

2.2.2 気象災害

(1) 社会的貢献 ―科学的知見に基づく災害予測のシステム化を目指して―

日本は、その国土の約 7 割を山地・丘陵地が占め、台風や豪雨等に見舞われやすいという、地形・気象の両面で厳しい条件下にある。低地の狭い平野部に人口や重要な社会資産が集中しており、洪水や高潮が発生すれば大きな影響を受けることになる。また、山地・丘陵地による傾斜地もしくはその近傍にも多くの民家やさまざまな施設が存在し、土石流や地すべり・崖崩れといった現象は災害に直結する。

日本を含む東アジアにおける気象災害の最大の要因は、台風である。日本では、1983 年以降は 50 名を超える死者・不明者を出す台風災害は生じていなかったが、近年(本稿では 2004 年以降の過去 10 年)になって大きな台風災害が頻発している。2004 年 10 月の台風 23 号は、全国に強風と大雨をもたらし、98 人の死者・行方不明者と 7 千億円を超える平成最悪の被害を出した。2011 年 9 月の台風 12 号は、紀伊半島に 1,800mm を超える記録的な豪雨をもたらし、90 名を超えるの死者行方不明者と 1 千億円を超える被害を出している。2013 年 10 月には、台風 26 号で伊豆大島で土石流による大きな災害が発生した。東南アジアでも、近年台風による大きな災害が頻発している。ミャンマーでは、2008 年 5 月にサイクロナルギスの高潮により、死者・行方不明者 13 万人という最大級の気象災害が発生した。2009 年 8 月の台風 8 号は、台湾で大規模な深層崩壊を引き起こし、過去 50 年で最悪と呼ばれる 800 名近くの死者・不明者を出している。また 2013 年 11 月にフィリピン南部を襲った台風 30 号は、最強クラスの上陸台風として高潮などにより死者・不明者 6 千人を超えると推定される同国での過去最大規模の災害を生らせている。

台風によらない豪雨も、梅雨末期などにしばしば大きな被害を出している。特にここ数年は、平成 21 年 7 月中国・九州北部豪雨（死者・不明者 30 名）、平成 23 年 7 月新潟・福島豪雨、平成 24 年 7 月九州北部豪雨など、顕著な被害（損壊家屋等 1,000 棟程度以上、浸水家屋 10,000 棟程度以上など）として命名される集中豪雨が頻発している。また、2013 年 8 月の山口・島根での豪雨や 9 月の秋田県、岩手県での豪雨など過去の降水記録を更新するような激しい雨も多く発生している。

台風や集中豪雨など大規模な気象災害の他に、短時間の顕著気象として、局地的大雨や竜巻がある。「ゲリラ豪雨」などと呼ばれる局地的大雨は、2008 年 7 月神戸市都賀川、2008 年 8 月豊島区雑司が谷、2009 年 8 月那覇市ガープ川など、狭い範囲に 1 時間 100mm クラスの雨をもたらし、急激な増水による人的被害を生らせている。2012 年 5 月には F3 という国内最強クラスの竜巻が関東地方に発生し、つくば市などに大きな災害を引き起こした。また 2013 年 9 月の台風 18 号は、過去最多の 10 個の竜巻を伴っていた。竜巻は、ドップラーレーダーなどでも検出できない現象であるが、スーパーセルに付随するメソサイクロンに伴って発生することがある程度わかってきている。

国土交通省（気象庁）の調査では、近年、1 時間に 50mm や 1 日に 200mm を超えるような激しい雨の回数が増加しており、土砂災害の発生件数もこの 10 年で 20～30 年前の 1.5 倍に増加している。IPCC の第 4 次評価報告書によれば、今後、大雨の頻度は引き続き増加する可能

性がかなり高いと予測されている。日本においても、地球温暖化の進行により、100年後と現在とで比較すると、200mm以上の日降水量の年間日数は、ほとんどの地域で増加すると予測し、また、年最大日降水量は多くの地域で1.1～1.3倍に増加するとしている。日本では、伊勢湾台風以降大規模な高潮災害は発生していないが、昭和三大台風と呼ばれるような巨大台風が1960年以降襲来していないこともその原因の一つと考えられる。地球温暖化の進行に伴う海面水温の上昇と大気中の水蒸気量の増加が台風の強化に働く可能性が指摘されており、将来にわたって大きな高潮が発生しないという保証はない。

