

研究集会「急発達する低気圧の実態・予測・災害軽減に 関する研究集会」の報告

川村 隆一^{*1}・大塚 成徳^{*2}・吉田 聡^{*3}・柳瀬 亘^{*4}
森 正人^{*5}・小坂 優^{*6}・竹村 和人^{*7}・榎本 剛^{*8}

標記研究集会は、2014年11月17日～19日に京都大学宇治キャンパスで THORPEX 研究連絡会 (THORPEX 終了に伴い、2015年2月19日に観測システム・予測可能性研究連絡会と改称) との共催で開催された。全国の大学・研究機関や気象庁、民間気象会社等から70名超の関係者が集まり、日頃の研究成果を発表し活発な討論を行った。

急速に発達する温帯低気圧 (爆弾低気圧) や台風は大規模気象・海象災害をもたらす極端現象である。低気圧自体の発生・発達メカニズムや進路予測の問題はもとより、低気圧をきっかけとした極端現象の発生と予測、低気圧が引き起こす災害の実態や予測、さらには将来気候における低気圧活動の予測も重要な問題である。そこで、爆弾低気圧及び台風を核として、異常気象・異常天候に関連した様々な側面からの研究成果について、話題を提供していただいた。

研究集会は「データ同化手法」, 「アンサンブル予測」, 「温帯低気圧」, 「年々変動」, 「長期変動・将来変化」, 「成層圏循環と天候」の6つのセッションで構成され、32件の講演があった。以下それぞれの座長がセッションの概要を報告する。

(川村隆一・榎本 剛)

1. セッション1「データ同化手法」

最初のセッションでは、データ同化についての講演が行われた。三好建正 (理研計算科学) は「データ同化の今後の展望」と題して、データ同化を応用した観測データの品質管理手法、観測誤差相関を考慮した場合のデータ同化及びその観測誤差の動的推定手法、非正規分布を示す降水データを正規分布に変換することで降水の同化精度を改善する手法など、近年の研究成果について講演した。また、現在推進している、フェーズドアレイ気象レーダおよびひまわり8号のデータを用いて30秒毎に解析・予報を行う「ビッグデータ同化」についても語った。

近藤圭一 (理研計算科学) は単純化した大気大循環モデルを用いて、10240メンバーのアンサンブルカルマンフィルタを実行した。大アンサンブルにより、誤差共分散の局所化無しでもサンプリング誤差を抑えた滑らかな共分散が得られた。特に、遠く離れた地点間でも有意な相関が見られる場合があり、それを考慮することで解析精度の向上に寄与することが示された。

寺崎康児 (理研計算科学) は正二十面体格子全球雲解像モデル NICAM を用いたアンサンブルカルマンフィルタ NICAM-LETKF の開発状況について報告

^{*1} Ryuichi KAWAMURA, 九州大学大学院理学研究院。

^{*2} Shigenori OTSUKA, 理化学研究所計算科学研究機構。

^{*3} Akira YOSHIDA, 海洋研究開発機構。

^{*4} Wataru YANASE, 東京大学大気海洋研究所。

^{*5} Masato MORI, 東京大学大気海洋研究所。

^{*6} Yu KOSAKA, 東京大学先端科学技術研究センター。

^{*7} Kazuto TAKEMURA, 気象庁気候情報課。

^{*8} (連絡責任著者) Takeshi ENOMOTO, 京都大学防災研究所。enomoto.takeshi.3n@kyoto-u.ac.jp

した。LETKF 内部で NICAM のモデル出力を緯度経度格子に内挿せず、正二十面体格子を直接取り扱うことにより、緯度経度格子に内挿する場合に比べて計算量が減少し、解析精度が上がることを示した。

大塚成徳（理研計算科学）はフェーズドアレイ気象レーダのデータ同化を念頭に、水平100 m 解像度、時間間隔30秒という時空間スケールにおいて、積雲対流周辺でどのような予測誤差が発達するのか、ブリーディング実験を行って調査した。実験では発達中の積雲対流の周辺にリング上のフィラメント構造を持った誤差パターンが得られること、誤差構造は摂動の規格化時間間隔よりも、摂動の規格化の大きさに依存している可能性が大きいことを報告した。

