

第2章 気象業務を高度化するための研究開発

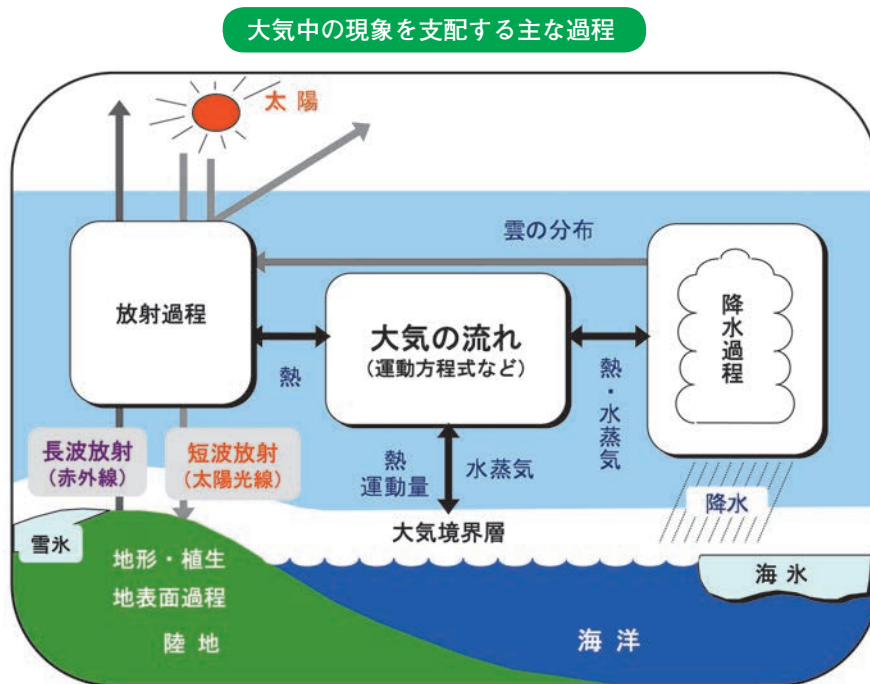
1 大気・海洋の予測を支える数値予報技術

(1) 数値予報とは

警報・注意報や各種の天気予報の発表にあたっては、将来の大気の状態を予測する必要があります。大気や海洋の温度や流れなどの状態は、様々な物理や化学の法則（下図参照）に従って変化していますので、これらの法則を定式化してコンピュータで計算することで、大気などの「今」の状態から「将来」を予測することができます。この手法は「数値予報」と呼ばれ、気象庁の予報業務の根幹をなす技術となっています。

数値予報のためのコンピュータのプログラムを「数値予報モデル」と呼びます。数値予報モデルには、予測する期間や対象領域に応じた様々な種類があります（本項「(3) 数値予報モデルの現状」参照）。いずれのモデルも、大気や海洋を水平方向・鉛直方向に格子状に区切り、それぞれの格子での気温や風、湿度などの将来の状況を予測します。

気象庁は、予測精度の向上のため、数値予報モデルの開発・改良の不断の努力を重ねています。また、数値予報のための膨大な計算を短時間に処理するため気象庁では昭和34年（1959年）に我が国の官公庁として初めて科学計算用のコンピュータを導入したのをはじめ、常に世界最高レベルのコンピュータを導入してきました。



数値予報モデルでは、大気、海洋、陸地で発生する様々な現象を支配する物理法則をコンピュータプログラムで表現します。

(注)

