

第2章 気象業務を高度化するための研究開発

1 大気・海洋に関する数値予報技術

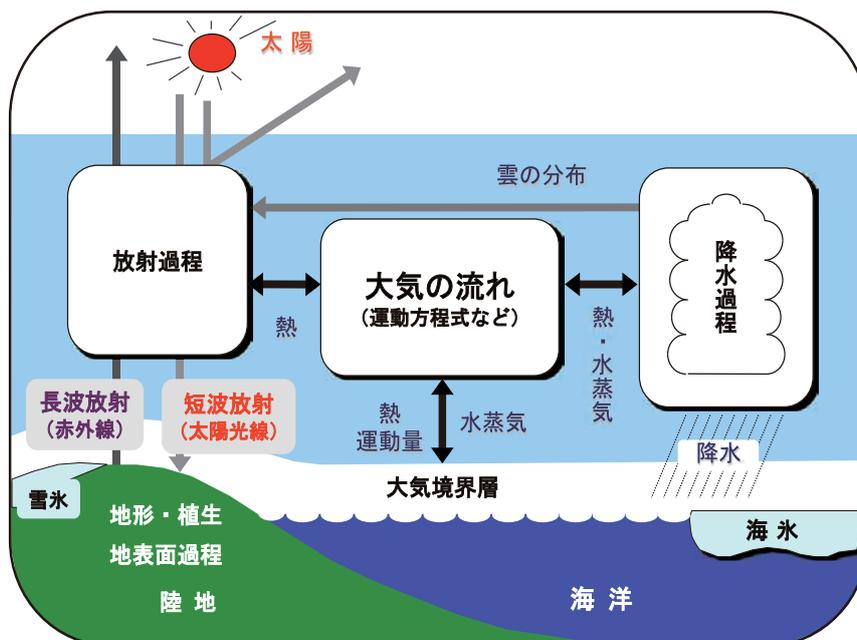
(1) 数値予報とは

警報・注意報や各種の天気予報では、明日・明後日やさらに先の大気の状態を予測する必要があります。大気や海洋の現象は物理や化学の法則に基づいて起きていますので、この法則を用いて「今」の大気などの状態から「将来」を予測することが原理的には可能です。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。

数値予報は、大気や海洋の様々な振る舞いを物理や化学の法則で表現したコンピュータのプログラムを必要とします。このプログラムを「数値予報モデル」といい、予測の精度を向上させるため常に開発や改良が進められてきました。また、数値予報モデルを予報業務に使うには、膨大な計算を短時間に処理する必要があり、この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、以来、常に世界最高レベルのコンピュータに更新しています。

数値予報モデルは、予測する期間の長さや対象領域などに応じて様々な種類がありますが、いずれも、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。

大気中の現象を支配する主な過程



数値予報モデルでは、大気、海洋、陸地との間で発生する様々な現象を支配する物理や化学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：地表面や海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

高い精度の防災気象情報や天気予報をきめ細かく作成するためには、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計算方法などの開発に取り組んでいます。

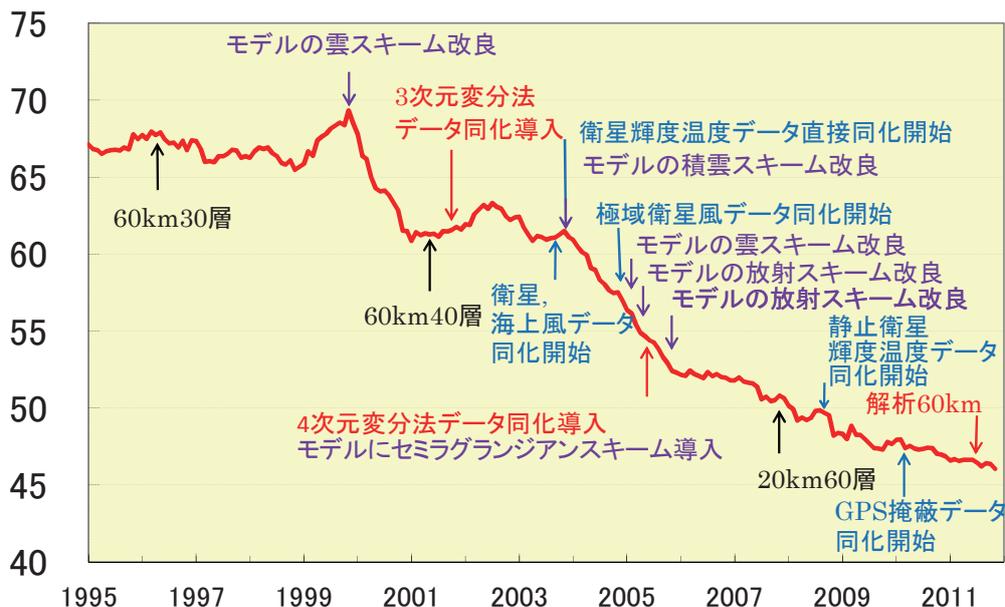
また、数か月以上先の予測には、大気だけでなく海洋の影響が大きくなることから、大気と海洋を同時に取り扱う数値予報モデルが必要となります。

