

第6回メソ気象セミナー開催報告

メソ気象セミナー事務局

(末木健太^{*1}・横田祥^{*2}・栃本英伍^{*3}・
加藤亮平^{*4}・吉住蓉子^{*5}・鵜沼昂^{*6}・
渡邊俊一^{*7}・下瀬健一^{*8}・春日悟^{*9})

1. はじめに

メソ気象セミナーは「メソスケール気象学 (メソ気象) 研究のこれまで・今・これから」をコンセプトとしてセミナー形式で議論を行い、メソ気象研究への理解を深めることを目的とした集いである。具体的には、数多くの観測的・数值的・理論的な研究により明らかにされてきたメソ気象について、

- ・これまでどこまで理解されているのか
- ・現在はどうのような研究が行われているのか
- ・さらに今後どうのような研究を行っていくべきか

について議論を行う。当セミナーは、メソ気象研究連絡会の傘下で活動している。活動内容は Web ページ (<http://meso.sakura.ne.jp/mesosemi/> 2019.10.29閲覧) または開催報告書 (下瀬ほか 2014, 2016; 栃本ほか 2016; 渡邊ほか 2017; 鵜沼ほか 2018) を参照されたい。

^{*1} (連絡責任者) Kenta SUEKI, 理化学研究所計算科学研究センター。

kenta.sueki@riken.jp

^{*2} Sho YOKOTA, 気象庁予報部。

^{*3} Eigo TOCHIMOTO, 東京大学大気海洋研究所。

^{*4} Ryohei KATO, 防災科学技術研究所。

^{*5} Youko YOSHIZUMI, 名古屋大学宇宙地球環境研究所。

^{*6} Takashi UNUMA, 気象庁観測部。

^{*7} Shun-ichi WATANABE, 気象業務支援センター。

^{*8} Ken-ichi SHIMOSE, 防災科学技術研究所。

^{*9} Satoru KASUGA, 新潟大学大学院自然科学研究科。

© 2020 日本気象学会

第6回目である今回は、メソ気象モデルで用いられる代表的な境界層乱流モデルの1つである「Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN) モデル」(Nakanishi and Niino 2004, 2006, 2009) をテーマとして取り上げた。MYNN モデルの開発者である日本気象協会の中西幹郎氏、東京大学大気海洋研究所名誉教授の新野宏氏をお招きし、2019年7月14~15日に伊勢市の「神宮会館」で開催した。参加者数は34名であり、参加者の所属は研究機関・大学・企業・気象庁など多岐に渡っていた (第1図)。今回のセミナーの内容は、以下の通りである。

- ・新野氏による基調講演
- ・中西氏による基調講演
- ・参加者によるポスターセッション
- ・総合討論

新野氏による基調講演では、大気境界層の基礎について、支配方程式の導出に始まる詳細な解説がなされた。中西氏による基調講演では、MYNN モデルの定式化の工夫や、MYNN モデルによる計算結果と観測・Large Eddy Simulation (LES) との比較が示された。総合討論では、MYNN モデルの簡略化のレベルに応じた特性や、MYNN モデルを大気モデルに実装する際の工夫、MYNN モデルのさらなる改良の可能性などについて議論が交わされた。次節以降、セミナー内容の詳細を報告する。

2. 新野氏による基調講演

2.1 境界層の基礎

最初に流体力学の基礎方程式に基づき、長さ L の平

板上で生じる密度一様の流れの境界層の定式化がなされた。境界層の主流方向の運動方程式では移流項と粘性項がほぼ釣り合っており、レイノルズ数が1より十分大きい時、境界層の厚さは平板の長さ L に比べて十分薄くなる。スケールアナリシスを用いると、Prandtlが1904年に初めて導いた境界層の支配方程式が得られる(Prandtl 1905 参照)。Blasius (1908) はこの支配方程式を基に平板上の速度分布の相似解を求めた。境界層の流れは厳密には平行流ではないが、平行流を仮定してBlasiusの解を基本場とした場合の線形安定性を調べることができる。Blasiusの解は変曲点を持たないが、Tollmien (1929) や Schlichting (1933) は粘性流においては不安定となりうることを示し、不安定波の波数とレイノルズ数との関係を求めた(Tollmien-Schlichting 波)。実際、室内実験では境界層流においてレイノルズ数が大きくなると、層流から乱流へと遷移することが明らかにされている。また、乱流境界層の構造を速度欠損則と壁法則を用いて、壁付近の速度の解と境界層内部の解が漸近的に接続されることを仮定すると、接地境界層においては対数速度分布が存在することが示される。

