

第40回メソ気象研究会報告

静かなるメソ気象—ヤマセ・霧・層雲—

コンビーナー：吉岡真由美*

1. はじめに

吉岡真由美

激しい降水や強風を伴うメソスケール気象現象は、人々の関心を引き注目されることが多い。このため、集中豪雨や台風で代表されるような激しい降水を伴う現象が、メソ気象研究会のテーマとしてこれまで多く取りあげられてきた。しかし、メソスケール気象現象には一時的で激しいものだけではなく、霧や薄い雲、それらを伴う現象も含まれる。そこで第40回メソ気象研究会では、霧や層雲を中心とした比較的静かで持続しおだやかな雨を伴う現象を取り上げ、秋季大会前日の2013年11月18日(月)に東北大学百周年記念会館川内萩ホール会議室で開催した。コンビーナーから5名の方に講演を依頼し、気象現象としての霧や層雲の動態、その雲の中に存在する水や氷の粒子と雲物理過程、気候に与える影響、これらの現象をとらえるさまざまな観測・観測機器・解析手法、その現状についても話題提供して頂いた。今回のメソ気象研究会の参加者は165名にのぼり、参加者の身分(学生、研究者など)・年齢構成は様々で、多岐にわたる専門分野の方に参加していただく盛況な会となった。

2. 監視カメラでとらえた海霧・山霧の動態

藤吉康志(北海道大学低温科学研究所)

霧は比較的身近であるためか“それなり”によく調べられており、発生した霧は天気図を用いた大規模な

気象条件との対応を示すことで分類されることが多い。しかし天気図と身近な現象である霧の間には大きなスケールギャップがあり、実際には霧はメソスケール現象である。比較的大きな水滴で構成される海霧監視用ミリ波レーダを除けば、霧のメソスケール構造を調べるのに適した装置はまだ無い。

霧は雲に比べて時間変化が遅く、出現場所がほぼ限られており、かつ放射霧のように夜に発達することが多いので、霧の研究にはタイムラプス(コマ撮り)型のカメラによる長期モニタリングが有効である。今回の研究会では、我々が国内の様々な場所に設置したカメラで撮影した海霧や山霧の動態を中心に紹介した。これらの画像は霧によって可視化された冷氣密度流の動態研究ばかりではなく、占冠村の雲海テラスや摩周湖、羊蹄山麓やオホーツク海に発生する霧など北海道観光にも利用されている。

今回の研究会ではさらに、3次元ドップラーライダーで観測した日の出前後の霧の水平構造の変化、すなわち、低速ストリークからロール状構造に変化するにつれて霧が消滅する過程も紹介した。さらに、下層雲が消滅していく過程でドップラーライダーの一定仰角の全方位観測(PPI)画像上に出現した穴と薄い高層雲内にまま見られる蜂の巣状や穴構造(例えば菊地・山田(2013)のp.124の下の写真)との類似性を示し、安定成層が破壊される初期に発生するトップダウンディフュージョンである可能性を指摘した。雪面の方がその下の雪よりも重くなる融雪時に雪面にできる「雪えくぼ」という小さい凹凸も類似の現象と思われる(納口1984)。