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技術(これを「データ同化技術」と言います。用語集参照。)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(これを「4次元変分法」と言います。用語集参照。)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進み、数値予報は目覚ましい進歩を遂げてきました。図に過去17年間の数値予報モデル(全球モデル:後述)の予報誤差(北半球5日予報の精度)の変化を示します。この間、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、多くの技術の進展がありました。その結果、数値予報の誤差が3分の2に減少するなど、飛躍的に精度が向上しました。

北半球 500 ヘクトパスカル高度予報誤差(5日予報)

(メートル)



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日予報の平方根平均二乗誤差(値が小さいほど予報精度が高い) 単位:メートル)

(3) 数値予報モデルの現状

○全球モデルとメソモデル

気象庁で運用している数値予報モデルにはいくつかありますが、このうち主なものとして「全球モデル」と「メソモデル」があります。

「全球モデル」は、地球全体を対象領域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誤差が大きくなります。このため、「アンサンブル予報」という手法を使用し、確率による予報などを行っています。

一方、「メソモデル」は、日本周辺を対象として大雨や暴風などの災害をもたらす現象など(高低気圧や梅雨前線など、天気図上で解析される数千キロメートル規模の現象より小さく、竜巻など局所現象(数千メートル以下)より大きいスケールが「メソスケール」と呼ばれています。)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

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。

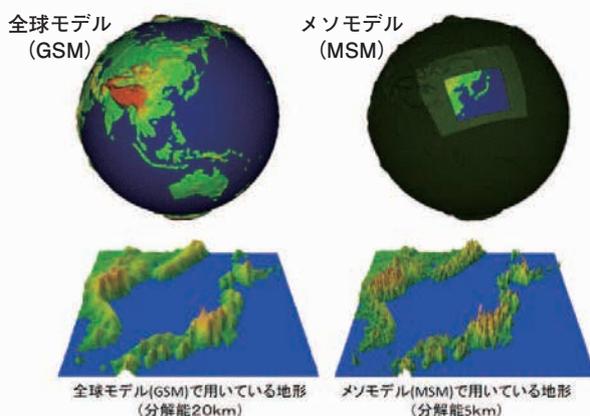
○季節予報モデル

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、大気の変動はエルニーニョ・ラニーニャ現象のような海洋変動の影響を強く受け、逆に海洋の変動は大気の影響を受けます。このため、両者を適切に予測する必要があり、3か月予報、暖・寒候期予報やエルニーニョ予測には、大気と海洋を一体として予測する大気海洋結合モデルが使用されています。

○波浪モデルと高潮モデル

「波浪モデル」は、海上風の予測値を入力して、海上の様々な場所で波の発達・減衰やうねりの伝播などを予測します。予測結果は、高波時に発表される波浪警報・注意報や、波浪予報などに利用されています。「高潮モデル」は、台風などによる海面気圧と海上風の予測値を入力し、海面水位の上昇量を予測します。この予測結果をもとに浸水災害が起こるおそれのある場合に、高潮警報・注意報を発表しています。

全球モデルとメソモデル



数値予報モデルの領域と地形。格子間隔が小さいほどより詳細な地形を表現することができます。そのため、局地的な地形によって起こされる気象現象の表現は格子間隔が小さいモデルほど正確になります。

○物質輸送モデル

気象庁では、大気中の物資の挙動を数式化した物質輸送モデルを用いて地球環境や気候に影響する二酸化炭素、黄砂、オゾンなどの監視と予測を行っています。「黄砂予測モデル」では、黄砂発生域での黄砂の舞い上がり、風による輸送・拡散、雨などによる地上への降下を考慮しています。また、「化学輸送モデル」では、オゾンやその生成・消滅にかかわる物質の風による輸送・拡散、雨などによる地上への降下、化学反応や光化学反応による生成・変質・消滅などの過程を考慮しています。予測結果は、黄砂情報や紫外線情報及び全般スモッグ気象情報に利用されています。