2.2 乱流の支配方程式

続いて、乱流の支配方程式の導出と紹介が行われた。ブシネスク近似下における運動方程式、熱力学方

程式、連続の式を基本方程式とし、各変数をアンサンブル平均と平均からのずれ(乱流変動)に分けてアンサンブル平均に対する方程式を求めると、アンサンブル平均の時間変化を知るためには、乱流量の2次のモーメントを求めなければならないことがわかる。さらに、2次のモーメントに関する方程式を導出すると、3次のモーメントを知る必要が生じる。これは乱流のクロージャー問題と呼ばれ、高次のモーメントを何らかの方法でパラメタライズする必要がある。圧力と速度の相関項や粘性散逸項もパラメタライズが必要である。

2.3 大気境界層

乱流のクロージャーモデルの議論に入る前に、大気境界層の基礎についてのレビューがなされた。まず、エクマン境界層の不安定性を調べる室内実験では、メカニズムの異なる2種類の波が生じることが紹介された(例えばFaller 1963)。日変化する大気境界層の話では、日中の対流混合層の上端において安定層にオーバーシュートしたブルームが自由大気の空気を取り込むことで熱フラックスが負になることや、対流混合層上部では成層が弱い安定であるにも関わらず、熱が上向きに輸送される「逆向き勾配輸送」が存在することが紹介された。逆勾配輸送については、航空機観測によっても確かめられている(Telford and Warner



第1図 セミナー参加者との集合写真。

1964). 夜間の大気境界層では、間欠的な乱流や波動、重力流などの存在が知られており、未だ理解が十分でないことが述べられた。

一方、接地境界層の話では、浮力生成効果とシア生成項が等しくなる高度、モニン・オブコフ長やモニン・オブコフの相似則が紹介され、モニン・オブコフの相似則がよく成り立っている例として米国カンザス州で行われた野外実験結果が示された (Haugen *et al.* 1971). 相似則のもと経験的に得られた風速や温度などの無次元鉛直勾配と無次元高度の関係から、バルク法による地表面フラックスの診断式が導かれる。

2.4 乱流のクロージャーモデル

最後に、乱流のクロージャーモデル、特に Mellor-Yamada モデル (Mellor and Yamada 1974, 1982) について、乱流輸送項、等方回帰項、粘性散逸項などの3次のモーメントをパラメタライズする際の工夫などが紹介された。2次の乱流量10個を全て予報式で解くレベル4、非等方性が小さいことを仮定し、乱流運動エネルギーと温位の分散に対する式以外を診断式で求めるレベル3モデル。さらに、乱流運動エネルギーのみを予報し、温位の分散に対する式も診断式で求めるレベル2.5が紹介された。

内容が濃く、盛り沢山であったため、特に最後の乱流クロージャーモデルの解説について十分な時間をとれなかったことが運営側としても心残りではあったが、全体を通じて境界層の基礎を学ぶことができ、貴重な時間となった。

3. 中西氏による基調講演

3.1 MYNN モデルの種々の工夫

3.1.1 境界層 (乱流輸送) モデルの概要

まず、基礎方程式系が平均流と乱流成分に分離され、平均流と乱流統計量の式の導出が行われた。次に、乱流クロージャーの種類について解説がなされた。 $n+1$ 次乱流統計量をパラメタライズし、 n 次乱流統計量の式まで解くものを n 次乱流クロージャーモデルという。1次の乱流クロージャーモデルは2次乱流統計量を分子粘性応力に依ってパラメタライズし平均流 (1次の統計量) の式だけを解くモデルで、LESでよく用いられる。2次の乱流クロージャーモデルは3次乱流統計量をパラメタライズし2次の乱流統計量までを解き、MYモデルやMYNNモデルで用いられている。2次乱流クロージャーモデルで最も重要な量は乱流運動エネルギー (Turbulent Kinetic Energy: TKE)