台風によらない豪雨や局地的大雨は、不安定な大気状態の中での総観場強制が弱い場で発生するケースが多く、その予測は大変難しい。また台風による雨の場合でも、域内のどこで災害に至る量の雨が降るかを正確に予測するのは多くの場合難しい。竜巻（メソサイクロン）はさらにスケールが小さく、現在の現業数値予報は、これらを直接の予報対象としていない。このため、これらの現象に関する警報や注意情報の発令は主として監視に基づいているのが現状である。気象庁は、2013年8月から重大な災害の危険性が著しく高まっている場合を対象に、「特別警報」の運用を開始した。数十年に一度の現象が予想される場合が対象となるが、大雨特別警報に関する指標（48時間あるいは3時間降水量と土壌雨量指数）の予測は、実況監視を主体としている。実際の豪雨災害は深夜や未明に発生する例も少なくないため、現在の情報は、安全な避難行動をとるタイミングを考える上では十分ではない場合がある。豪雨予測の精度を向上させるとともに、リードタイムを持って最悪のシナリオを提示できる技術基盤を確立していくことが重要である。

積雪、干ばつや冷害など、集中豪雨よりも大きな時間・空間スケールの現象は、短期間で人命を奪うものではないが、大きな経済的損失を伴う場合がある。現代の大都市の交通は、その頻度が少ない首都圏などでは、積雪に対して極めて脆弱になっているが、その正確な予測が現在でも難しい場合がある。干ばつは、アフリカなど世界的には最大の気象災害の一つとして恐れられており多くの人命を奪ってきた歴史があるが、季節予報は気象予測の中でも最も難しいものに数えられている。また、発展途上国の産業振興に伴い、PM2.5のような越境汚染の深刻化が懸念されており、環境予測の重要性も高まりつつある。

地球温暖化の進行とその影響の将来予測の精度を上げるためには、モデル計算についての「気候感度の不確実性の幅の縮減」が極めて重要である。この不確実性の多くは、地球全域の雲の動向の変化予測の難しさに起因している。衛星観測との比較検証により現在の雲分布とその放射効果を正しく再現できるモデルを開発し、そしてそのモデルを用いて地球温暖化時の雲分布の変化を確認することがこの問題の解決の正攻法である。

気象防災のために必要な予測について、時間スケールの観点から分類すると以下の表2.2.2-1のようになる、なお、これら全てのスケールにおいて、その予測は予報誤差の定量的な評価に基づく確率的な表現となるべきであることを後述する。

表 2.2.2-1 気象防災に必要な予測

時間スケール	モデル	主な内容	防災対策
数十年	気候モデル（全球、領域）	地球温暖化など気候変動に伴う台風の動向や豪雨等顕著現象リスクの評価	治水社会資本の整備やエネルギー政策
数か月	全球大気海洋結合モデル	マッデンジュリアン振動やエルニーニョなど季節内振動や季節変動の予測	水資源や食糧の管理、農業での対応
数日予報～2週間程度	全球モデル	台風の発生、進路・強度予測、急発達する低気圧の予測	ダム管理や企業・自治体での短期防災計画
半日～1日	領域モデル	局地的大雨を含む豪雨等の予測、都市の積雪予測	事前の避難などの対策、防災待機情報
1時間程度	領域モデル	局地的大雨や竜巻をもたらす巨大積乱雲やメソ対流系の移動・消長	命を守るための行動



図 2.2.2-1 総合防災（気象災害）

(2) サイエンスの質的变化

数値モデルによる気象予測は、計算科学の最適な応用分野の一つとして古くから注目されてきた。Richardson (1922) の試みに始まった数値計算による気象予測は、1946 年に米国ペンシルバニア大学でデジタル計算機 ENIAC が開発されると現実のものとなった。Charney ら (1950) は、水平格子間隔 736km の 2 次元順圧モデルで鉛直絶対渦度保存の式を解くことにより、数値モデルを用いた気象場の予測に初成功している。気象庁は、1959 年に日本初的大型計算機 IBM704 を導入し、翌年から東アジア領域を対象とする水平格子間隔 381km の 2 次元順圧モデルの運用を開始している。2012 年 8 月からは、水平格子間隔 2km の局地モデルの運用を開始しており、約半世紀で現業数値モデルの格子間隔は約 200 倍になっている。これは平均的には 6-7 年で解像度が 2 倍になることに相当し、そのペースはこの期間中概ね変わっていない。ス