気象庁で運用している数値予報モデル（平成24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 180キロメートル	210日間	月1回
全球波浪モデル	外洋波浪予想(波浪図)	極地方を除く地球全体 55キロメートル	84時間 (03, 09, 15時) 216時間(21時)	1日4回
沿岸波浪モデル	波浪予報	日本周辺 5キロメートル	84時間 (03, 09, 15, 21時)	1日4回
日本域高潮モデル	高潮情報(警報・注意報)	日本周辺沿岸部 1キロメートル	33時間 (03, 09, 15, 21時) 30時間 (00, 06, 12, 18時)	1日8回
アジア域高潮モデル	高潮情報(アジアの気象局で利用)	北西太平洋 3.7キロメートル	72時間 (03, 09, 15, 21時)	1日4回
黄砂予測モデル	黄砂情報	地球全体 110キロメートル	120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

現在、平成 25～26 年（2013～14 年）に公表予定の IPCC 第 5 次評価報告書に向けて、地球温暖化予測実験や、予測の不確実性の低減、その要因の理解をめざした研究が世界中で行われています。

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、これまでの気候モデルで扱ってこなかったエアロゾル、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。このモデルを用いた温暖化予測実験の結果や、海洋観測データを同化した 10～30 年先の近未来予測により、IPCC 第 5 次評価報告書に貢献します。特に近未来予測は、自然変動も含む十年規模変動を表現できることから、温暖化への中期的な適応策に資することが期待されます。

さらに、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、温暖化予測を通じて我が国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

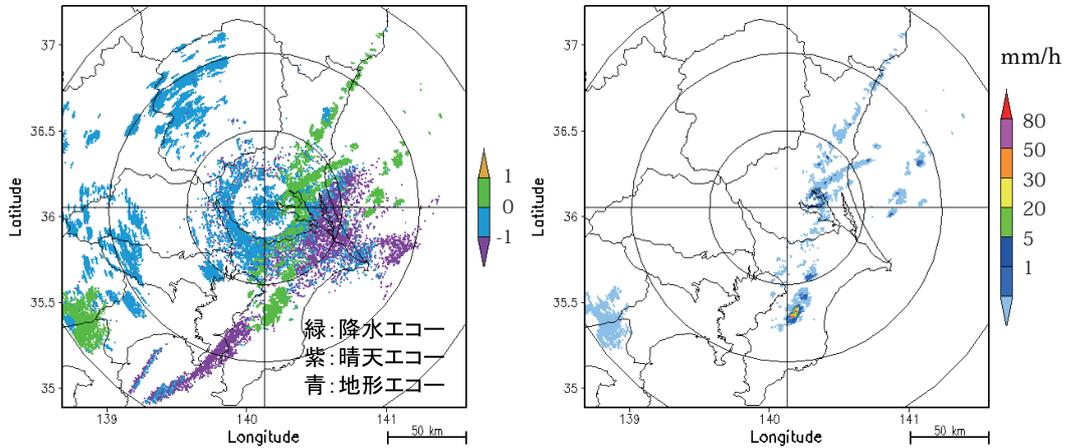
(1) C バンド固体素子二重偏波ドップラー気象レーダー

気象研究所は、2008 年に世界に先駆けて C バンド（5 ギガヘルツ帯）の固体素子二重偏波ドップラー気象レーダーを導入し、次世代のレーダー観測の基盤技術のひとつとして、ハード面およびソフト面から将来の運用に向けた研究を実施しています。

このレーダーの大きな特徴は、電波送信部に、従来のマグネトロンやクライストロンといった真空管の代わりに半導体（固体素子）を採用したことです。これにより、従来型レーダーに比べ、狭帯域化（電波の有効利用に貢献）など、より効率的な観測が可能となります。また、従来型レーダーに比べて送信出力が 1/100 程度と小さい代わりに約 100 倍の長さのパルス波を発射することにより、同等以上の感度で観測を行うことができます。

もう一つの特徴は、従来の水平偏波に加え、垂直偏波の 2 つの電波を発射・受信する二重偏波機能を持っていることです。これにより、非降水エコー（地形、虫など）の判別とその除去、レーダー反射強度の降雨による減衰の補正、雨滴の粒径分布を考慮した降水強度の推定が可能となります。この機能は、降水強度やドップラー速度の精度向上、降水の有無を判別する能力の向上に大いに役立つと期待されています。