であり、それはシアと浮力により生成され、分子粘性により散逸することが説明された。

続いて、風速変動 (近似的には TKE) の周波数に対するスペクトル分布が示され、平均流と乱流の境界についての解説がなされた。乱流のスペクトル分布は、前述のシアや浮力によって生成される「乱流のエネルギー保有領域」(周期数10秒から数100秒)、乱流のエネルギーの生成・散逸がなく保有領域で生成されたエネルギーが大きなスケールから小さなスケールへ流れるだけの「慣性小領域」、分子粘性により乱流エネルギーが散逸し内部エネルギーへ変換される「エネルギー散逸領域」に分けられる。慣性小領域は等方性乱流の性質をもち、その性質はよく分かっているため、LESでは格子間隔を慣性小領域に入るように小さく取り、その格子間隔を挟んで大小の乱流間のエネルギー交換をパラメタライズし、エネルギー保有領域の大きな渦を直接計算する。一方、MYやMYNNではエネルギー保有領域の大きな渦 (周期のオーダー10分以下) も平均してパラメタライズすることが説明された。

3.1.2 MYNN モデルの工夫

まず、MYモデルとMYNNモデルの簡略化とレベルについての説明がなされた。これらのモデルでは、2次乱流統計量の式のコリオリの項を無視し、境界層近似 (平均流に対する静水圧近似と乱流統計量の水平勾配を鉛直勾配に比して無視する近似) を行う。ここで、これ以外に近似のない2次乱流クロージャーモデルをレベル4と命名し、乱流の等方性が増すとともに段階的に予報式を診断式に簡略化していくモデルにレベル3以下の名称をつけた。具体的には、TKEと温位の分散以外は診断式で解くモデルをレベル3、TKE以外は診断式で解くモデルをレベル2.5、全て診断式で解くモデルをレベル2とした。レベル3以下の最大の特徴は、2次乱流クロージャーモデルであるにもかかわらず、1次乱流クロージャーモデルと同様に、乱流統計量が渦粘性係数と勾配の積の形に帰着することであることが強調された。

次に、MYNNモデルにおけるパラメタライズの工夫について解説がなされた。2次の乱流クロージャーモデルであるMYNNモデルは2次の統計量を解く。その2次の統計量である風速の分散の式でパラメタライズすべき3次の統計量の項は、散逸項、圧力-速度相関の項、乱流輸送項の3つである。1つ目の散逸項は次元解析的にTKEと乱流の長さスケールでパラメタライズされる。2つ目の圧力-速度相関の項はパラ

メタライズの良し悪しが顕著に現れる重要な項であり、圧力輸送項とエネルギー再分配項（等方回帰項）に分けられる。圧力輸送項は乱流輸送項と合わせて扱われる。エネルギー再分配項は等方化の働き、シアの効果、及び浮力の効果に分けられる。MYモデルでは中立成層のみを扱ったため浮力の効果は考慮されていなかったが、MYNNモデルでは浮力の効果が考慮される。3つ目の乱流輸送項は、勾配拡散近似で与えているが、後述するように課題がないとは言えない。乱流長さスケールについては、3つの長さスケール（接地層 L_s 、大気境界層 L_T 、安定層 L_B ）のうち最小のスケールを超えない診断式が採用された。この中で、 L_s と L_B に安定度の効果を組み込んだことがMYNNモデルの特色の1つである。