前島康光（理研計算科学）は地上観測を用いて局所的大雨の予測を行うための観測システムシミュレーション実験を行い、初期成果を報告した。2008年に神戸市の都賀川で水難事故が起こった豪雨事例を対象に、水平100 m 格子の JMA-NHM で再現実験を行い、それを真値として水平 1 km 格子で同化実験を行った。実験では大阪大学に設置されているフェーズドアレイ気象レーダを模した疑似観測を用いた。レーダの同化を行うと、同化しない場合に比べて降水システムの位置が改善する一方、降水強度が弱めに出るなど、まだ課題が残されているとのことであった。

（大塚成徳）

2. セッション2「アンサンブル予測」

本セッションでは以下の5件の発表が行われた。

千々松 聡（気象庁気候情報課）は平成27年度に予定されている高解像度（TL479、水平解像度約42 km）アンサンブル予測の18日先までの延長を見据えた、2週間先までの大雨リスク情報のガイダンス開発状況について発表した。TL319、水平解像度約63 km の11日予測結果に頻度分布補正と風向補正を施すことで日降水量が100 mm および200 mm を超える確率が9日予測でも信頼性があることを示した。一方で、このような予報情報をどのような形で社会に提供するかが課題であるとした。

松枝未遠（筑波大計算科学研究センター）は各国のアンサンブル予報結果アーカイブである TIGGE データを用いた顕著現象確率予測を毎日公開している TIGGE Museum の紹介と災害を伴った顕著事例に対する各現業機関のアンサンブル予測精度、複数現業機関のアンサンブル予報を組み合わせたグランドアンサ

ンブルが個々の機関の予測精度を超えることを示した。また、イギリスでは途上国向けに TIGGE のリアルタイム版の運用が始まったことが報告された。

越智健太（気象庁数値予報課）は2014年2月に水平解像度が TL319 から TL479 に、1日1回の予測が1日2回に更新された気象庁週間アンサンブル予報システムについて、2012年4月の低気圧予測を例としてその予測精度の発表を行った。1日2回になったことで低気圧の発達をより早く捉えることができるようになった一方で、予報後半のアンサンブルスプレッドが過少である問題が依然として残っていることを報告した。

吉岡大秋（横国大修士課程）は、2013年台風4号の発生環境場について解析するため、アンサンブル再解析データ ALERA2 の各メンバーを初期値とした WRF によるアンサンブルダウンスケール実験を行い、渦付近の水蒸気量が台風の発生したメンバーの方が台風の発生しなかったメンバーより多いことを示した。また初期値の時刻によって台風発生・非発生の確率が変動することを示した。

吉田 聡（海洋研究開発機構アプリケーションラボ）は winter T-PARC 2009 で行われた航空機観測が低気圧予測に及ぼす影響について、ALERA2 を用いた観測システム実験とアンサンブル予測実験で解析した研究を発表し、北太平洋の観測が北米、北大西洋、ユーラシアを経由し、再び日本付近の低気圧の発達予測に影響することを示した。一方で、衛星放射輝度を同化していない ALERA2 は観測空白域への観測追加が過大に影響する懸念も示された。

アンサンブル予報と確率予報の工夫によって信頼できる予報の期間が延長される反面、それらの予測情報をどのように社会に実装していけばよいのかという課題や、アンサンブル予測結果から現象のメカニズムや予測可能性を探る重要性を考えさせる興味深いセッションであった。

（吉田 聡）

3. セッション3「温帯低気圧」

本セッションの5件の発表では、温帯低気圧に関連して全球分布から竜巻まで幅広いスケールの現象が紹介された。

大きなスケールから見て行くと、柳瀬 亘（東大大气海洋研）は、温帯低気圧を熱帯低気圧やハイブリッド低気圧（亜熱帯低気圧など）と同じ枠組みで比較することを統計的に試みた。再解析データ JRA-25 に低

気圧トラッキング手法を適用することで、各種類の低気圧の発達に関するグローバルな分布を作成した。さらに南半球の夏季を例として、亜熱帯域が熱帯低気圧の環境場としても、温帯低気圧の環境場としても中途半端な領域であることを定量的に確認した。