ーパソコンコンピュータを用いた数値モデルによる予測は、天気予報に関しては、かつての参考資料から現在では不可欠の基幹技術になっている。

その一方で、大気現象は極めて自由度の大きな複雑系であり、計算科学としての第一原理のみに基づくアプローチは特殊な場合を除き、将来に渡って実現しないであろう。気象の予測においては、大気中の水の状態と放射による非断熱過程や乱流輸送が非常に重要で、これらを完全に直接計算することは不可能なので、何らかの粗視化（パラメタリゼーション）による近似が不可避である。これらの粗視化は、気象モデルによる予測の不確定の大きな原因となっているため、できる限り物理的性質が理解されている過程によって大気中の物理を記述することが重要になる。

歴史的には、気象予測モデルの水平格子間隔は積乱雲（水平 10km）を表現するために必要な格子間隔（概ね 2km 以下）よりもはるかに粗く、現業数値予報モデルでは長く静力学近似と積雲対流パラメタリゼーションが使われてきた。静力学近似は、鉛直方向の運動方程式を鉛直圧力傾度と重力の平衡に置き換えるもので、鉛直流や 3 次元の気圧を予報するプロセス、気象学的にはノイズとなる音波に対する複雑な扱いなどを省略できる利点がある。水平格子間隔 10km 以上の場合など、現象のアスペクト比が 1 よりも十分に小さい場合には良い精度で成り立つことが知られている。積雲対流パラメタリゼーションは、格子平均した積雲や積乱雲の効果（主に、水蒸気の凝結や蒸発に伴う潜熱の出入りや、熱や水蒸気（、運動量）の鉛直輸送）のみをパラメタライズする手法である。これらの手法は、中緯度の総観スケールの気象擾乱を対象とする予報では現在でも十分に有効であるが、気象災害につながる顕著現象を引き起こす積乱雲を直接表現する場合には適用できない。

数値モデルの格子間隔が積乱雲を表現できるようになると、深い対流についての積雲対流パラメタリゼーションが不要になる。概ね水平格子間隔 2km 以下で雲物理過程を含むモデルを雲解像モデルと呼び、気象庁局地モデルがそれにあたる。水平解像度 4km 程度でも積雲対流パラメタリゼーションを用いないで計算を行うことは可能で、対流許容(convection permitting)モデルなどと呼ばれることがある。一方、水平格子間隔 2km ではスケールの小さな浅い対流は表現できないため、雲解像モデルとしての解像度は十分とは言えない。また深い対流についてもその解像度依存性の収束計算を調べた近年の研究では、水平格子間隔として上昇流のコアを表現するために 250m 程度が必要と言われることが多くなっている。雲の物理として一般に良く用いられている粗視化は、バルク法と呼ばれる手法で、水物質を雲や雨、雪などのカテゴリーに分け、粒径分布関数を仮定して混合比や数濃度といった限られたモーメントのみを予報するものである。また、境界層内の対流や乱流に関しては、乱流渦の等方性の程度に応じて幾つかの予報式を診断的に簡略化したクロージャ境界層モデルと呼ばれる粗視化が行われているが、水平格子間隔 1-2km は、境界層モデルによるパラメタリゼーションの適用が好ましくないとされる 'grey zone' と呼ばれる解像度にさしかかっている。

数値モデルによる気象予測は初期値問題であり、気候予測以外のほとんど全ての気象予測において初期値の精度は決定的に重要である。数値予報の分野では、前の時間の予報結果を第一推定値として、それを観測で修正して初期値を作る作業が行われる。基礎となっているのは、条件付き確率に対するベイズの定理であり、第一推定値と観測値の誤差に応じた最尤推定の手法として、変分法が広く用いられている。観測値と第一推定値の双方からの誤差の重みに応じ