Cバンド固体素子二重偏波ドップラー気象レーダーの観測例

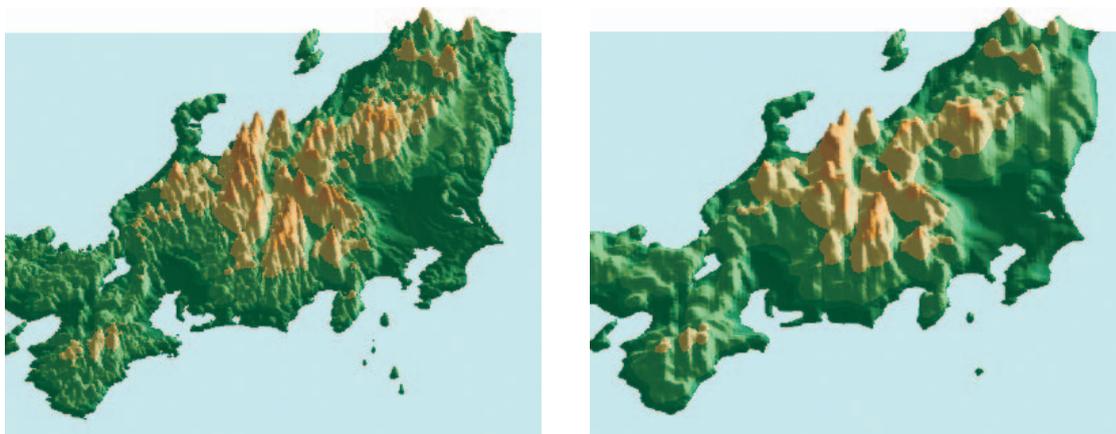


(左) 二重偏波機能を用いたエコーの判別結果
 (右) エコーの判別結果に基づいて、反射強度から推定した降水強度

(2) 今後の数値予報技術

よりきめ細かい気象情報を提供するために、数値予報モデルの解像度をさらに高める必要があります。このため気象庁では、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。2キロメートルメッシュでは、日本のきめ細かい地形を表現することができ、それにとまう風や気温、降水等の予測精度向上が期待されます(下図)。

モデルで表現される地形の例

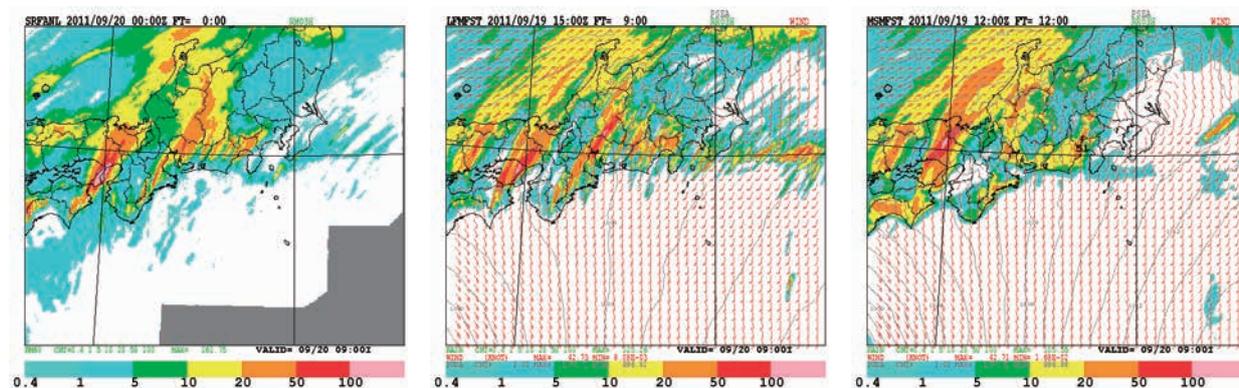


(左) 局地モデル(水平分解能2キロメートル)で表現される地形
 (右) メソモデル(水平分解能5キロメートル)で表現される地形

平成 23 年 9 月 20 日、台風第 15 号が発達しながら九州の南海上を北東に進む際に、暖湿な空気が流れ込んだ近畿・東海地方で大雨となった予測例を図に示します。兵庫県南部を中心とした近畿地方の西部と愛知県・岐阜県を中心とした東海地方の広い範囲に、複数の線状の強い降水域が観測されました。水平分解能 5 キロメートルのメソモデルよりも、水平分解能 2 キロメートルの局地モデルの方が、より実際に近い降水を予測していることがわかります。

今後とも、予測の精度を改善すべく、新しい数値予報技術の研究開発を続けていきます。

平成 23 年 9 月 20 日 09 時の降水予測 (前 3 時間降水量)



(左) 解析雨量、(中) 局地モデル (水平分解能 2 キロメートル) による予測
(右) メソモデル (水平分解能 5 キロメートル) による予測

(3) 次期静止衛星のための技術開発

気象庁は、現行の静止気象衛星「ひまわり 7 号」の後継機として、静止地球環境観測衛星「ひまわり 8 号」を平成 26 年に、「ひまわり 9 号」を平成 28 年にそれぞれ打ち上げ、「ひまわり 8 号」を平成 27 年から運用を開始する予定です。「ひまわり 8 号、9 号」に搭載する高機能のカメラは、大気や地表面から放出される様々な波長の光を捉えることができ、観測で得られる画像の種類が大幅に増えます。また、全球を 10 分ごと、日本周辺画像を 2.5 分ごとの高頻度で観測を行うことができ、画像の解像度も現在と比べて、可視は 1 キロメートルから 0.5 キロメートル、赤外は 4 キロメートルから 2 キロメートルと向上します。この高機能のカメラが捉えた画像からは、これまでよりも多くかつ詳細な観測情報が得られ、その利用に向けた技術開発を進めています。