このように、霧は地面付近の現象ではあるが、対流圏でも対流域以外に普遍的(ユビキタス)に存在する

* Mayumi YOSHIOKA, 東北大学大学院理学研究科
大気海洋変動観測研究センター、

yoshioka@caos-a.geophys.tohoku.ac.jp

© 2014 日本気象学会

成層・多層構造の解明（気層学）の一環としての観測が重要であることを指摘して講演を終えた。

3. 陸上のヤマセの観測

児玉安正（弘前大学大学院理工学研究科）

ヤマセは東北地方で夏季に観測される冷涼で高湿な背の低い偏東風である。ヤマセは、人命を損ねるようなことはないが、長く続く低温寡照による稲の生育障害や、高湿によるいもち病害など稲作に深刻な冷害をもたらす。ヤマセの霧による飛行機の欠航も生じているが、一方、風力発電が盛んな青森県では、ヤマセは夏季の貴重な風力資源でもあり、地域に大きな影響を与えている。ヤマセは、海洋性大気混合層の性質を有し、上端に下層雲と強い逆転層を伴うので、大気境界層内の物質の雲粒への取り込みや輸送・拡散にも影響を与える。このような背景から、きめ細かいヤマセ予報への需要が生まれつつある。ヤマセは背の低い、大気境界層の現象であるため、地表面条件や細かな起伏、沿岸水温などの影響を受けることが予想される。きめ細かいヤマセ予報を実現するには、陸上のヤマセについて詳細に観測し実態を把握することが必要である。

そこで、我々は、京都大学生存圏研究所の津田・橋口研究室と気象研究所の瀬古 弘博士と共同で、青森県において、ゾンデやウインドプロファイラー（WP：Wind Profiler）、ソーダーによる大気境界層に重点をおいたヤマセ観測、気象庁非静力メソモデルを用いた再現実験を行っている。2009年夏には、日本海に近い津軽半島の五所川原市金木で高層観測を行い、陸奥湾を通過して日本海側に吹き抜けるヤマセの観測と、気象庁メソモデルでの再現に成功した。この事例では、標高数百mの津軽山地を越えたヤマセが、おろし風となって、下流側で強風域を作っていることが見いだされた（児玉ほか 2013）。ヤマセが上端に安定層を伴うことから、安定層の高さが山脈より少し高い場合には、おろし風が発生しうる。おろし風の発生は従来のヤマセ研究では注目されなかった新しい知見で、風力発電にも影響すると考えられる。

2011年からは、観測サイトを六ヶ所村に移し、WPなどの測器を導入した。六ヶ所村は、下北半島の付け根に当たり、南と北の山地に挟まれた鞍部地形であるため、太平洋から陸奥湾に抜けるヤマセの通り道となり、陸上でヤマセの観測に適する。2013年まで3シーズンの観測を行い、各シーズンともヤマセを捉え

ることができた。3シーズン共通して、最下層（地表から高度数百mから1500mのヤマセ層）、その上の湿度がやや高い第2層、その上の乾燥した第3層からなる三層構造が見られ、各層間は安定層で区切られていた。三層構造の成因を探るため、後方流跡線解析を行った。その結果、各層で起源が異なり、第2層の高度では風速が弱く、吹走距離も短いことがわかった。観測ではヤマセの風速の日変化やその鉛直構造についての知見も得られた。今後も観測を継続して陸上のヤマセの知見を集め、ヤマセのきめ細かい予報の実現につなげていきたい。

4. 航空機観測による下層雲のエアロゾル-雲相互作用研究

小池 真（東京大学大学院理学系研究科）

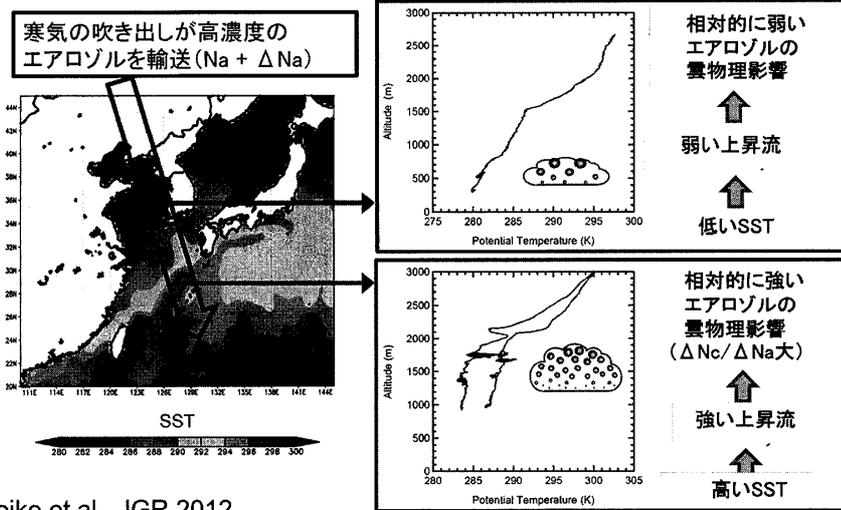
気候変動に関する政府間パネルの第5次報告書（IPCC AR5）では、エアロゾルと雲の相互作用による有効放射強制力の不確定性の大きさは、6年前の第4次報告書と同程度であり、その低減の困難さを示している。東アジアは世界的に見ても特にエアロゾル濃度が高い領域であるが、エアロゾル-雲相互作用の観測研究は東太平洋などに比べて限られている。我々は西太平洋の下層雲を対象とした航空機からの直接観測により、エアロゾル-雲相互作用を調べている。