これらのパラメタライズに伴って現れるクロージャー定数と乱流長さスケールの係数は、6種類の成層に対してLESで計算されたLESデータベース(Nakanishi 2001)を用いて決定される。また、MYNNモデルのレベル3はレベル2.5とそれからの差に分離することにより、計算の簡易性と安定性を高める工夫がなされている。MYNNモデルの工夫は以下のようにまとめられる(中西・新野 2010)。

- (1) エネルギー再分配項のパラメタライゼーションに浮力の効果を考慮
- (2) 乱流の長さスケールの診断式に安定度の効果を考慮
- (3) 未知のモデル定数の決定に密度成層の効果を考慮したLESデータベースを利用
- (4) レベル3をレベル2.5とそれからの差に分離し、計算の簡易性と数値安定性を高める計算スキームを考案

3.1.3 MYNNモデルの計算例

まず、ワンガラ実験(Clarke *et al.* 1971)で得られた境界層の観測データを基に、昼間の対流混合層に対して、鉛直1次元モデルによる計算結果とLESによる計算結果が比較された(Nakanishi and Niino 2009)。MYNNのレベル3で再現された境界層の温位の鉛直構造はLESのそれとよく一致するのに対し、MYのレベル3では境界層の発達が遅いことが指摘された。また、MYNNのレベル2.5では逆勾配拡散が考慮できないため、境界層上部も温位の鉛直勾配が負の部分が出現してしまうことが示された。次に、放射過程を考慮した夜間の計算(ワンガラ実験)において、MYNNのレベル2.5でも慣性振動で現れた下層ジェットをよく

再現していたことが示された。さらに、気象庁メソスケールモデルにMYNNレベル3を導入することで、2004年の新潟・福島豪雨で発生した線状の降水分布の再現性が向上したことが示された(Hara 2007)。最後に、全球気候モデル(MIROC)においてMYのレベル2.5からMYNNのレベル2.5に変更することで、赤道上空の特に850hPaでみられる年平均比湿の乾燥バイアスが改善された結果(千喜良・望月 2007)が紹介された。この乾燥バイアスの改善は、MYNNモデルの導入によって境界層の成長が現実的になり、下層の水蒸気がより高く輸送されたためであるとの推測が述べられた。

3.1.4 MYNNモデルの課題

最後に、MYNNモデルの課題について指摘がなされた。アンサンブル平均に基づく乱流モデルの永遠の課題であろう乱流長さスケールに関して、実験式の L_B の部分を改良する方法と、診断式ではなく予報式を用いる方法(中西 2016)が紹介された。ただし、それぞれの手法には問題があることを他の研究者から個人的に指摘されているため、さらに良い方法を模索する必要があると述べられた。また、TKEの乱流輸送に関して新たな定式化(中西 2016の(9)式)が提示され、不安定成層における境界層の再現性がよくなる可能性があることが示唆された。

3.2 LESで見る大気境界層

続いて、LESの概要とLESを用いて得られた大気境界層中の様々な現象の解析結果が示された。

3.2.1 LESの概要

LESでは、慣性小領域に入るサイズの小さな格子間隔を用いて、格子間隔以下の渦についてはパラメタライズし、格子間隔以上の渦は直接計算する。そのため、MYNNではパラメタライズされていたエネルギー保有領域の渦は直接計算される。パラメタライズには1次の乱流クロージャーモデルであるスマゴリンスキーモデルが用いられる。スマゴリンスキーモデルでは、乱流運動エネルギーの式で局所平衡(生成項=散逸項)を仮定して渦粘性係数を得る。アンサンブル平均乱流モデルでは課題となる乱流長さスケールは格子間隔で決まる。

3.2.2 LESで見る大気境界層

あらためて、ワンガラ実験(Clarke *et al.* 1971)の観測データをもとに、昼間の対流混合層のLESによる再現結果が示された。対流混合層内にはセル状の上昇流域が存在し、特にセルとセルの交点でブルーム状の

