例は少なくないが、北太平洋中高緯度全域に着目し、雲の多層構造から海洋混合層まで大気海洋の鉛直構造に着目して実施した例は無い。

これらの雲について、下層雲の雲粒有効半径が北太平洋中央部で大きいこと、下層雲は南からの湿潤な大気の移流によって維持されること、また、西部～中央部の上層雲の存在が下層雲の特徴を変化させることなどが、科研費新学術領域研究 (中緯度海洋と気候、平成 22～26 年度) の計画研究課題「雲・放射エネルギーを介したモンスーンアジアの大気海洋相互作用」(代表: 早坂忠裕) で明らかにされてきた

北太平洋には、黒潮の離岸ジェットである黒潮続流、親潮反流等、亜熱帯循環あるいは亜寒帯循環の一部を形成する東向きの海流が存在する。黒潮続流の水温前線を挟んで冷水側と暖水側で大気安定度や水蒸気量が異なることにより、夏季の下層雲や海面に入射する放射量に差異が生じることが、上記の科研費新学術領域研究の計画研究「黒潮・親潮続流域における相互作用の現場観測」(代表: 川合義美) で明らかにされた。これらの海流の近傍では、冬季に大気海洋相互作用で海洋混合層が発達し、春から夏にかけて海面付近が日射や大気によって加熱されることにより、厚い冬季混合層の上部が季節躍層によっていわば蓋をされるような構造が形成される。海洋表層の構造には、短波放射や海面における顕熱、潜熱以外に、長波放射も影響する。さらに海水温度や塩分、密度に関しては蒸発量と降水量を定量的に把握する必要がある。海域の降水量の推定は衛星観測によるものが主であるが、特に夏季北太平洋の降水量の評価は不確実性が大きい。

2. 研究の目的

夏季北太平洋の多層雲・放射収支・降水過程とこれらが海洋表層の構造に及ぼす影響、そして海洋から雲へ及ぼすフィードバック機構を定量的に解明する。衛星データ、Argo フロート、船舶観測のデータ解析、大気海洋領域モデルを用いて研究を実施する。夏季北太平洋中高緯度の雲によってもたらされる降水量は東西で異なり、未だその評価が不十分である。衛星搭載雲レーダー、船舶観測等を用いて精度向上を図る。また、雲の多層構造、海上気温と海面水温によって影響を受ける下層雲と降水の特徴を Argo フロート等の解析で得られる海洋混合層の特徴と一緒に理解することにより、今まで海面を中心に議論されてきた大気海洋相互作用について大気海洋の鉛直構造と熱収支・水収支に焦点を当て、北太平洋中高緯度の各海域で明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、衛星データを用いた雲の多層構造の解析と短波・長波放射、降水量の解析を行なう。次に、これらの結果と気象・海洋客観解析データ、船舶観測データを用いた大気混合層・海面熱収支・水収支の解析を行なう。さらに、Argo フロートによる海洋混合層の解析を行い、夏季北太平洋における海洋混合層の形成、時空間変動を解明すると同時に、海面熱収支・水収支との関係を明らかにする。さらに領域モデルによる大気および大気海洋のシミュレーションも実施することにより、雲と放射、降水が夏季北太平洋の海洋混合層に及ぼす影響の理解を深めるとともに、雲へのフィードバックを定量的に評価する。

(1) 衛星データ解析に基づく雲・放射・降水の解析

雲の特性に関しては衛星データを用いて解析する。特に雲の多層構造とそれが下層雲と降水に及ぼす影響を評価するため、CALIPSO に搭載された衛星ライダーと CloudSat 搭載の雲レーダーのデータを用いる。これらのデータから水と氷の雲粒、雨、雪を分類する手法は開発されており、このアルゴリズムを改良して多層雲の構造解明と霧雨を含む暖かい雨の推定を行なう。船舶で観測された降水量データを検証に利用し、衛星観測の検証を行なう。こうして得られる降水量データと GSMaP 等のデータセットを合わせて解析し、海面における降水量推定の精度向上を図る。

また、衛星搭載雲レーダーと可視赤外イメージャーを用いて下層雲の研究を行ってきた実績を活かし、得られた雲量、雲の光学的厚さ、雲粒有効半径、雲粒の相、雲の鉛直分布と客観解析データ、ゾンデ観測データによって得られる気温、水蒸気の分布を用いて海面における短波・長波放射フラックスを計算する。計算された値は船舶観測、パイによる観測と比較し、検証する。また、短波放射については海洋混合層内における透過と吸収を計算により求める。