個々の低気圧ではどのようなプロセスが働いているのであろうか。爆弾低気圧に関して、3件の事例解析が紹介された。渡邊俊一（東大大気海洋研）は、2013年1月14日に急発達した爆弾低気圧における凝結熱の役割について解析した。凝結熱が温帯低気圧の発達を促進することはよく知られているが、渡邊はJMA-NHMを利用した感度実験やPiecewise PV inversion（部分渦位逆変換）により、内部の詳細なプロセスに焦点を当てている。この事例では、凝結熱は主に温帯低気圧の中層で渦位を生成し、通常の傾圧不安定のプロセスにおける上層と下層の渦位の相互作用を強化するような形で、低気圧の発達に寄与していることを明らかにした。

低気圧を発達させる凝結熱を考える上で、水蒸気の起源についても理解する必要がある。平田英隆（九大理）は、渡邊と同じ2013年1月の爆弾低気圧における水蒸気の起源を解明するため、CReSS-NHOESによる大気・海洋・波浪結合シミュレーションの結果に対して後方流跡線解析を行った。後屈前線付近の上昇流で凝結する水蒸気の起源は、流れ込んでくるCold Conveyor Belt（寒気コンベアベルト）が海面から大量の水蒸気の供給を受けたものであり、黒潮や黒潮続流の重要性を示していた。これに対して、低気圧の前面の上昇流で凝結する水蒸気の起源は、南の湿った気塊がWarm Conveyor Belt（暖気コンベアベルト）で運ばれたものであり、中緯度海洋からの水蒸気の寄与は殆ど見られないという対比も示された。

別の事例の報告としては、川野哲也（九大理）が2013年3月2日に道東地方で暴風雪被害を引き起こした爆弾低気圧について、北風の強化メカニズムを解析した。WRFモデルによる再現実験で、北海道の地形に対する感度実験を行ったところ、北海道の山岳の障壁効果により強風域が強化されていることが明らかになった。この事例でも凝結熱が低気圧の発達を促進するという感度実験の結果が得られ、渡邊の発表と整合的であった。一方で、海洋の影響に関しては、海面からの顕熱供給が低気圧の寒気を温めることで水平温度勾配を弱め、傾圧不安定による発達を抑える役割があることが確認された。平田の結果と併せて考えると、

同じ海面からの熱供給であっても、顕熱か潜熱（水蒸気）かの違いによって低気圧の発達に与える影響が逆の傾向であることが興味深い。

温帯低気圧に関する最も小さなスケールのお話は竜巻であった。栃本英伍（東大大気海洋研）は、アメリカ合衆国で竜巻の大発生を引き起こした温帯低気圧のメカニズムについて紹介した。竜巻の大発生を伴う温帯低気圧の環境場を解析したところ、西風ジェットの内側の高気圧性シアが強いという特徴が確認された。この環境場を与えてWRFを用いた理想化実験を行うと、高気圧性シアにより温帯低気圧の構造が南北に伸びる特徴が顕著になった。この構造に伴い、低気圧の南東象限では南風が強化し、Storm Relative Helicity（ストームに相対的なヘリシティ）も高くなるため、竜巻が発生しやすい場となっていることが示された。

本セッションは幅広いテーマと活発な議論により、温帯低気圧を多角的に捉える有意義な場となった。欧米ではCyclone WorkshopやEuropean Storms Workshopといった低気圧に関する研究集会が開催されており、日本でも台風に関する学会セッションや研究集会が盛んである。日本での温帯低気圧の研究に関しても、今回のように発表と議論の時間を十分にとれる場を活かして、知見を共有しながら理解を深めて行きたい。（柳瀬 亘）

4. セッション4「年々変動」

このセッションでは、再解析データの評価や2014年のENSO予報・実況、および冬季の循環場の年々変動や気候変動に関する研究など、7件の講演が行われた。

多くの長期再解析データは利用可能な全ての観測データを同化に使用するため、観測システムの切り替え等のタイミングで解析値が不連続になることがあった。この問題を解消するために、航空機観測や衛星観測等を使用せずに従来型の観測データのみを同化したJRA-55C長期再解析データが作成された。小林ちあき（気象研）は、JRA-55Cの品質評価を行い、予報成績、全球平均場、帯状平均場では、全ての観測データを同化したJRA-55よりも時間的均質性が高いことを示した。また、JRA-55と共通して見られる特徴や、アフリカの熱帯域に見られた解析場の不連続などについても報告を行った。