地表面過程：地表面における熱や水の出入りなど

大気境界層：地表面、海洋表面付近で地表面、海洋表面から直接摩擦や熱などの影響を受ける大気層

(2) 数値予報の技術開発と精度向上

きめ細かく、高い精度の防災気象情報や天気予報を作成するためには、その基礎となる数値予報の精度向上が不可欠です。

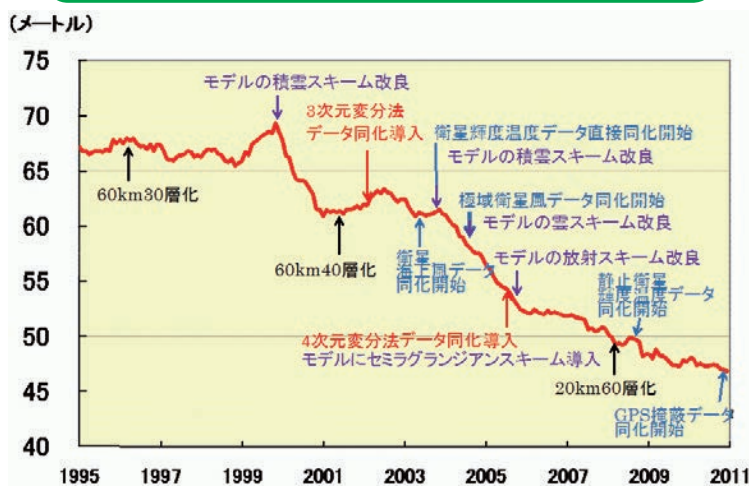
細かい現象の予測には、計算を行う格子の間隔（分解能）を細かくすることが必要です。このため、膨大な数の格子での計算を高速化する方法や、大気中の雨や雲の状態をより精度良く予測するため、雲が発生する過程などの計算方法（物理過程）の開発に取り組んでいます。

また、数か月以上先の予測には、大気だけでなく海洋の影響及び大気と海洋の相互作用の効果が大きくなることから、大気と海洋を同時に取り扱う数値予報モデルが必要となります。

さらに、世界中から様々な観測データを集めて「今」の大気の状態を精度よく解析するためのデータ同化技術の開発も併せて行っています。特に、人工衛星、航空機、ウィンドプロファイラ、ドップラーレーダーなどから刻々と送られてくる観測時刻の異なるデータをより有効に利用する手法（4次元変分法）の開発改良に重点的に取り組んでいます。

スーパーコンピュータの性能向上や数値予報モデルの開発改良がすすみ、数値予報の精度は目覚ましい進歩をとげてきました。気象庁は、数値予報モデルの分解能の向上や物理過程の改良、4次元変分法の導入などデータ同化技術の改善、新たな観測データの利用開始など、多くの技術開発を行ってきました。その結果、数値予報の誤差はこの15年間で3分の2に激減するなど、飛躍的に精度が向上しました。全球モデルは世界の主要国が開発・運用し、その精度を互いに競い合っていますが、その中で気象庁は世界のトップグループに入っています。

全球モデルにおける新たな技術の導入と予報誤差の変化



北半球 500 ヘクトパスカル高度の 5 日予報の二乗平均平方根誤差の推移（単位メートル）。値が小さいほど予報精度が高い。

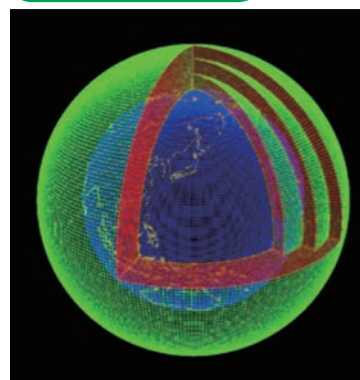
(3) 数値予報モデルの現状

● 全球モデル

「全球モデル」は、地球全体を対象として大気の状態を予測する数値予報モデルです。気象庁では、全球モデルを、短期予報（明日・明後日の予報）、週間天気予報や季節予報、航空路や海上予報など地球上の広い領域を対象とする予報に利用しています。

週間天気予報や季節予報では、予測時間が長くなるとともに予測誤差が大きくなり、断定的な予報が困難になります。この対策として、初期値に人工的にわずかなゆらぎを加えるなどして多くの予測を行う「アンサンブル予報」という手法を使用しています。

全球モデルの概念



●メソモデル

「メソモデル」は、日本周辺などの限られた領域を対象として、大雨や暴風などの災害をもたらす比較的小さな現象の予測を行う数値予報モデルで、警報・注意報など防災気象情報の作成や降水短時間予報、飛行場予報などに利用しています。メソモデルでは、計算を行う格子を細かくし、積乱雲に伴う上昇気流や、水蒸気の凝結、雨や雪・あられなど降水粒子の発生・落下など雲の中で発生する現象を精密に取り扱っています。