2009年の春季東シナ海の非降水性層積雲について、航空機から直接観測した雲底下のエアロゾル数濃度と雲底に近い高度での雲粒数濃度を比較したところ、正の相関が見られた。この結果は東シナ海の雲物理量がエアロゾルの影響を受けていることを明確に示すものである。

より詳細に見てみると、エアロゾル数濃度が同程度でも雲粒数濃度が2倍程度変化していることがわかった。そこで同じエアロゾル数濃度に対する雲粒数濃度の増大割合を調べたところ、950 hPaの気温（T950）と海表面温度（SST）との差（SST-T950）と正の相関を持つことが分かった。すなわち大気最下層の鉛直安定度の指標であるSST-T950が大きく鉛直安定度が弱いほど、同じエアロゾル数濃度に対して雲粒数濃度が高いことが明らかとなった。これはSST-T950が大きくなると、SSTの大気の加熱によって生じる対流において上昇流速が大きくなり、その中で過飽和度が高まり、より活性化されにくい（一般的により小さな）エアロゾルまで雲粒へと活性化されたためと考えられる。

冬季から早春期において発生

SSTにより $\Delta N_c/\Delta N_a$ が1.6倍に増大



Koike et al., JGR 2012

第1図 航空機観測から明らかとなった、大陸からの寒気の吹き出しに伴う雲粒数濃度の増大メカニズム (Koike et al. 2012).

SST-T950が大きいデータは SST の高い黒潮領域で観測されていた一方、SST-T950が小さいデータは SST の低い黄海上で観測されていた。航空機観測が実施された春季の黄海・東シナ海には、大陸からの寒気移流がたびたびおこる。この結果、SST の高い黒潮上においては特に SST-T950が大きくなる。この寒気移流をとまなう北西季節風は同時に大陸から高濃度の人為起源エアロゾルを輸送する。この結果、エアロゾル濃度と SST-T950の両方の増大の効果により、雲粒数濃度が増大する可能性が示唆された (第1図)。SST-T950が大きな黒潮上では雲頂高度も高い一方、低い黄海では雲頂高度が低く霧状となっていた。本研究の結果は、下層大気鉛直安定度の指標 SST-T950により雲のマクロな様相 (雲頂高度、層厚、鉛直積算雲水量) とミクロな雲物理量 (雲粒数濃度) の両方に影響している可能性を初めて示したものである (Koike et al. 2012)。

5. 降水の統計と長期変動

—弱い降水を中心として—

藤部文昭 (気象研究所)

弱い降水の統計に関わるいくつかのトピックを紹介した。

弱い降水は、頻度の点では降水の統計に大きく寄与する。例えば、東京ではわずかでも降水が観測された日数が年間の半分強、1 mm 以上の降水が観測された

日数 (以下 x mm 以上降水が観測された日数を「 $\geq x$ mm 日数」とする) は 3 割弱を占める。一方、降水量 1 mm 未満の日の降水が年間の降水量に与える寄与は 1% に過ぎない。このように、降水全体に対する弱い降水の量的な寄与は小さい。

極端な降水の尺度として、パーセンタイル値が使われることがある。例えば 95パーセンタイル値とは、上位 5% に当たる値を指す。しかし、何の上位 5% なのか問題であり、無降水時を含むすべての場合の上位 5% と、 ≥ 1 mm の場合の上位 5% とでは値が異なる。パーセンタイル値を使うときは、その