前田修平（気象庁気候情報課）は、2014年の

ENSOの予報・実況についての報告を行った。2014年の1月から4月にかけて西太平洋で強い西風バーストと、それに強制された振幅の大きな暖水ケルビン波の東進が観測され、多くの現業予報機関で夏以降のエルニーニョの発生が予測されていた。しかしながら、秋になっても本格的なエルニーニョは発生せず、その代わりに熱帯太平洋の北半球側で高SST、南半球側で低SSTの状態が持続していた。前田は、地表面気圧、地表風、潜熱フラックス偏差の特徴から、この南北パターンを持続にWESフィードバックが働いている可能性を指摘し、中・東部太平洋での対流活動の強まりを通して日本を含む中高緯度大気に影響を与えていることなどを指摘した。この講演後の12月に、気象庁は夏頃からエルニーニョが発生していたという見解を発表したが、12月末時点では依然として弱いエルニーニョで、引き続き今後の経過に注目したい。

続いて、冬季の循環場に関する研究が3件続いた。立花義裕(三重大学)は、再解析データの解析から冬季の北大西洋振動(NAO)と翌冬の西太平洋(WP)パターンに負の相関関係があることを見だし、両者をつなぐプロセスとして、北極海の海水の変動を介したルートと、ENSOを介したルートの2つが存在することを指摘した。提示されたプロセスが現実大気の中でどれほど支配的なのかについて、会場から質問がなされた。安藤雄太(三重大学)は、秋から冬にかけて海面水温や全球的な大気の循環場が日本の気候に与える影響についての講演を行い、日本海のSST偏差が日本の気温に与える影響について論じた。また、鈴木はるか(三重大学)は、北極振動(AO)の振幅が近年増大していることに着目し、気候場の変化や、成層圏やSST場との関わりなどの観点から考察を行った。

近年、ユーラシア大陸上で寒冬が頻発しており、北極海の急速な海水の減少が寒冬を強制していることが示唆されていた。森 正人(東大大気海洋研)は、AGCMを用いて、パレンツ・カラ海で海水が多い場合と少ない場合のそれぞれで100メンバーの感度実験を行い、海水の減少がユーラシア大陸の中緯度域に寒冬を強制し得ることを示した。また、地上気温のEOF解析を行うことで、低温偏差に対する自然変動の寄与と、海水の減少による寄与とを分離し、近年の寒冬の増加は自然変動と海水減少の影響の組み合わせで説明されることを示した。

M. Rais Abdillah(東北大学)は、等温位面上で求

めた客観的な寒気流出の指標を東アジアの西側(東経90-135°)と東側(東経135-180°)で個別に定義し、冬季東アジアの寒気流出の年々変動について解析を行った。その結果、西側(東側)の寒気流出はアジアモンスーンやシベリア高気圧(アリューシャン低気圧)の年々変動と密接に関係しており、また熱帯域では同時にラニーニャ(エルニーニョ)を伴っていることを示した。また、ENSOに付随する降水活動とそれぞれの寒気流出との関係についての解析結果を報告した。異常気象のメカニズムを探る上で客観的な寒気流出の指標は大変有用であると感じた。今後のさらなる展開に期待したい。(森 正人)

5. セッション5「長期変動・将来変化」

このセッションは観測・再解析・数値モデルにおける十〜数十年程度の長期変化、及び温暖化予測による将来変化予測に関し5件の研究が報告された。

菅野湧貴(東北大理)は直前のセッションでRais Abdillahが紹介した特定温位面以下に着目する寒気特性の定量化手法を用い、5つの再解析データにおける南北半球の寒気の性質の長期変化を報告した。冬季北半球では全ての再解析において寒気の質量・寒冷度ともに有意に減少しており、その地理的分布も再解析間でよく一致する一方、南半球冬季では半球積算寒気質量・寒冷度の変化傾向は再解析間で符号が異なり、不確実性が大きいことを示した。