●季節予報モデル

1か月予報や異常天候早期警戒情報には、気象庁全球大気モデルをもとにした数値予報モデルが使用されています。一方、1か月を超える時間スケールでは、エルニーニョ・ラニーニャ現象等のように大気のみならず、海洋変動の予測も必要となるため、大気と海洋を一体として予測する大気海洋結合モデルを用いており、3か月・暖寒候期予報やエルニーニョ予測に利用されています。

●波浪モデルと高潮モデル

「波浪モデル」は、気象モデルで予測された海上風を用いて波浪の予測を行うモデルです。予測結果は、船舶の安全航行や海岸の安全を目的として、波浪警報・注意報などの防災気象情報や、波浪予報などに利用されています。また「高潮モデル」は、台風などによって発生する高潮を予測するモデルで、予測結果は、沿岸における浸水災害の可能性の判断や、高潮警報・注意報の発表に利用されています。

●物質輸送モデル

地球環境や気候に影響する二酸化炭素やオゾン、健康に影響する黄砂などの監視と予測のため、これらの物質の、風による移動・拡散、雨などによる地上への降下・沈着、化学反応や光化学反応による生成・変質・消滅などの過程をモデル化し、大気モデルに組み込んだ「物質輸送モデル」や「化学輸送モデル」を利用しています。

気象庁で運用している数値予報モデル (平成 23 年 3 月現在)

予報モデルの種類	モデルを用いて 発表する予報	計算領域と 水平分解能	予測時間 (初期時刻)	実行回数
メソモデル	防災気象情報、 降水短時間予報、 飛行場予報	日本周辺 5 キロメートル	15 時間 (03,09,15,21 時) 33 時間 (00,06,12,18 時)	1 日 8 回
全球モデル	分布予報、 時系列予報、 府県天気予報、 台風予報、 週間天気予報	地球全体 20 キロメートル	84 時間 (03,09,15 時) 216 時間 (21 時)	1 日 4 回
台風アンサンブル 予報モデル	台風予報	地球全体 60 キロメートル	132 時間 (03,09,15,21 時)	1 日 4 回
週間アンサンブル 予報モデル	週間天気予報	地球全体 60 キロメートル	216 時間 (21 時)	1 日 1 回
1 か月予報モデル	1 か月予報、 異常天候早期警戒情報	地球全体 110 キロメートル	34 日間 17 日間	それぞれ 週 1 回
季節予報モデル	3 か月予報、 暖候期・寒候期予報、 6 か月先までのエルニ ーニョ現象等の見通し	地球全体 大気 180 キロメートル 海洋 東西 1 度・南北 0.3 ~ 1 度	210 日間	月 1 回
全球波浪モデル	外洋波浪 24 時間予想	極域を除く地球全体 55 キロメートル	84 時間 (03,09,15,21 時) 216 時間 (21 時)	1 日 4 回
沿岸波浪モデル	沿岸波浪 24 時間予想、 防災気象情報	日本周辺 5 キロメートル	84 時間 (03,09,15,21 時)	1 日 4 回
高潮モデル	防災気象情報	日本周辺 1 キロメートル (沿岸) ~ 16 キロメートル (外 洋)	15 時間 (03,09,15,21 時) 33 時間 (00,06,12,18 時)	1 日 8 回
黄砂予測モデル	黄砂情報	地球全体 110 キロメートル	96 時間 (21 時)	1 日 1 回
化学輸送モデル	紫外線情報	地球全体 300 キロメートル	120 時間 (21 時)	1 日 1 回
	全般スモッグ 気象情報	地球全体 110 キロメートル	72 時間 (21 時)	1 日 1 回

(4) 地球温暖化予測の研究開発

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第4次評価報告書（2007年）では、23の気候モデルによって行われた、20世紀の気候変化再現実験と温暖化予測実験の結果が大きく寄与しました。しかし、当時のほとんどの気候モデルは、エアロゾルや炭素循環の変化を直接扱うものではなく、これらの影響は個別に評価されてきたことが、予測の大きな不確実性の要因となってきました。

そこで不確実性の低減や理解のため、これまで気候モデルでは扱ってこなかった様々な過程を包括的に扱う「地球システムモデル」によって温暖化予測を行う取り組みが世界中でなされています。