大きな上昇流が見られる。このような上昇流により、水蒸気や熱が上方へ輸送される。続いて、夜間も含めた大気境界層の日変化の再現結果が示された。昼間については、大規模下降流をLESに与えることで、より観測に近い対流混合層の発達が再現された。夜間についても、地表付近の安定層や慣性振動に伴う下層ジェットが再現された。また、夜間に暖気移流に伴う不安定化によってロール状対流が発生し、これによりTKEが生成される様子も見られた。

続いて、台風境界層中に見られるロール状構造についての解析結果が示された。LESにより、台風中心からの距離によって異なる走向を持つロール状構造が再現された。先行する観測的研究(Wurman and Winslow 1998)では、鉛直シア流中の熱対流やヘアピン渦などが原因であると推測されていたが、LESの結果の解析により、水平平均風の鉛直プロファイルに変曲点が存在することによる力学的不安定が原因であることが明らかにされた。また、LESによるケルビン・ヘルムホルツ波の計算結果も紹介された。

3.2.3 MYNNモデルの改善に向けた比較

再び、ワンガラ実験のプロファイルについて、LESとMYNNモデルの比較がなされた。MYNNモデルは観測やLESの計算結果をかなりの精度で再現できるものの、夜間の安定層の成長がやや遅いという特徴が示された。また、MYNNモデルの改善に向け、多くの事例を再現したLESを参照し、より詳細な比較が必要

という見解が示された。

4. ポスターセッション

ポスターセッションでは、13件の発表があった(第1表)。数値モデル開発としては、有限体積モデルでの地表面フラックススキームの開発や海洋表層混合層での圧力-歪み速度相関のパラメタリゼーションの開発、さらには大気海洋結合した地域気候モデルの開発に関する発表があった。また、Kaバンド帯の雲レーダーを数値モデルに同化することで局地的大雨の予測を試みる研究や、解析雨量を用いた線状降水帯事例の新しい検出手法の提案に関する発表があった。応用研究としては、東シナ海の温暖化が平成29年九州北部豪雨に及ぼすインパクトを調べた研究や、平成30年7月豪雨のアンサンブル特異値分解解析による原因の分離方法の提案、領域モデル内での対流雲の再現性に関する数値的収束やメソ対流系のカオスの起源についての発表があった。雲・降水に関する発表のみならず、日本海側での局地的降雪分布と大規模気象場との関係を調べた研究や、熱帯海洋上の地上気温太陰潮汐の検出とその誤差幅の推定方法の提案、都市の温暖化と人間活動の相互作用、そしてMYNNモデルのグレーゾーンへの適用結果といった多種多様な内容で、充実したポスターセッションとなった。

第1表 ポスター発表者の氏名・所属・発表タイトル。

氏名	所属	ポスター発表タイトル
末木健太	理化学研究所 計算科学研究センター	大気モデルにおける組織化した対流雲の数値的収束
渡邊俊一	気象業務支援センター	大気海洋結合地域気候モデル
西澤誠也	理化学研究所 計算科学研究センター	有限体積モデルにおける地表面フラックススキーム
万田敦昌	三重大学生物資源学部	東シナ海の温暖化が平成29年九州北部豪雨に及ぼす影響
高根雄也	産業技術総合研究所	都市の温暖化と人間活動の相互作用
加藤亮平	防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門	雲レーダー同化による局地的大雨予測の試み
坂崎貴俊	京都大学	熱帯海洋上の地上気温太陰潮汐の検出～大気-海洋間の熱交換の推定～
山崎 哲	海洋研究開発機構	日本海側での局所降雪分布と偏西風ジェットの変動及びブロッキングとの関係
廣川康隆	気象研究所 台風・災害気象研究部	解析雨量を用いた、線状降水帯事例の客観的な検出
牛島悠介	京都大学 理学研究科 海洋物理学講座	海洋表層混合層での圧力-歪み速度相関のパラメタリゼーションの検証
横田 祥	気象庁 予報部 数値予報課	平成30年7月豪雨のアンサンブル特異値分解解析
川畑拓矢	気象庁 気象研究所 気象観測研究部	MCSにおけるカオスの起源を探る
伊藤純至	東京大学 大気海洋研究所	MYNNモデルのグレーゾーンへの適用