た距離の和で評価関数を定義し、評価関数が最小となる解を探索して解析値を求めるものである。4次元変分法と呼ばれる手法では、異なる時刻の観測を同化するために、データ同化にも数値モデルが用いられる。最適値の探索のためには数十回に及ぶ繰り返し積分が必要なため、4次元変分法の計算においては、同化モデルの解像度を予報モデルよりも低くする妥協が広く用いられている。日本を含む先進予報センターでは、初期値作成に関連する手続きに予報そのものと同程度もしくはそれ以上の人的・計算的資源を投入している。

我が国における HPC 技術の先駆けとしての地球シミュレータの登場は、全球気候モデルの解像度を 20km に、領域気候モデルの解像度を 5km 程度にすることを可能にした。これらの改善はモデルにおける台風や地形の現実的な表現を可能とし、気候変動に伴う台風の強度や強雨の出現頻度についてのより信頼性の高い情報が得られるようになった。地球シミュレータによるこれらの全球 20km、領域 5km の気候計算は、IPCC 報告書に直接的に寄与するとともに、気象庁の現業数値予報システムの開発にも重要な技術情報を提供し、2006 年の気象庁での 20km 全球予報モデルと 5km 領域非静力学モデルの運用開始とそれらによる現業予報システムの予測精度向上に間接的に寄与した。但し、地球シミュレータでのこれらの気候計算は、タイムスライス実験と呼ばれる海面水温を境界条件として与える実験とそのダウンスケールである。NICAM に代表される全球非静力学モデルの開発とそれを用いた研究においても、地球シミュレータは一定の役割を果たしている。

京コンピュータの登場に代表される最新の HPC 技術は、戦略 5 分野に代表されるさまざまな分野への数値シミュレーションの適用を可能にしたが、計算科学の最適な応用分野としての気象気候の重要性は変わっていない。前述したように気象計算には様々な粗視化や妥協が余儀なくされているが、京の登場は、先端研究に質的な変化をもたらした。戦略分野 3「防災・減災に資する地球変動予測」においては、対流許容モデルを全球規模に応用して、台風の発生や進路・強度についての予測可能性を調べる計算が行われるようになった。また 2 日間ではあるが、全球を対象とする本格的な雲解像計算が世界で初めて行われた。領域モデル計算においては、雲解像モデルを用いたアンサンブル予報やアンサンブル予報にリンクしたデータ同化研究が行われるようになった。前述したように気象予測では初期値が決定的に重要であるが、解析は第一推定値と観測値の誤差に基づく最尤推定であるため、初期値には不可避の誤差が存在する。アンサンブル予報は解析誤差などに応じた初期値の時間発展を多数の予測計算から求めるもので、確率的な予測を得ることが可能になる。またアンサンブルカルマンフィルタに基づくデータ同化と高解像度アンサンブル予報を、九州北部豪雨やつくば竜巻などの災害事例に適用する予測実験も行われ始めている。初期値への敏感性がそれほど大きくないとされる気候計算においても、モデルや境界条件の不確定性を考慮するアンサンブル計算が予測の信頼度の評価のために必要である。

物理過程の粗視化に起因する数値モデルの不確定を定量的に評価する研究が、戦略プログラムで行われている。バルク法による雲物理の粗視化では、あるカテゴリーの水物質について質量平均や数濃度平均した落下速度を仮定するが、「ビン法」では、粒径などの「ビン」を設定し、各ビンに含まれる水物質の量を計算する。乱流は、その運動エネルギーが大きなスケールから小さなスケールに流れるだけの慣性小領域と呼ばれる領域では、その性質が比較的良く理解されている。より大きなスケールの渦についてを直接解像するものとして、ラージエディシ

ミュレーション(LES)がある。これらを用いるモデルはこれまでは限られた設定での理想実験しか行えなかったが、戦略分野3では、個々の建物も解像する LES モデルによる現実設定での大規模シミュレーションが世界で初めて行われるようになってきている。