気象研究所でも、最新の大気モデルと海洋モデルを結合して新たに開発した気候モデルに、エアロゾル、オゾン、陸域生態系及び海洋生物の効果を表現するモデルを組み合わせた地球システムモデルを開発しました。現在このモデルを用いた温暖化予測実験が行われており、IPCC第5次評価報告書に貢献することが期待されています。また、日本の詳細な温暖化予測を可能とする高解像度の地域気候モデルを開発し、気象庁の温暖化予測を通じて日本域の温暖化対策への貢献が期待されています。

2 これからの観測・予測技術

(1) Kuバンドレーダーなどを用いた局地的大雨の解明

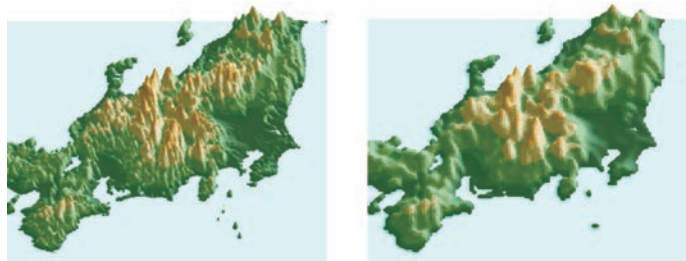
短時間に急激に発達し、局所的大雨をもたらす積乱雲及びそれに伴う強雨・突風現象をいち早く発見し、迅速で的確な防災情報を発表するためには、積乱雲の発生・発達の仕組みに関する知識や降水等に関する観測・監視技術の向上が必要となります。

このため気象研究所では、降水の強さ、風、雨滴・氷粒の区別や形状等を、10メートル程度の分解能で1～2分ごとに立体的に観測できるKuバンド（15ギガヘルツ帯）レーダーや、探知範囲の広いCバンド（5ギガヘルツ帯）二重偏波ドップラーレーダーを用いた観測を行うなど、積乱雲の発生・発達や局地的大雨の発生する仕組みの解明に向けた研究に取り組んでいます。

(2) 今後の数値予報技術

気象庁では現在、航空機の安全運航や気象災害の防止に役立てることを目的として、水平分解能2キロメートルの数値予報モデル「局地モデル」の開発に取り組んでいます。このモデルでは、細かい地形や積乱雲をより適切に表現することができるため、風や気温、強い降水等の予測精度向上が期待されます。

モデルによる本州中部の地形表現の違い

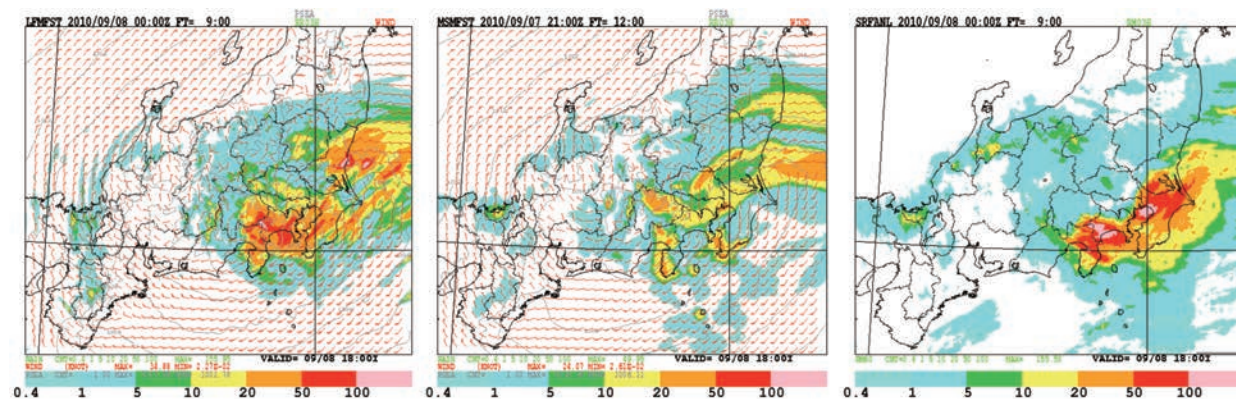


(左) 局地モデル（水平分解能2キロメートル）、(右) メソモデル（水平分解能5キロメートル）。局地モデルはよりきめ細かい地形を表現することができる。

平成 22 年台風 9 号が関東地方に接近した際のモデルによる予測の違いを下図に示します。このときは、千葉県北東部から静岡県東部に至る関東の広い範囲で強い雨が観測されましたが、メソモデル（水平分解能 5 キロメートル）よりも局地モデルの方が、より実際に近い降水を予測していることがわかります。