5. 総合討論

新野氏、中西氏の講演を踏まえ、MYNN モデルに関して、次の4つの観点から議論が行われた。

- (1) MYNN モデルのレベル
- (2) MYNN モデルを用いる際の問題点
- (3) MYNN モデルを実装する際の問題点とその解決策に関する情報共有
- (4) MYNN モデルを含む境界層スキームの今後の開発・改良の展望

はじめに、MYNN モデルにおいて利用が推奨されるレベルに関して議論が交わされた。基調講演でもあったように、MYNN モデルで用いられる2次乱流クロージャーにおいてはTKEが非常に重要である。しかし、レベル2ではTKEは予報されず、TKEを予報しているのはレベル2.5以上である。また、レベル2では乱流量の水平移流が考慮されていない。以上のことから、レベル2.5以上の利用が推奨される。一方で、数値シミュレーションでは計算の安定性も求められる。レベル2.5ではほぼ計算不安定が起らないが、レベル3では計算不安定がしばしば顕在化するという問題があるため、レベル2.5が広く用いられている。気象庁が現業で用いているメソモデルではレベル3が利用されているが、数値不安定が起らないように連立方程式を陰に解くなどの工夫がされている。

次に、MYNN モデルを利用する際の問題点がいくつかあげられた。気象庁の現業モデルでは、しばしば冬季の陸上大気下層が過剰に冷えることがある。その原因の1つとして、各物理過程の時間変化から境界層過程が冷却に最も大きく寄与していることが明らかとなり、境界層スキームの改善の余地があることが示唆された。また、積乱雲が多く発生している環境において、大気境界層の長さスケールが大きくなる問題に関して、MYNN モデルの利用がどのように影響しているかという疑問があげられた。中空でケルビン・ヘルムホルツ不安定が起きた場合や、中空に対流層がある場合には長さスケールの設定が重要となる。米国海洋大気庁(National Oceanic and Atmospheric Administration: NOAA)による北米大陸の大気予報システムRapid Refresh (RAP: Benjamin *et al.* 2016)では、境界層スキームのオプションの1つにMYNN モデルを含むWeather Research and Forecasting (WRF) Model (Skamarock *et al.* 2008)を用いており、大気境界層上端以下はMYNN、それ以上の高度では別の乱流スキームを用いることで対処されている。しか

し、積乱雲が発生する環境や境界層より上の高度において用いるスキームに関しては今後の課題として残されている。また、MYNN モデルにおいて、大気境界層を含め、鉛直方向での適切な長さスケールに関しては改良の余地がある。

さらに、MYNN モデルの実装における技術的な問題についても議論された。実際に実装に携わったモデル開発者より、実装の難易度にはレベル2.5とレベル3の間にはギャップがあることが報告された。理化学研究所で開発中の数値気象気候ライブラリScalable Computing for Advanced Library and Environment (SCALE; Nishizawa *et al.* 2015; Sato *et al.* 2015)や気象庁の現業モデル等を実装する際には様々な工夫が施されている。また、数値モデルを用いる研究者は多くいるが、各スキームの詳細を完全に理解しているユーザーはあまり多くないため、モデルのソースコード内で用いられている様々なパラメータを修正する際の許容範囲を知りたいという声もあった。開発者からパラメータの取り得る値に関する情報を共有されることにより、極端に外れたパラメータを用いるおそれなくなる可能性があるが、これらに関する情報共有をどのようにしていくかも今後の課題の1つである。現在は実装に関する情報等は中西氏にフィードバックされ、オフィシャルサイトにリファレンスコードが置かれている状況にあるが、新たに誰でも情報を提供できるようなサイトを設立することが提案された。