高頻度かつ高解像度で画像を取得することにより、台風や低気圧・前線等の気象現象をより詳細に把握することができます。特に、急激に発達して局地的豪雨や雷、突風をもたらす積乱雲を発達段階で捉えることが可能となることが期待され、それを早期検知する試みを行っています。

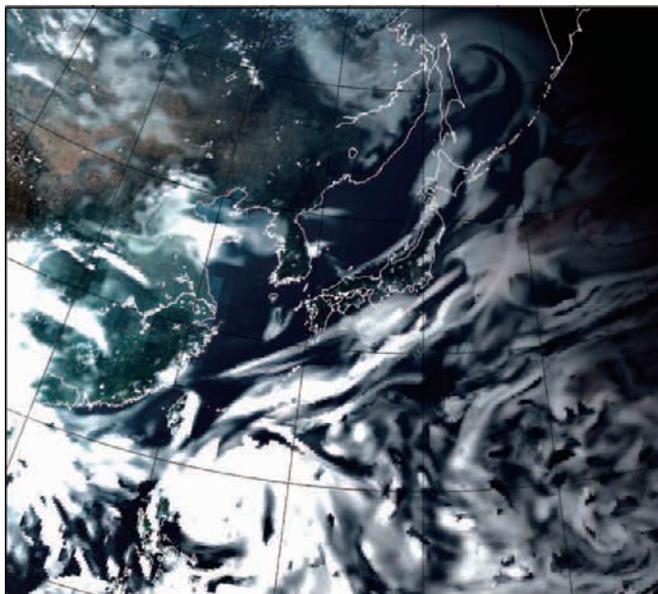
また、様々な波長の光を観測することで得られた画像を利用することにより、雲をより詳細に分類することが可能となり、台風の解析精度の向上が期待できるほか、これまでよりも正確に推定した大気中の水蒸気量を数値予報に利用することで予報精度の向上が期待されます。

また、黄砂や火山灰などのエアロゾルの分布や高度をより正確に算出できることが見込まれ、その技術開発に取り組んでいます。これら技術開発には、地球の陸、海、雲などから衛星に届く可視光線や赤

外線の量をシミュレーション計算する放射伝達モデルが欠かせません。気象庁は、最新の放射伝達モデルの利用について開発を進めています。図は、東京大学が開発した放射伝達モデルを利用してシミュレーション計算を試み作成した「ひまわり8号、9号」の擬似観測画像です。「ひまわり8号、9号」は、光の3原色(赤・緑・青)をそれぞれ観測することができ、それら観測画像を合成することでカラーの観測画像が得られます。図の擬似観測画像では、雲は高度や密度に応じて白から灰色に写り、地表面はアジア大陸南東沿岸部の森林が緑に大陸内部の砂漠が茶色に表現されています。

このように気象庁は、大学・研究機関から助言・協力を得つつ、「ひまわり8号、9号」の画像を気象の実況監視、数値予報への利用、気候環境の監視等で利用するための技術開発を進めています。

最新の放射伝達モデルによるシミュレーション計算で作成した「ひまわり8号、9号」の擬似観測画像



「ひまわり8号、9号」は、光の3原色の波長帯を個別に観測する機能を持ち、それぞれの画像を合成することでカラー画像が得られます。

(4) 大雨予測技術の確立に向けて

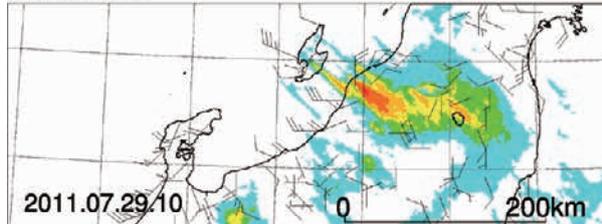
防災気象情報の作成や降水短時間予報に利用されているメソモデルでも大雨の発生場所や時間、降水量を的確に予測できない場合が少なくありません。

平成23年7月新潟・福島豪雨の事例を次ページに示します。観測された降水量分布(左上)と比較すると、前日17時の天気予報発表時に利用できるメソモデルの予測結果(左下)でも観測に近い降水量を予測していますが、毎時50ミリ以上の降水の範囲が実況より狭く予測されるなど、前日の時点での確かな防災気象情報を発表するには十分ではありませんでした。