続いて北西太平洋域の冬季低気圧活動の将来変化に関する2件の講演があった。水田 亮(気象研気候研究部)は同研究所の大気大循環モデルを用い、北西太平洋で急発達する低気圧のメカニズムと将来変化について発表した。特に700 hPa面の鉛直流に対する700 hPaより上層と下層の渦度・温度移流からの寄与をオメガ方程式により定量化し、ある急発達事例において上層からの寄与が大きい予報アンサンブルメンバーほど成長率が大きい傾向を示した。温暖化予測では対流圏下層では南北温度勾配が減少する一方、上層では増大する。これに伴い、今世紀末には低気圧に伴う700 hPa鉛直流に対する上層の寄与が増加し、北緯40〜60度で急発達の頻度が増加すると述べた。早崎将光(筑波大生命環境)は、日本海・南岸低気圧活動について、第5次気候モデル相互比較プロジェクト(CMIP5)の高解像モデルにおける再現性と将来変化について講演した。CMIP5現在気候実験における日本周辺の低気圧頻度は再解析データのものと同程度で

ある（ただし南岸低気圧の経路集中が再現されない）。また今世紀末には南岸低気圧頻度（急発達するものを含む）が大きく減少することを示した。2件の講演は急発達する低気圧数の将来変化について結果が食い違い、解析手法や用いたモデルの違いについて議論がなされた。

残る2つの講演は最近の十年規模気候変動に関するものであった。卜部佑介（気象庁気候情報課）は日本における近年の気温の季節性の変化とその要因について発表した。冬-春季と夏-秋季の間の日本の気温差は1990年代末頃から拡大傾向にある。他方、熱帯太平洋では同期間に海面水温のラニーニャ傾向とウォーカー循環の強化が十年規模で起こっている。ラニーニャ現象は遠隔影響を介して、日本の夏-秋季の気温を上昇させ、冬-春季の気温を低下させる傾向があることから、これらの十年規模の変化傾向は整合すると論じた。小坂 優（東大先端研）は熱帯太平洋におけるこの近年のラニーニャの海面水温低下が、地球温暖化に伴う全球平均地表面温度上昇の停滞（ハイエイタス）を引き起こしている可能性を気候モデル実験により論じた。年平均気温がほとんど変化していない一方、北半球冬季の全球平均気温は近年低下傾向にあるのに対し夏季には上昇を続けている。これと整合する十年規模の季節性変化傾向が、過去の熱帯太平洋起源と推定されるハイエイタスや加速温暖化（エルニーニョ傾向が温暖化を強化）イベントについても確認できた。さらに近年の熱帯インド洋・南北太平洋・北米など地域的な気候変化の一部も十年規模ラニーニャ傾向で説明できると論じた。

長期気候変動・変化はより短周期の変動を底上げあるいは相殺するだけでなく、背景場として短周期変動を変動させ、極端現象の発現確率に影響する。その理解の科学的・社会的な重要性が増す一方で、長期変動・変化研究は長期観測データの不足と数値モデルの精度とのジレンマにある。これを打ち破るような研究のさらなる進展を期待する。（小坂 優）

6. セッション6「成層圏循環と天候」

このセッションでは5件の講演が行われ、成層圏突然昇温、惑星規模波の反射現象といった成層圏循環の変動、成層圏・中間圏における半年周期振動の特徴などについての報告が行われた。

柴田清孝（高知工科大）は、成層圏突然昇温の東西波数1, 2型の分類に関する新しい定義について提案

した。先行研究で提案された波数の定義に関する問題点を踏まえ、半球を4つのセクターに分割した上で絶対渦度の極大を検出し、渦の面積比を用いて波数を判別する方法を示した。

野口峻佑（京大防災研）は、2014年2月上旬に生じた成層圏における惑星規模波の反射事例を対象としたアンサンブル予報実験を行い、波の反射の予測可能性についての評価結果を報告した。予報初期日を1日ずつずらした予報実験の結果より、惑星規模波の伝播に伴う上部成層圏における東西風の変動は、成層圏の昇温がピークを示した日より7日前から予測可能であることを示した。さらに、波の反射には成層圏高緯度における東西風のシアや曲率に伴う反射面の維持、ヨーロッパのブロッキング、ユーラシア大陸のトラフからの波束の上方伝播が関連していることを示した。

大羽田剛史（九大理）は、傾度風平衡に基づく帯状平均東西風より、成層圏・中間圏の熱帯域における半年周期振動（SAO）の特徴について報告した。衛星データ Aura EOS/MLS を用いた解析より、成層圏と中間圏におけるSAOは互いに逆位相であり、成層圏では正弦波的に、中間圏では約1か月の時間スケールでの西風の卓越と関連して非正弦波的に時間変動することを示した。また、東西風のパワースペクトル解析によって、中間圏界面付近にもSAOがみられることを示した。さらに、衛星データとレーダーデータの比較より、帯状平均東西風は、高度85 kmより上空において大きく異なることを示した。