また、局地モデルでも大雨の発生場所や時間を的確に予想するのは難しいので、数値予報の結果だけでなく観測データも用いて、一刻も早く予警報を発表できるための大雨予測技術の確立に向けた調査研究も行っています。

平成 22 年台風第 9 号が関東地方に接近した際の予測の違い
(平成 22 年 9 月 8 日 18 時の前 3 時間降水量)



(左) 局地モデルによる予測、(中) メソモデルによる予測、(右) 観測された雨量分布
(解析雨量：雨量計と気象レーダーの観測データから得られた雨量分布)

コラム

THORPEX (ソルペックス)

世界気象機関 (WMO) は、顕著現象の機構解明や、1 日先から 2 週間先までの予報精度向上を目的とした「観測システム研究・予測可能性実験計画 (THORPEX)」を十年計画で実施しており、気象庁も積極的に参加しています。

その大きな活動に、気象庁が各国と協力して 2008 年に実施した「THORPEX 太平洋アジア地域観測計画」があります。これは、台風周辺で航空機や観測船、気象衛星等による特別観測を集中的に行い、予報へのインパクトを見るもので、このような観測データを加えると、台風の進路予報の精度が高まる場合があることが実証されました。

また、各国が行うアンサンブル予報の結果を持ち寄り、より精度の高い予報作りに取り組む「THORPEX 双方向グランド全球アンサンブル」も実施されています。気象庁も予測データを提供するとともに、これらのデータから台風予測信頼度情報の作成や利用について研究しています。

気象庁では、信頼性の高い予測情報を作るための研究を世界各国と協力して行っています。

コラム

Kuバンドレーダー

気象レーダーによる観測結果は、気象庁ホームページやテレビの気象情報を通じて提供されるほか、天気予報や降水・雷・竜巻発生確度ナウキャストといった情報の作成に利用されるなど、今や欠くことのできない気象観測データの一つとなっています。

気象庁では、Cバンド（周波数5ギガヘルツ（GHz）帯の呼称）の周波数帯の電波を使った気象レーダーを全国20か所に配備・運用し、日本全国をくまなく観測しています。

一方、近年頻発した局地的な短時間大雨等による災害を受けて、局地的大雨の発生時に見られる降水の特徴について詳細な解析を行い、気象レーダー観測や気象予報の技術向上に反映させることが求められています。

このため、気象研究所ではCバンドよりも周

波数の高いKuバンド（周波数15ギガヘルツ（GHz）帯の呼称）のレーダーであるKuバンドレーダーを使用して、局地的大雨を発生させる積乱雲の詳細な発生・発達・衰弱過程を調べる基礎的研究に取り組んでいます。

Kuバンドレーダーは、雨による電波の減衰が強いため、探知範囲が狭いという短所がありますが、Cバンドレーダーに比べて、1桁以上高い分解能を持ち、短時間で3次元的な観測が可能であるという特徴があり、積乱雲による局地的大雨の特徴や前兆を詳しく調べることができます。全国をくまなく観測するためのCバンドのレーダーと近距離を高い分解能で高速に観測ができるKuバンドレーダーの両者の長所を活かすことで、局地的大雨の観測及び予測技術の向上に資すると期待されています。

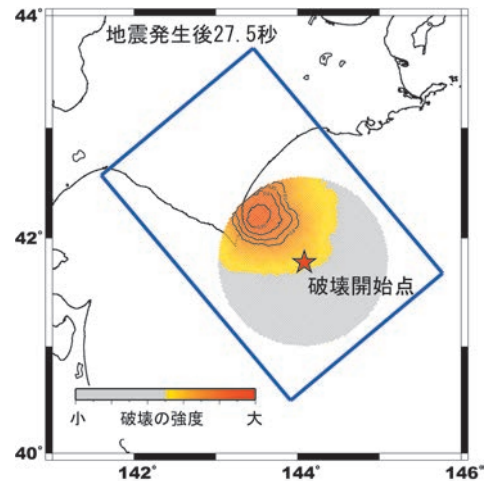
主な諸元	Cバンドレーダー	Kuバンドレーダー
周波数	5GHz	15GHz
探知範囲（半径）	数百km	数十km
アンテナタイプ	パラボラ反射鏡	球形レンズ
アンテナ回転数	毎分2～4回転	毎分20～40回転
分解能	100～500m	10～20m
1回の観測時間	5～10分	1分程度