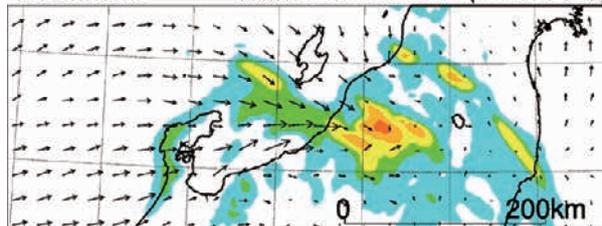
このため、数値予報の結果だけでなく観測データも用いて、よりの確かな大雨に関する気象情報の発表や、迅速な大雨注意報・警報の発表に役立つ大雨予測技術の確立に向けた調査研究を行っています。例えば、大雨の発生時には大量の水蒸気が供給されることから、下層の水蒸気流入量に着目して量的な予測をするなど、大雨に関する気象情報をよりの確かに発表するための取り組みを開始しています。

平成 23 年 7 月新潟・福島豪雨時における下層水蒸気の流入
(平成 23 年 7 月 29 日 10 時の前 1 時間降水量とその直前の水蒸気流入量)

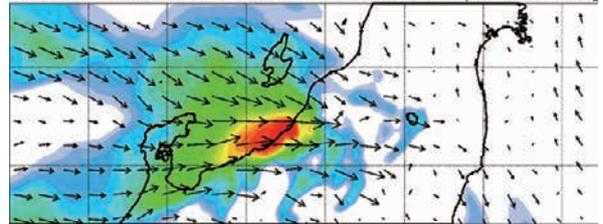
解析雨量分布



予想雨量分布 初期値: 2011.07.28.12 (22 時間予報)



水蒸気フラックス量 初期値: 2011.07.28.12 (22 時間予報)



(左上) 観測された雨量分布 (解析雨量) とアメダスによる風
(左下) メソモデルによる予測
(右) メソモデルが予測した地上から約 500 メートル上空での水蒸気流入量と同高度の風

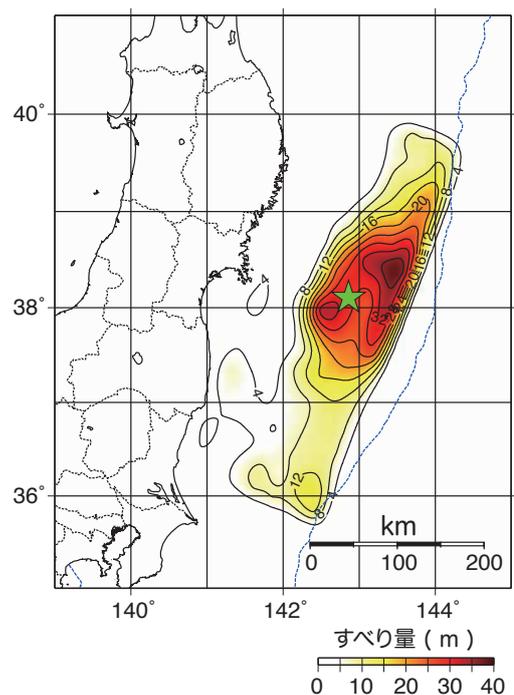
3 地震・津波、火山に関する技術開発

(1) 地震災害軽減のための技術開発

規模の大きな地震の場合には震源も大きな広がりをもっています。図は東北地方太平洋沖地震の地震断層におけるすべり量 (どれだけずれたか) の分布を推定したものです。このように気象研究所では、発生した地震がどのような地震であったかを解析する研究や、津波の予測や被害状況の速やかな把握に結びつけるため、大きな地震の規模や震源域の広がりをより早期に推定するための技術開発を行っています。

また、地震の発生をいち早く検知し、強い揺れが到達する前にお知らせする緊急地震速報を、より早く、より正確にするための技術開発を行っています。東北地方太平洋沖地震後の余震活動では、実際よりも大きな震度を予測することがありましたが、この様な過大な速報を少なくするよう研究開発を行っています。