定義を明示する必要がある。

時刻別のデータを使って、わずかでも降水があった回数を統計すると、冬季、近畿地方から瀬戸内東部にかけての地域では午後の前半に明瞭な極大 (日平均値の 30~40% 増) が認められる。この極大は、昼間の不安定成層に伴う弱い対流性降水の発生 (しぐれ) に対応すると考えられるが、近畿~瀬戸内東部で顕著に現れる理由は分からない。

日本では長期的に見て強い降水が増える傾向にあるが、弱い降水は減っており、1901年以降の ≥ 10 mm 日数や ≥ 1 mm 日数には有意な減少が認められる。21世紀末にかけての地球温暖化予測 (気象庁「地球温暖化予測情報第8巻」) によると、将来にかけても同様の傾向が進む可能性がある。

降水のデータを扱うに当たっては、測器や観測方法の変更の影響に留意する必要がある。日本では、1960年代前半までは 0.1 mm 単位の観測が行われていたが、その後は転倒ます雨量計による自動観測が導入され、観測単位が 0.5 mm になった。転倒ます雨量計は、降水量の積算値が 0.5 mm の整数倍になるごとに降水を検知するが、端数に相当する降水はまずに未検知のまま残るため、時間がたつと蒸発して失われる可能性がある。そのため、蒸発損失の評価のしかた次第で弱い降水の長期変化率の値は異なる。ただし、蒸発損失を考えても考えなくても、弱い降水が長期的に減少しているという結論は変わらない。

このほか、雨量計による降水の捕捉率がその機種によって異なる可能性を示した文献もある。過去のデータが有効に利用されるよう、観測手法に関する情報すなわちメタデータの整備・共有を進めることが望まれる。

7. 下層雲の形成・維持・消滅過程における放射の役割

早坂忠裕（東北大学大学院理学研究科
大気海洋変動観測研究センター）

下層雲の形成・維持・消滅過程における短波放射と長波放射の役割を解説した。まず初めに雲の放射特性の基本的な特徴を解説した。長波放射の射出率は鉛直積算雲水量の増加に伴いすぐに1に近い値となり、黒体のようなものになる。一方、短波放射特性も鉛直積算雲水量が無限に大きくなれば反射率、透過率、吸収率はある一定の値になるが、その変化は長波放射の場合と比べてかなり緩やかである。このようなことを念頭に、海上の下層雲を例に詳しい検討を行なった。

一般に下層雲の形成過程は大きく二つに分けられる。一つは、放射冷却や大気の流れ等により冷たい海面（地表面）に接する大気が冷やされて霧が発生し、雲になるものである。もう一つは、カリフォルニア沖の雲に代表されるように、暖かい海面の上に冷たい大気が存在することによって対流不安定が生じ、混合層の上端に雲頂を持つ層積雲が形成されるものである。いずれの場合も雲粒が発生すると雲頂から長波放射が射出され、雲頂付近は冷却されることになる。そのため不安定度が増加し雲が発達する。このようなメカニズムで形成された雲に太陽放射（短波放射）が入射すると放射の吸収により雲頂よりも少し下層が加熱される。その結果、長波放射による冷却効果が弱められ、雲は消滅する傾向に変化する。

下層雲の雲頂および雲内における放射の冷却と加熱の重要性は、海面からの顕熱・潜熱フラックスの大きさにも関係する。上層雲が下層雲を覆うと雲頂における放射冷却が弱められ、海面からの熱フラックスが小さい場合にはその効果が重要になる。一方、海面からの熱フラックスが大きいと雲頂の放射冷却が弱くなっても対流不安定の構造が維持される。このような事例について、衛星搭載のレーダー（CloudSat）とライダー（CALIPSO）のデータ解析結果を示した。それによると、下層雲のみが存在する場合に比べて、上層雲が存在する場合には下層雲の幾何学的厚さが大きくなる。