3 地震・津波・火山に関する技術開発

(1) 地震の実態を即時的に把握するための技術開発

大きな地震による被害や津波の状況をより正確かつ速やかに把握し、防災活動を迅速に立ち上げるためには、地震断層の広がりや、大きな破壊の発生位置など、その地震の実態をいち早く知る必要があります。従来これらの地震の実態の把握には、数時間以上の調査が必要でしたが、気象研究所では、地震波を用いて 20 分以内で把握するための技術開発を行っています。図は「平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震」の大きな破壊が発生した場所を推定したものです。

「平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震」の短周期地震波から推定された、地震発生後 27.5 秒における破壊の強度分布



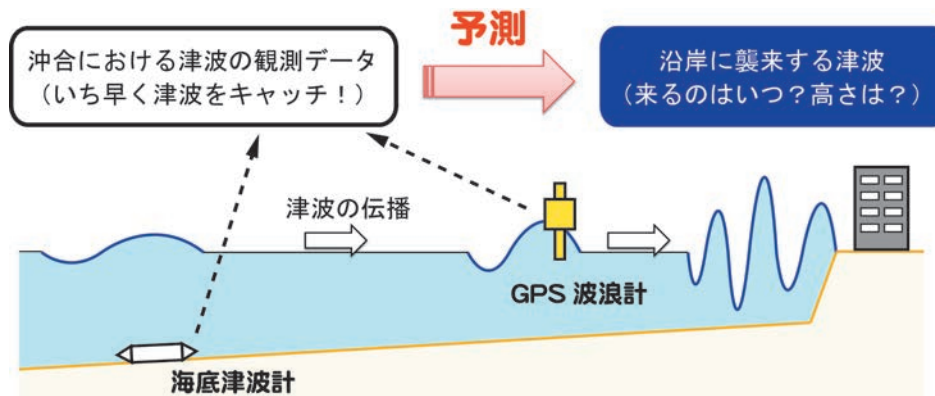
赤い色ほど大きな破壊を示す。星印は破壊開始点、青枠は解析領域

(2) 津波警報・注意報の発表・解除に関する技術開発

津波警報・注意報の発表や解除の精度を向上させるためには、津波の発生源をより精度よく推定するとともに、津波が時間とともに減衰する様子を詳細に把握することが重要です。また、沖合で実際に観測された津波データを活用することも重要です。

気象研究所では、巨大地震の発生により津波が発生するメカニズムを調査したり、津波の減衰の仕方を経験的・理論的に予測する手法を開発しています。また、沖合の GPS 波浪計や、さらに沖合の海底津波計のデータを津波予測に活用するため、沖合と沿岸の津波の高さの関係の経験則や、沖合の観測波形データに基づいた数値計算により、沿岸における津波の波高・到来時刻を予測する研究を行っています。