全球モデルなど細かい解像度にすることが難しいモデルにおいては、境界層スキームの改良は必要不可欠である。特に、乱流のスケールと格子解像度が同程度となる「グレーゾーン」における境界層モデルが開発されることが期待される。同時に、新たに開発・改良されたスキームやモデルは検証が必要不可欠である。例えば、気象庁の現業モデルで利用されるためには、当然予測精度がより高いものでなければならない。より精度の高いスキームを選択するため、複数のスキームのパフォーマンス比較が必要となる。現状ではスキームを開発した研究者が検証を行うが、比較を容易にするためには各研究機関、大学で同じ事例を扱うことが望ましい。そのために適切な事例を共有することが必要となる。また、スキームの開発・改良の検証には観測データも用いられる。鉛直プロファイルが得られるゾンデ等の観測がよく検証に用いられているが、レーダーのような3次元構造に関する観測データの境界層モデルの検証への活用も新たに提案された。

以上のように、MYNN モデルを含む境界層スキームに関して、モデルの開発、実装に携わる方々、モデルユーザー、観測を行っている方々により、様々な観点から活発な議論が行われた。精度の高い数値シミュレーションを行うためには、より良いスキームが必要となる。そのスキームの開発・改良に対して、各研究機関や大学間の積極的な情報共有や連携が必要不可欠であることが再確認された。

6. まとめ

メソ気象現象の理解を深め、研究者同士の交流を図る場を提供し続けてきた本セミナーも、今回で6回目となった。第5回まではメソ気象現象の解析・数値実験・観測技術などについて、比較的幅広い議論を行ってきたが、今回はより話題を絞り、大気境界層のモデリングについて深く議論することを試みた。前回までと比較するとやや専門性の高い話題をテーマとしたため、参加者が十分に集まるかどうか懸念されたが、当初の予想以上に多数の参加者が集まり、大変盛況のもとにセミナーを行うことができた。新野氏と中西氏は、大気境界層の基礎から MYNN モデルの詳細やその課題に至るまで非常に丁寧に説明されたため、大気境界層の初心者にも理解しやすかった。また、大気境界層やそのモデリングに詳しい研究者にとっても学ぶことの多いセミナーになったと思われる。テーマの性質上、その説明には数式が多用されたが、講演中に全ての数式を追うことが困難だったという参加者には、ぜひ講演資料をもとに自ら式変形を行い、理解を深めることをお勧めしたい。

今回のセミナーでは、分かりやすく密度の高い講演を行っていただいた新野氏と中西氏、議論を盛り上げていただいた参加者の皆様のおかげで、大気境界層のモデリングに対する理解を深めるとともに、今後の数値予報技術やメソ気象研究の発展に向けて有意義な議論を行うことができた。この場をお借りして深く御礼申し上げる。今後さらに有意義な議論を行うために、学生や現業機関の職員など、より幅広いバックグラウンドを持つ方に参加をご検討いただきたい。次回セミナーについては、後日ホームページへの掲載を予定している。今後もメソ気象の理解を深める場として、本セミナーを有効に活用していただければ幸いである。