(2) 船舶観測

JAMSTEC の観測船「白鳳丸」「みらい」の太平洋航海を利用してゾンデ観測を実施し、短波・長波放射フラックス、降水量、気温、水蒸気、風、海面水温、塩分の観測を実施する。今までにも豊富な船舶観測経験を有しており、大気境界層と海洋混合層の詳細な解析を行なう。また、これらの観測データを衛星データ解析の結果や領域モデルによる大気海洋数値シミュレーションの検証に用いるとともに、Argo フロート観測データと一緒に解析し、海洋混合層の特徴を解明する。

(3) Argo フロート観測データを用いた海洋表層混合層・季節躍層の解析

今までの Argo フロート観測データ解析の実績を活かし、得られる個々のプロファイルデータから、混合層とその直下の季節躍層を特徴づける諸パラメータ(混合層深度、混合層の水温・塩分、季節躍層の強度・厚さ、成層への水温・塩分の寄与)のデータセットを作成する。特に、夏季の浅い混合層の時間発展や海域差を十分に検出できるように、従来の混合層検出手法を再検討し、改良を加える。これを用いて表層混合層・季節躍層の構造とその時空間変動を解析する。海域ごとに混合層・躍層の季節内時間発展と大気強制の関係を調べる。同時に、混合層深度・水温・塩分変動への季節躍層強度・厚さ等の影響を評価する。また、表層混合層・季節躍層の構造を類型化し、類型ごとに、時空間高解像度の衛星海面水温データから得られる海面水温の短期変動特性との関係を調べる。

(4) 大気海洋結合領域モデルを用いた海洋混合層と雲の数値シミュレーション

海洋領域モデルや大気海洋結合領域モデル(WRF、CReSS等)を用いて多層雲における上層雲の下層雲、降水、放射過程に及ぼす影響を評価する。また、雲に及ぼす海洋表層の影響を評価する。これらの結果を船舶観測、衛星観測の結果と比較することにより、大気海洋システムの鉛直構造と海洋表層の変動メカニズムを理解する。また、海面水温の状態を仮想的に変えることにより、海洋混合層と海面水温が雲に及ぼす影響を評価し、海洋から雲に及ぼすフィードバックメカニズムを解明する。

4. 研究成果

まず初めに、広域を観測できる受動型衛星センサーであるMODISの解析から、対象領域における雲量・雲の光学的厚さ・雲粒有効半径の変動を解析した。これらの結果とOISST海面水温データとの比較から、海面水温前線と下層雲の南端が対応していること、また、両者は1980年代から現在までの間に北上する傾向を示していることが示された。さらに、ECMWF再解析データを用いて気圧場、風向風速、下層雲量等の気象場の解析を実施した。特に、北緯40度付近の海水温度が急激に変化するいわゆる海洋前線付近の位置と下層雲量の関係に着目した。これらのデータ解析の結果、長期的には海洋前線は北上する傾向が見られるとともに中央から東部において年々変動が大きいことが示された。これに伴って、下層雲の南端も北太平洋の西部と東部で変動の実態が異なることが示された。海洋表層の混合層についてもアルゴフロート観測データを用いて解析を行ったところ、中央部から東部の海洋表層は混合層が極めて薄く、雲を含む大気の変化に大きく影響されることが示唆された。一方、西部においては黒潮および黒潮属流によって比較的深い層まで海洋の構造が決まっているため、雲や気象場による影響を受けにくいものと考えられる。

次に、領域大気モデルWeather Research and Forecasting model (WRF)を用いて、衛星観測データの解析期間と同時期の夏季北太平洋の中高緯度帯の下層雲および上層雲の再現実験を行った。その結果下層雲は比較的良く再現されるが、雲の多層構造の再現については不十分であることが示された。さらに、海面水温が下層雲場およびその変動に対する影響は未解明であったため、領域気象モデルを用いて下層雲に対する海面水温の能動的な影響および関連する物理過程を計算し、ECMWF再解析データや船舶観測データ等も用いて解析した。