東北地方太平洋沖地震の断層の
推定すべり分布



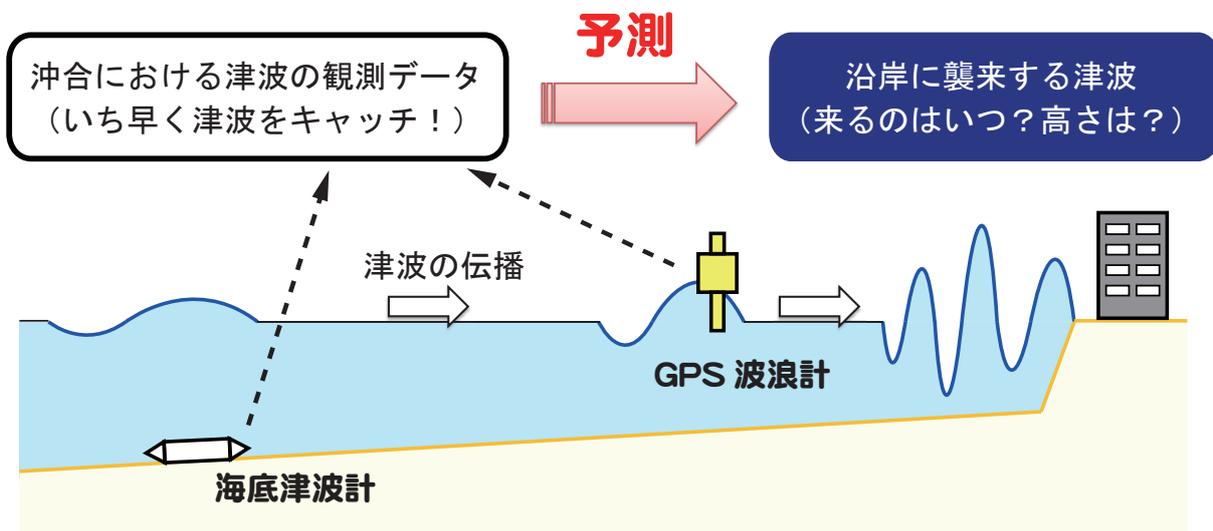
赤い色ほど大きな破壊を表している。
★は本震の破壊開始点を示す。

(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広がり、やがて減衰する様子を詳細に把握することが必要です。また、東北地方太平洋沖地震による津波の観測では、GPS 波浪計や、さらに沖合の海底津波計のデータは、沿岸での津波の到来を予測する上で極めて重要であることが確認されました。

これらを踏まえ気象研究所では、津波が発生するメカニズムの調査や津波の伝播・減衰に関する研究に加え、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分布を予測するシステムの開発も重点的に行っています。

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、沿岸での津波の波高分布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

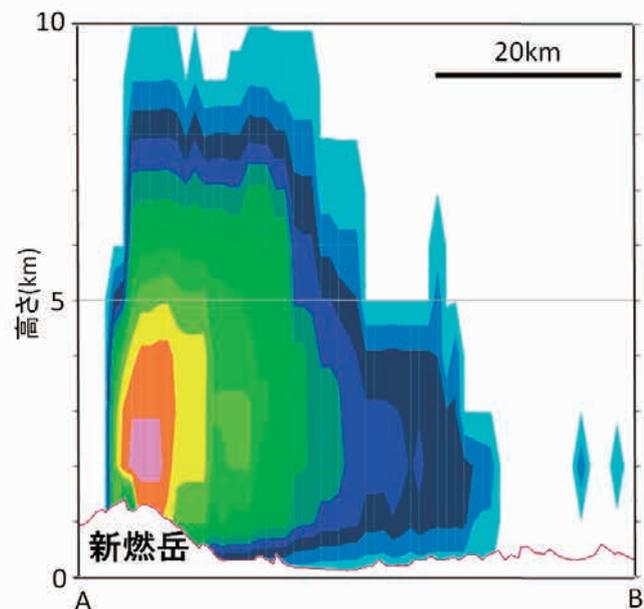
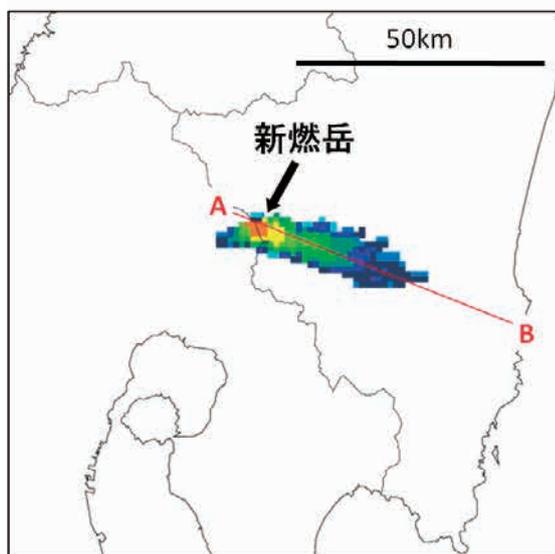
平成 23 年 1 月 26 日から本格的に始まった霧島山新燃岳の噴火では、火山灰を含む噴煙が 1 万メートル近い高さにまで噴き上げられ、火口の南東側にあたる宮崎県および太平洋に 2 日間以上にわたって火山灰を降らせました。このような火山噴火による火山灰は、航空機の運航に支障を与える他、健康や農業、交通など私たちの生活に影響を及ぼすことがあります。火山灰による災害を軽減するために、気象研究所では、火山灰雲の高さや広がりを正確に捉える技術や、火山灰の拡散を精度よく予測する技術の開発を行っています。