謝辞

本セミナーの開催は、JSPS 科研費 JP18K04473の助

成を受けたものです。

参考文献

- Benjamin, S. G. *et al.*, 2016: A north American hourly assimilation and model forecast cycle: The Rapid Refresh. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 1669–1694.
- Blasius, H., 1908: Grenzsichten in Flüssigkeiten mit kleiner Reibung. *Z. Angew. Math. Phys.*, **56**, 1–37.
- 千喜良 稔, 望月 崇, 2007: MIROC3.2への改良型 Mellor-Yamada スキームの導入. 日本気象学会2007年度秋季大会講演予稿集, 札幌, A214.
- Clarke, R. H., A. J. Dyer, R. R. Brook, D. G. Reid and A. J. Troup, 1971: The Wangara Experiment: Boundary Layer Data. Technical Paper No. 19, Division of Meteorological Physics, CSIRO, Australia, 358pp.
- Faller, A. J., 1963: An experimental study of the instability of the laminar Ekman boundary layer. *J. Fluid Mech.*, **15**, 560–576.
- Hara, T., 2007: Update of the operational JMA meso-scale model and implementation of improved Mellor-Yamada level 3 scheme. Extended Abstracts, 22nd Conf. on Weather Analysis and Forecasting/18th Conf. on Numerical Weather Prediction, Utah, USA, J3.5.
- Haugen, D. A., J. C. Kaimal and E. F. Bradley, 1971: An experimental study of Reynolds stress and heat flux in the atmospheric surface layer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **97**, 168–180.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1974: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791–1806.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys.*, **20**, 851–875.
- Nakanishi, M., 2001: Improvement of the Mellor-Yamada turbulence closure model based on large-eddy simulation data. *Bound.-Layer Meteor.*, **99**, 349–378.
- 中西幹郎, 2016: MYNN スキームの承継と発展に期待を込めて. *天気*, **63**, 503–507.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2004: An improved Mellor-Yamada level-3 model with condensation physics: Its design and verification. *Bound.-Layer Meteor.*, **112**, 1–31.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2006: An improved Mellor-Yamada level-3 model with condensation physics: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. *Bound.-Layer Meteor.*, **119**, 397–407.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2009: Development of an

- improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 895-912.
- 中西幹郎, 新野 宏, 2010: ラージ・エディ・シミュレーションに基づく改良 Mellor-Yamada Level 3 乱流クロージャーモデル (MYNN モデル) の開発と大気境界層の研究—2009年度日本気象学会賞受賞記念講演—. *天気*, **57**, 877-888.
- Nishizawa, S., H. Yashiro, Y. Sato, Y. Miyamoto and H. Tomita, 2015: Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations. *Geosci. Model Dev.*, **8**, 3393-3419.
- Prandtl, L., 1905: Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung. *Verh. Dritten Int. Math. Kongr.*(8-13 Aug. 1904, Heidelberg), B. G. Teubner, Leipzig, 484-491.
- Sato, Y., S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Miyamoto, Y. Kajikawa and H. Tomita, 2015: Impacts of cloud microphysics on trade wind cumulus: Which cloud microphysics processes contribute to the diversity in a large eddy simulation? *Prog. Earth Planet. Sci.*, **2**, 23, doi:10.1186/s40645-015-0053-6.
- Schlichting, H., 1933: Zur Entstehung der Turbulenz bei der Plattenströmung. *Nachr. Ges. Wiss. zu Göttingen Math. Phys. Kl.*, 181-208.
- 下瀬健一, 津口裕茂, 栃本英伍, 鵜沼 昂, 2014: 第1回メソ気象セミナー開催報告. *天気*, **61**, 947-951.
- 下瀬健一, 津口裕茂, 栃本英伍, 鵜沼 昂, 加藤亮平, 2016: 第2回メソ気象セミナー開催報告. *天気*, **63**, 125-129.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang and J. G. Powers, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note, NCAR/TN-475+STR, 113pp.
- Telford, J. W. and J. Warner, 1964: Fluxes of heat and vapor in the lower atmosphere derived from aircraft observations. *J. Atmos. Sci.*, **21**, 539-548.
- 栃本英伍, 渡邊俊一, 末木健太, 吉住蓉子, 下瀬健一, 津口裕茂, 加藤亮平, 鵜沼 昂, 2016: 第3回メソ気象セミナー開催報告. *天気*, **63**, 929-935.
- Tollmien, W., 1929: Über die Entstehung der Turbulenz. *Nachr. Ges. Wiss. zu Göttingen Math. Phys. Kl.*, 21-44.
- 鵜沼 昂ほか, 2018: 第5回メソ気象セミナー開催報告. *天気*, **65**, 757-763.
- 渡邊俊一, 下瀬健一, 栃本英伍, 末木健太, 横田 祥, 加藤亮平, 鵜沼 昂, 春日 悟, 2017: 第4回メソ気象セミナー開催報告. *天気*, **64**, 827-833.
- Wurman, J. and J. Winslow, 1998: Intense sub-kilometer-scale boundary layer rolls observed in hurricane Fran. *Science*, **280**, 555-557.