その傾向は、海面からの熱フラックスが小さい場合に顕著である。

最後に、雲粒粒径分布に及ぼす放射冷却の影響について述べた。雲頂が長波放射によって冷却されるということは、ミクロに見れば雲粒から長波放射が射出され冷却されるということである。その結果、雲粒の表面では相対的に水蒸気の過飽和状態が生じ、雲粒が成長する。成長した雲粒の落下に伴って衝突併合が生じ、最終的には幅広い粒径範囲を持つ粒径分布になる。

以上のように、下層雲の形成、維持、消滅過程において放射過程が重要な役割を果たしている。今回の研究会では基本的なことを中心に述べたが、現実には雲の不均質性と放射特性の関係、下層雲の上の大気層の湿度や風のシアーなど、考慮すべき要素はほかにもある。また、気象予報や気候変動の予測に資するためには、より定量的な理解が重要である。

8. 総合討論

総合討論では、5件の講演で紹介された内容から、コンピーナーが以下のようにまとめ、会場からの意見を求めて討論を進めた。

- ①雲と雲粒の動態をとらえる
- ②雲粒の大きさ、核(エアロゾル)
- ③分布・構成
- ④変動(動態)
- ⑤観測手法、複数の手法の組み合わせ
- ⑥観測頻度
- ⑦時間・空間解像度
- ⑧雲の影響、降水量としての弱い雨
- ⑨現象としての面白さ、重要性
- ⑩災害としての重要性
- ⑪長期変動を考えるうえで
- ⑫現状把握から量的予測へ
- ⑬そのために必要な観測、必要な情報
- ⑭データについて
- ⑮データの発掘、データセット化(メタデータ)、共有、データの保存

これらの項目の中で、③、④、⑤の項目を中心に議論を行った。

今回の開催が東北地方ということもあってか、ヤマセの話題についての質問と議論が続いた。児玉氏による前出の記述にあるように、ヤマセは広くくりで呼ばれる現象であり、年ごとに異なる。ヤマセの発生が

農作物被害にもつながるという点から、ヤマセの影響評価のために気温、風速・風向、雲量など定量的な表現を用いてヤマセの強さを表す尺度が決められないかという点で活発な議論となった。強さを表す尺度として用いる物理量についての議論のほか、ヤマセ観測時の診断的パラメタ、時間変化を評価するうえでの予測的パラメタに分けて考える必要があるという意見、またヤマセ時に海上で発生する低層雲が陸上に移動して与える影響を考えるため、海上からの低層雲の移動についても表現する要素が必要という意見が出た。

今後、ヤマセの強さについての尺度を確立し、天気予報で伝えることができないう意見も出た。東北大学の岩崎氏を中心に行われているヤマセのダウンスケージングを用いた数値シミュレーションによる再現も含む知見から、ヤマセの有無自体はオホーツク海高気圧の予報で可能だが、強弱の評価までには至らず、もう少し細かいプロセスが効くこと、ヤマセの下層雲が力学的不安定により形成されているが非静力学雲解像モデルを用い再現実験でも数百 m 解像度にしないうまく出ないこと等が報告された。

ヤマセによる農業被害については、ヤマセによる稲の被害原因として説明に用いられる低温や日射量の減少が、それらの起こる時期と稲の成長段階に関係して被害規模が異なり（開花時期の低温、光合成活動度と日射量）、稲の品種によっても異なるという点が指摘された。また、近年の稲の品種改良についても農業気象に詳しい関係者からの解説があった。

雲の三次元的な構造や粒子の分布を把握するために必要な観測についての意見があり、観測の現状報告がなされた。ヤマセ時に霧も伴うことがあることから、霧の上の観測情報もほしいという意見が出た。ドップラーライダーで clean すぎると薄い雲が映らないことがあること、衛星による立体的な雲粒子の分布をとらえるセンサーの現状と用いた解析についての報告があった。