また、領域気象モデルを用いたシミュレーションにおいて、人工的な異なる海面水温を与えることで、夏季北太平洋における下層雲変動に対する海面水温の能動的な影響を解明した。本研究では、特に北太平洋において西岸境界流に伴い形成される親潮海面水温前線に着目し、観測に基

づく海面水温場をそのまま与えた実験と空間フィルターを施し、人為的に前線の特徴を消した海面水温場を与えた実験の比較を行った。その解析結果より、夏季北太平洋の下層雲の時空間分布および物理特性が水温前線に伴う海面水温偏差の時空間分布に強く強制されうること、月平均場だけでなく数日スケールの下層雲変動に対しても強く影響を与えることが明らかになり、夏季北太平洋における下層雲への海面水温の能動的な影響が示唆された。また、大気温度・水蒸気収支解析を行い、下層雲の生成・消滅過程を解析した結果、前線を横切る水平風に伴う温度移流過程が雲水の生成・消滅にとって重要であることがわかった。加えて、より長い時間スケールで変動する水温前線が短い時間スケールで変動する下層雲に影響を与えることから、複数の時間スケールにまたがる大気海洋相互作用過程の重要性が示唆された。

上で述べた夏季北太平洋における海面水温の能動的な影響を支持する観測的事実を提示するため、衛星観測及び再解析データを用いた解析を行い、親潮海面水温前線の前線強度に対する下層雲特性の変動・応答を解明した。解析の結果、数日から数週間の短い時間スケールでは海面水温前線の能動的な影響を明らかにすることができなかつたため、本研究では経年変動スケールに着目し解析を行った。まず、Argo フロートデータを用いて水温前線の形成過程を調査した結果、北太平洋西部の水温前線の強度変化は海面での熱フラックスの変動では説明できず、西岸境界流（黒潮および黒潮続流）に伴う海洋力学過程が極めて重要であることが示された。次に前線強度の経年変動に伴う下層雲特性の応答およびその要因について調査した結果、モデルで得られたような海面水温に対する下層雲の応答が確認され、下層雲変動の50%程度を海面水温偏差で説明できることから、海面水温前線強度の変動に伴う海面水温偏差が主要因であることが明らかになった。これらの領域気象モデルによる結果及び各種データ解析による研究結果から、夏季北太平洋の西岸境界流域における海面水温の能動的な影響および雲と海面水温の相互作用の重要性が示唆された。