沖合での津波観測データを活用して沿岸での津波を予測する概念図



沖合の海底津波計や GPS 波浪計で捉えた津波観測データを用いることで、沿岸での津波の到来時刻や高さの予測精度が向上する。

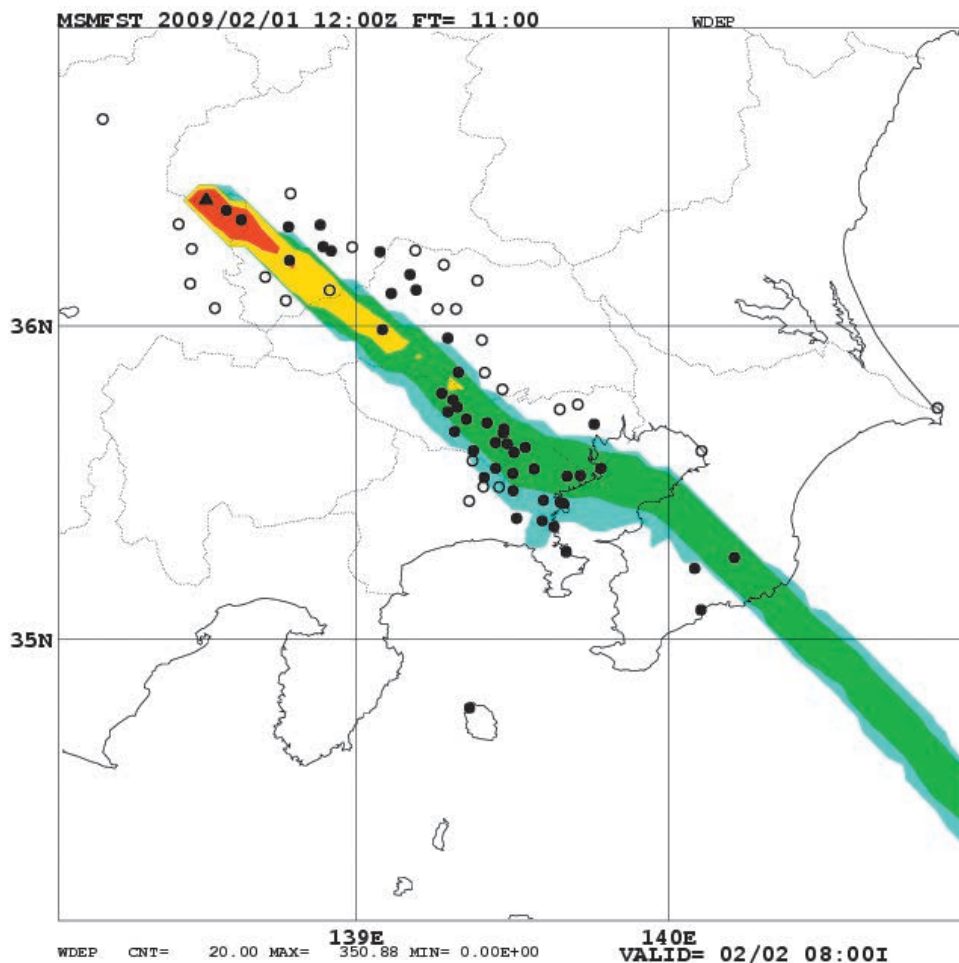
(3) 火山灰の監視・予測のための技術開発

火山の噴火により引き起こされる災害の一つに火山灰による災害があります。大気中を漂う火山灰は航空機の運航に支障を与えるばかりか、健康、農業、産業、交通など私たちの生活に影響を及ぼすことがあります。時には数千メートルの高さまで立ち昇る噴煙からもたらされる火山灰は、その時の風や雨といった気象状況により火口から遠く離れたところに到達することがあります。このため火山灰の振る舞いを予測するには、噴火の規模や火山灰雲の広がりを正確に捉えることと、精度よい気象予測がポイントになります。

平成21年(2009年)2月2日1時51分に発生した浅間山の噴火では、関東地方南部まで降灰が確認されましたが、実際に降灰が確認されたのは、降灰予報よりも広い地域にわたっていました。この噴火に伴う火山灰雲は、レーダーやひまわり6号で捉えられており、これらの観測データを活用することにより、降灰量の予測が改善することが期待されています。

気象庁は、降灰予報の精度向上や降灰量の予測に向けて、気象衛星やレーダーを活用した噴煙監視方法や、数値予報を応用した火山灰拡散モデルの技術開発を行っています。

火山灰移流拡散モデルによる噴火約6時間後の降灰量予測



暖色系ほど予想降灰量が多い。●は実際に降灰が観測された地点、○は観測されなかった地点を示す。

4 開かれた研究体制～大学・研究機関と連携した技術開発～

数値予報モデル開発の精度を向上させるためには、最先端の知見や研究成果を活用することが必要です。このため気象庁は、国内の大学や研究機関はもとより諸外国の気象機関などとも常に意見交換を重ねて技術開発に努めています。