データについての活発な議論も行われた。地方観測所等でこつこつ観測が続けられてきた長期的なデータで、死蔵されているもの、担当者がいなくなると引き継がれず失われてしまうものが存在し、藤部氏の講演で紹介されたような長期的な変動を考察する上での貴重なデータがあると指摘があった。これらのデータは手書きの野帳のようなものも含め、形式がまちまちで電子化されていないものも多く、こうしたデータの発掘や保存を行い、今後の解析に生かすべきという議論が

行われた。また、長期的な観測では、測器の変更に伴い精度が異なるため、測器情報や誤差情報を含めることなどのメタデータをデータセット化する際にどう考慮し扱うかについても意見が出た。データセット化、共有、保存、処理などについては、メソ気象の分野にかかわらず気象関係者共通の問題であることから議論が白熱した。

現象のある一側面のみを目的のために記録されたデータであっても、長期的に蓄積されたデータは他の側面で活用できる可能性、いわゆる近年話題のビッグデータという観点でも重要であるという指摘があった。この観点では、気象モデルによる計算結果も、衛星による観測データも、担当者および関係者のみのこれまでの関心とは別の側面で活用できる可能性として共通であるという意見が出た。その上で、大量のデータをどう扱うかについては、すでにこの問題に直面している大規模計算機を扱う立場、衛星観測データを扱う立場（ひまわり 8 号では数 TB/日のデータ量となる）からの意見と現状、現在の対応が報告された。

また今回、研究会会場となった会議室前と研究会の休憩時間に、気象衛星センターのご協力により、ひまわり高頻度観測（ラピッドスキャン）事例の紹介として、5分毎の画像の動画を上映いただいた。動画として紹介いただいた内容には、従来メソ研究会で取り上げられてきた台風や竜巻、豪雨といった激しい気象現象が観測された事例の領域および期間に加え、今回の研究会の趣旨を汲んで、東北地方の下層雲についても盛り込んでいただいた。これらの映像も、今回のメソ研究会に提供された話題のひとつとして貢献していただいたと思う。コンピーナーの要望を取り上げていただいたことに、この場で感謝を述べたい。

研究会終了時には、対象とした現象と講演テーマが多く専門分野の方が広く興味をもつ話題であったことが盛会につながったという感想をいただいた。これまでメソ気象研究会へ参加されてこなかった専門分野の小池氏（東京大学）や早坂氏（東北大学）を講師にお招きして話題提供していただいた結果、これまでメソ気象研究会にあまり参加されていない専門分野の方も参加していただき、分野間での交流の機会にもなったのではないかと考える。多くの参加者と、研究会中に交わされた意見が、今後のメソ気象学の発展につながれば、今回の企画を担当させていただいたコンピーナーとして本望である。

謝 辞

今回のメソ気象研究会を開催するに当たり、世話人の加藤輝之氏（気象研究所）には多大なご助力をいただきました。また、会場の準備・運営をしていただいた気象研究所の有志の方々ならびに筑波大学連携大学院（気象研究所）の学生の皆さまに感謝します。本報告を作成するにあたり、総合討論の内容の加筆修正にご協力いただきました参加者の皆様にも感謝いたします。

参 考 文 献

菊地勝弘, 山田圭一, 2013: 雲の博物館. 成山堂書店,

139pp.

児玉安正ほか, 2013: 青森県津軽平野で行われた冬季季節風とヤマセの高層気象観測, および気象庁非静力学モデルを用いたダウンスケール再現実験. 天気, 60, 5-14.

Koike, M., N. Takegawa, N. Moteki, Y. Kondo, H. Nakamura, K. Kita, H. Matsui, N. Oshima, M. Kajino and T. Y. Nakajima, 2012: Measurements of regional-scale aerosol impacts on cloud microphysics over the East China Sea: Possible influences of warm sea surface temperature over the Kuroshio ocean current. J. Geophys. Res., 117, doi:10.1029/2011JD017324.

納口恭明, 1984: 雪えくぼのパターン形成II. 国立防災科学技術センター研究報告, 33, 255-276.