新燃岳の噴火では、噴き上げられた噴煙の様子が気象衛星ひまわりで観測された他、種子島及び福岡の気象レーダーや鹿児島空港の気象レーダーでも捉えられました。それらのデータをもとに詳細な解析を行ったところ、噴煙の広がりや噴煙の高さが時々刻々と変化していく様子が示されました。このような長時間にわたってレーダーで観測された噴煙の解析が行われた例は世界的にもほとんどなく、レーダーによる噴煙の検知力を評価する上で、とても貴重な観測となりました。

また、数値予報を応用した火山灰拡散モデルの改良も進められています。新燃岳噴火の際は、北西からの強い季節風によって風向・風速が時間や高さで変化していたため、火山灰の拡散予測をする上では難しい気象条件でした。しかし、このような条件下でも、現在研究開発中の最新の火山灰拡散モデルと、気象レーダー観測によるその時々々の噴煙の高さを用いることで、各地の降灰量をうまく推定できることが分かりました。

今後も引き続き、気象衛星やレーダーを活用した噴煙監視方法や火山灰拡散モデルの改良を進めることで、降灰の範囲のみを予報している現在の降灰予報に、降灰量についての予報を加えることを目指しています。

気象レーダーによって捉えられた新燃岳の噴煙 (2011年1月26日17時10分)



(左) レーダー反射強度の水平断面図 (高度3キロメートル)
 (右) A-B間の鉛直断面図
 暖色系ほど反射強度が大きいことを示す。

4 開かれた研究体制

数値予報モデルの予測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情報交換や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、気候予測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の開発には、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。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をどの程度向上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、気象研究の発展と気象研究分野の人材育成を進めるため、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」という研究の枠組みを設けています。「気象研究コンソーシアム」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として結実しています。

コラム

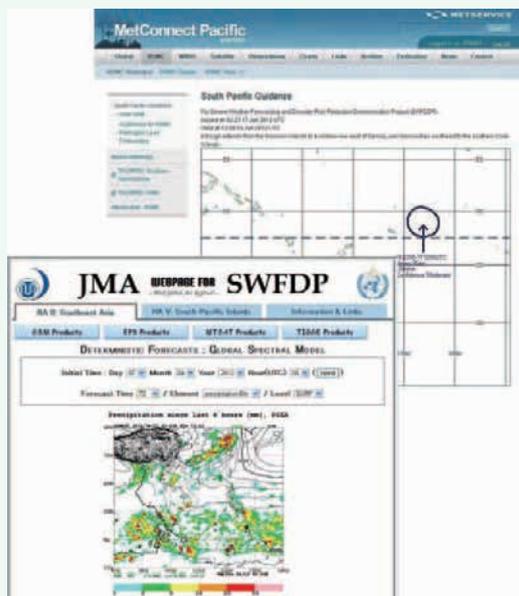
☑開発途上国の防災気象業務改善のための技術協力

気象庁は、開発途上国における防災気象業務を改善することを目的として世界気象機関(WMO)が推進する「荒天予報実証プロジェクト (SWFDP)」に参画しています。SWFDPでは、アンサンブル予報など先進国が持つ高度な技術を活用し、開発途上国の気象機関に、台風・大雨等の現象を予測するための数値予報プロダクトを提供します。また、気象機関のみならず、防災機関やメディア等のユーザーも情報を防災対応に適切に活用できるように、気象機関とユーザーの連携強化にも取り組んでいます。

具体的には、気象庁を含む先進的な数値予報センターが数値予報プロダクトを提供し、地域(南太平洋諸島、東南アジア、ベンガル湾など)の中枢を担うセンターが、地域的な特性を加味して荒天予報に関する解説資料を作成し、域内各国の気象機関に提供します。各国気象機関はこれらの情報を利用して高精度で早期の警報・注意報発表に取り組み、これらの情報を防災活動に活用します。

SWFDPでは、開発途上国側の負担を軽減するため、基本的にウェブブラウザで閲覧できる画像の形で情報を提供する、情報をホームページに集約するなどの配慮がされています。また、プロダクトの利用方法やユーザーとの関係強化に関する研修を毎年実施し、開発途上国に寄り添った支援を行います。

気象庁は、南太平洋諸島や東南アジア、ベンガル湾でのSWFDPに参加し、全球モデルや週間アンサンブル予報による台風の予測情報、静止気象衛星などのプロダクトを提供するほか、これらの情報作成に必要な技術開発に取り組んでいます。特に、東南アジアSWFDP(対象国はカンボジア、タイ、ベトナム、ラオス)の実施計画策定に際しては、気象庁は多くの技術協力を行っています。



南太平洋諸島 SWFDP のプロジェクトホームページ (上)
及び気象庁の SWFDP 向けプロダクト提供ホームページ (下)



2011年7月に香港天文台で行われた東南アジア SWFDP での研修の様子。