中でも全球モデルは、天気予報や季節予報だけでなく、気候研究や地球温暖化研究など幅広く用いられていることから、モデルの開発や性能評価を天気予報と気候予測の両方の立場から取り組む「シームレス化」が世界の流れとなっています。また、モデル開発はスーパーコンピュータや計算科学の進展と表裏一体であり、日本のみならず世界のスーパーコンピュータ計画には、必ずと言ってよいほど気象モデルの開発プロジェクトが関係しています。また、数値予報の精度向上のためには、衛星観測等を含む観測システムネットワークによって予測精度の向上をどの程度達成できるかを見極めることが重要です。このため、世界中の数値予報機関と衛星運用機関との連携が深められており、気象庁もこれらの連携活動に積極的に参加しています。

気象庁では、気象分野の研究発展と人材育成を図るため、大学等の研究機関と約90件の共同研究を実施しているほか、日本気象学会との間で「気象研究コンソーシアム」を実施しています。「気象研究コンソーシアム」の枠組みでは、気象庁が研究者に提供した予測データや気象衛星データで、突風や豪雨、雪氷災害の予測、熱帯気象、大気中の粒子や微量ガス成分の気候への影響等の研究が行われ、その成果は、気象庁が発表する予報や黄砂・紫外線情報等の精度向上に活用されています。また地震・津波分野においても、共同研究の成果が、緊急地震速報の実用化等の新たな情報として結実しています。

コラム

④大学との共同研究で予報精度向上

気象庁は、京都大学防災研究所との共同研究の成果を1か月予報の精度向上に結び付けることに成功しました。

1か月予報などでは、初期値に人工的にわずかなゆらぎ（初期摂動）を加えた多くの予測（アンサンブル予測）を行い、予測値のばらつき具合から、確率情報を作成しています。初期摂動の与え方が予測の信頼性を左右するのですが、以前は日本の天候に大きく影響する熱帯大気の特徴を取り入れた摂動をつくるのは困難でした。

気象庁は、平成17年から京都大学防災研究所の向川均教授のグループと共同で、プログラムの改良や熱帯域の予測結果の解析を行い、初期摂動を作る手法の改良に成功しました。

その成果は、平成19年3月には1か月予報業務に取り入れられ、特に熱帯地域を中心とする予報精度の向上に大きく寄与しました。

共同研究をリードした向川教授は「これは現実の大気現象の解析が研究成果につながった好事例。共同研究が気象庁の業務に応用できて大変うれしい。」と述べています。



京都大学防災研究所向川教授

コラム

☀️天気予報と太陽光発電

(産業技術総合研究所太陽光発電工学研究センター研究員大関崇氏より)

天気予報と太陽光発電、これまで関係がありそうでなかった両者ですが、二つの技術が将来のエネルギーネットワークの中で大きな役割を果たそうとしています。太陽光発電は、地球温暖化、エネルギーセキュリティ、そして国際経済を支える技術として将来のエネルギー供給源の一翼を担うことが期待されています。我が国では、経済産業省や環境省の各種ロードマップにおいて将来のエネルギーネットワークを描いていますが、太陽光発電への期待は大きく非常に高い導入目標が掲げられています。現在、約3GWの太陽光発電が導入されていますが、2020年には現状の約10倍(28GW)、2030年には約20倍(53GW)が具体的な目標値です。

しかしながら、火力発電所など一般の発電設備の多くが出力を制御できるのに対し、太陽光発電は、季節・時間・天候などにより出力が大きく変動します。そのため、太陽光発電を大量に導入した場合、電力会社が現状調整している

発電と消費のバランスを保つことが困難になることが予想されており、大量導入が出来なくなる可能性があります。太陽光発電の変動にあわせてエネルギーネットワークを制御するためには、一定の精度で太陽光発電の発電量を“事前に予測すること”が重要になります。ここでの“事前の予測”とは、前日に約1時間ごとの発電量を予測することになります。そこで、必要となるのが天気予報に利用する技術となります。

天気予報を行うための技術により気象パラメータを予測し、それらを用いて太陽光発電の発電量予測を行う技術が期待されています。平成22年度より新エネルギー・産業技術総合開発機構のプロジェクトにおいて、産業技術総合研究所、気象庁気象研究所、日本気象協会、岐阜大学、東京大学の共同にて広域エリアの太陽光発電システムの発電量予測技術の研究開発が進められています。