竹村和人（気象庁気候情報課）は、北米中・東部で顕著な低温となった2013/14年冬における循環場の特徴及び低温の要因についての分析結果を報告した。冬平均の循環場の解析より、対流圏上層の太平洋から大西洋にかけての明瞭な波束伝播や、下部成層圏における惑星規模波の反射が、北米中・東部における低温に寄与した可能性を示した。また、線形傾圧モデル（LBM）による実験より、対流圏上層における波束伝播には海洋大陸から西部太平洋熱帯域にかけての活発な対流活動が関連した可能性を示した。

小寺邦彦（名大太陽地球環境研）は、成層圏突然昇温に伴う熱帯対流圏界面遷移層（TTL）における安定度の減少が、熱帯低気圧の発生数の増加と関連する可能性について示した。2010年1月の北半球、2014年9月の南半球における成層圏突然昇温の事例に着目し、成層圏熱帯域における上昇流に伴う断熱冷却と対応して、対流圏熱帯域において雲量や降水量が増加

し、熱帯低気圧の発生数が増加する傾向がみられることを示した。

近年の研究により、成層圏循環は対流圏循環の変動と関連し、大気循環場の予測可能性にも大きく影響することが示されてきた。このため、成層圏循環の変動のメカニズムを理解することは、科学的知見の蓄積のみならず、数日～数週間の予測精度の改善という点においても重要な研究課題といえる。今後のさらなる調査研究に期待したい。(竹村和人)

略語一覧

AFES : AGCM for the Earth Simulator 地球シミュレータ用大気大循環モデル
 AGCM : Atmospheric General Circulation Model 大気大循環モデル
 ALERA2 : AFES-LETKF experimental ensemble reanalysis 2 AFES-LETKF 実験的再解析2
 AO : Arctic Oscillation 北極振動
 Aura EOS/MLS : Aura Earth Observing System/Microwave Limb Sounder Aura 地球観測システムマイクロ波縁辺サウンダ
 CMIP5 : Coupled Model Intercomparison Project phase 5 第5次結合モデル相互比較プロジェクト
 CReSS-NHOES : Cloud Resolving Storm Simulator-Non-Hydrostatic Ocean Model for the Earth Simulator 3次元大気海洋結合領域モデル
 ENSO : El Niño-Southern Oscillation エルニーニョ・南方振動
 EOF : Empirical Orthogonal Function 経験的直交関数
 JMA-NHM : Japan Meteorological Agency Non-hydrostatic Model 気象庁非静力学モデル
 JRA-25 : the Japanese 25-year Reanalysis 気象庁・電

中研による長期再解析
 JRA-55 : the Japanese 55-year Reanalysis 気象庁55年長期再解析
 LBM : Linear Baroclinic Model 線型傾圧モデル
 LETKF : Local Ensemble Transform Kalman Filter 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ
 NAO : North Atlantic Oscillation 北大西洋振動
 NICAM : Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model 非静力学正二十面体モデル
 PV : Potential Vorticity 渦位
 SAO : Semi-Annual Oscillation 半年周期振動
 SST : Sea-Surface Temperature 海面水温
 THORPEX : The Observing-system Research and Predictability Experiment 観測システム研究・予測可能性実験 (世界気象機関世界天気研究計画の下で2014年まで実施された研究プロジェクト)
 TIGGE : THORPEX Interactive Grand Global Ensemble 現業中期アンサンブル予報のデータベース
 TL319, TL479 : Triangular truncation, Linear grid 三角切断 (スペクトル変換法で東西波数と全波数を同じTLの後に示す波数で切断), 線型格子 (非線型項のエイリアシングを考慮せず, 東西格子数を切断波数の約2倍とった格子)
 T-PARC : THORPEX Pacific Asia Regional Campaign THORPEX 太平洋アジア領域特別観測
 TTL : Tropical Tropopause Layer 熱帯対流圏界面遷移層
 WES : Wind-Evaporation-Sea surface temperature 風・水蒸気・海面水温
 WP : Western Pacific 西太平洋
 WRF : Weather Research and Forecasting Model 米国のコミュニティ領域大気モデル