以上、まとめると、本研究の結果、今まで海面水温と大気の安定度といった比較的単純な視点で解析されてきた夏季北太平洋の下層雲は西部と中央部で微細構造が異なることが示された。また、北太平洋西部では西岸境界流である黒潮および黒潮続流が支配的であり、雲の変動が海に及ぼす影響は少ない。一方、北太平洋中央部では、海洋混合層が浅く、海面水温も雲に影響を及ぼすが、雲の変動も海洋混合層に影響を及ぼすことが示唆された。現在、気候の将来予測において、大きな不確定要因の一つは下層雲を含む大気境界層であり、本研究の成果はこの点においても意義のあるものと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Maeda, S., Y. Urabe, K. Takemura, T. Yasuda, Y. Tanimoto	4. 巻 12
2. 論文標題 Significant atmospheric circulation anomalies over the North Pacific associated with enhanced Pacific ITCZ during the summer-fall of 2014	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 SOLA	6. 最初と最後の頁 282-286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.2151/sola.2016-055	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kawakami, Y., S. Sugimoto, T. Suga	4. 巻 72
2. 論文標題 Inter-annual zonal shift of the formation region of the lighter variety of the North Pacific Central Mode Water.	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 225-234
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1007/s10872-015-0325-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hayasaka, T.	4. 巻 94
2. 論文標題 The Long-term Variation in Surface Shortwave Irradiance in China and Japan: A Review.	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan	6. 最初と最後の頁 393-414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.2151/jmsj.2016-024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 山口凌平, 須賀利雄	4. 巻 49
2. 論文標題 北太平洋における季節水温躍層の鉛直構造	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 月間海洋	6. 最初と最後の頁 287-294
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi, N., T. Hayasaka, and H. Okamoto	4. 巻 1810
2. 論文標題 Ice cloud microphysical properties in tropical Pacific regions derived from CloudSat and CALIPSO measurments.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 AIP Conferences Proceedings IRS 2016	6. 最初と最後の頁 70008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1063/1.4975529	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nurfiena Sagita PUTRI, Tadahiro HAYASAKA, Kim Dionne WHITEHALL	4. 巻 95
2. 論文標題 The Properties of Mesoscale Convective Systems in Indonesia Detected Using the Grab 'Em Tag 'Em Graph 'Em (GTG) Algorithm	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan	6. 最初と最後の頁 391-409
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.2151/jmsj.2017-026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Takahashi, N., T. Hayasaka, H. Okamoto	4. 巻 1018
2. 論文標題 Ice cloud microphysical properties in tropical Pacific regions derived from CloudSat and CALIPSO measurments.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 AIP Conferences Proceedings IRS 2016	6. 最初と最後の頁 70008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1063/1.4975529	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sugimoto, S., K. Hanawa, T. Watanabe, T. Suga, S.-P. Xie	4. 巻 7
2. 論文標題 Enhanced warming of the subtropical mode water in the North Pacific and North Atlantic.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nature Climate Change	6. 最初と最後の頁 656-658
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1038/nclimate3371	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kawai Y., Q. Moteki, A. Kuwano-Yoshida, T. Enomoto, A. Manda, H. Nakamura	4. 巻 95
2. 論文標題 Impact Propagation of Radiosonde Data Assimilation over the Kuroshio and Kuroshio Extension: Case Study on the Early Summer (Baiu) in 2012	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan	6. 最初と最後の頁 71-90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.2151/jmsj.2017-004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamauchi, A, K. Kawamoto, A. Manda, J. Li	4. 巻 18
2. 論文標題 Assessing the impact of the Kuroshio Current on vertical cloud structure using CloudSat data.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Atmospheric Chemistry and Physics	6. 最初と最後の頁 7657-7667
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi::10.5194/acp-2017-1134	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Putri, N. S., H. Iwabuchi, T. Hayasaka	4. 巻 96B
2. 論文標題 Evolution of Mesoscale Convective System around Indonesia as Derived from Himawari-8 High Resolution Data Analyses.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan	6. 最初と最後の頁 239-250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.2151/jmsj.2018-020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Khatri, P., T. Hayasaka, H. Iwabuchi, T. Takamura, H. Irie, T. Y. Nakajima, Takenaka	4. 巻 96B
2. 論文標題 Validation of MODIS and AHI observed water cloud properties using surface radiation data.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan	6. 最初と最後の頁 151-172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.2151/jmsj.2018-036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamaguchi, R., T. Suga, K. J. Richards, B. Qiu	4. 巻 53
2. 論文標題 Diagnosing the development of seasonal stratification using the potential energy anomaly in the North Pacific	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Clim. Dyn.	6. 最初と最後の頁 4667-4681
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s00382-019-04816-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Khatri, P., H. Iwabuchi, T. Hayasaka, H. Irie, T. Takamura, A. Yamazaki, A. Damiani, H. Letu, Q. Kai	4. 巻 12
2. 論文標題 Retrieval of cloud properties from spectral zenith radiances observed by sky radiometers.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Atmos. Meas. Tech.	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.5194/amt-12-6037-2019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Zhang, B., Z. Guo, L. Zhang, T. Zhou, T. Hayasaka	4. 巻 7
2. 論文標題 Cloud characteristics and radiation forcing in the global land monsoon region from multisource satellite data sets.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth and Space Science	6. 最初と最後の頁 e2019EA001027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1029/2019EA001027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計1件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 高橋直也、早坂忠裕
2. 発表標題 Cloud Object解析手法を用いた熱帯域の雲特性と環境場の関係の解明
3. 学会等名 日本気象学会2016年度秋季大会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	谷本 陽一 (Tanimoto Yoichi) (00291568)	北海道大学・地球環境科学研究所・教授 (10101)	
研究 分担者	万田 敦昌 (Manda Atsuyoshi) (00343343)	三重大学・生物資源学研究所・准教授 (14101)	
研究 分担者	河本 和明 (Kawamoto Kazuaki) (10353450)	長崎大学・水産・環境科学総合研究科(環境)・教授 (17301)	
研究 分担者	川合 義美 (Kawai Yoshimi) (40374897)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発 センター・主任研究員 (82706)	
研究 分担者	須賀 利雄 (Suga Toshio) (70211977)	東北大学・理学研究科・教授 (11301)	