京コンピュータにおける気象気候分野への先駆的な試みは、その先進性のゆえに、気象防災の分野にその成果が本格的に反映されるにはまだかなりの時間を有すると思われる。地球シミュレータで行われた全球 20km、領域 5km という解像度は、気候モデルとしては画期的な高解像度であったものの、基本的なモデル設計は 2000 年代前半に既に気象庁において現業化されていた解像度 60km の全球静力学モデルと解像度 10km の積雲対流をパラメタライズする領域非静力学モデルの延長であった。現在の気象庁の現業予報システムの解像度が、全球モデルで 20km、局地モデルで 2km、領域 4 次元変分法のインナーモデルが 15km、であることを考えると、6-7 年で 2 倍という現業数値モデルでの解像度の改善ペースが今後も続くとは仮定しても、全球雲解像数値予報モデルやメソサイクロンを解像する領域数値予報モデル、雲を解像するデータ同化、などの現業的な運用の実現には今後まだ 15-20 年を要すると思われる。全球雲解像計算を気候変動予測に応用したり、ビン法雲物理過程や LES を顕著気象の予測計算に応用するには、現在の京の能力はまだ不足している。これらは、その結果から十分な科学的知見を引き出すには例数が少なすぎるが、次世代スパコンでは実現可能であることを例証する重要なフラッグシップ計算と言える。

次世代スパコンでは、京で行われているフラッグシップ計算が、本格的に行えるようになることが期待される。空間解像度の向上とそれに伴うモデルや初期値の不確定性の減少は、気象防災という観点では、時間方向へのダイナミックレンジの拡張を可能にするであろう。熱帯での積雲活動を陽に表現することによる 2 週間先までの天気予報が視野に入ると考えられる。また現在は監視に頼っている 1 時間のレンジでのストームスケールの力学的短時間予測についての本格的な実証実験が可能となる。これらは、現在よりはるかに早い段階での台風の予測や局地的大雨や竜巻をもたらすメソサイクロンの直前予測につながる本格的な実証研究となる。ただし、ストームスケール気象災害の予測の実用化には（気象衛星ラピッドスキャンデータやフェーズドアレイレーダなど）高頻度高密度の観測ビッグデータをいかに同化するかという技術的な問題についての研究の進展やそのようなデータを観測するシステムをどう展開しデータを迅速に収集するシステムの構築が不可欠である。

アンサンブル予報によるあらゆるスケールでの予測誤差の定量評価は、数値モデルによる予測情報の防災的実用価値を大幅に高める。現在は主として実況監視に基づいている災害への警戒情報を、リードタイムに応じた確率的予測情報や最悪シナリオの提示で補えれば、コストとリスクの大きさに基づいた防災対策が可能となり、気象災害に伴う被害を大きく軽減できる可能性がある。ビン法や LES の本格的な計算に基づくバルク法雲物理過程や境界層過程の高度化（grey zone 問題の解決）は、領域数値予報モデルや次世代以降の全球数値予報モデルの改善に重要である。これらの開発研究の一部については、地球シミュレータが全球雲解像モデルの開発に貢献したように、京コンピュータも貢献できる余地がある。

次世代スパコンでは、現在に行えない計算が、フラッグシップ計算として可能になる期待がある。浅い対流を解像する 250m 以下の水平格子間隔での全球計算や全球の雲解像データ同化、粒子フィルタを用いたデータ同化研究、ビン法と LES、ビル解像モデルを組み合わせた領域予

報実験などである。常に最新の解析をその誤差の確率密度とともに保持し、観測データが入る度にそれを随時アップデートしていく解析予測システムが構築されるかもしれない。これらの計算は、気象予測にさらなる質的变化をもたらすだろう。これらの現業化はその実現性を議論できる段階にはないが、Richardson の夢から百年を経て、次世代スパコンが現在の研究者の夢の一部を具現してくれるかもしれない。

(3) コミュニティからの意見

日本気象学会では、専門分科会「ポスト『京』に向けた気象・気候シミュレーションの展望」を 2013 年 5 月 18 日に開催し、「京」の利用経験に基づいた次世代スパコンに向けた数値モデリング・データ同化研究の将来構想やアーキテクチャに関する要望などについての議論を行った。気象・気候科学に関する社会的・科学課題は、本報告の 4.3.1 項に詳しく論じられている。高い風水害リスクを持つ我が国としては、その時代の最高性能の計算機を利用することにより最先端の研究開発をオールジャパンで推進していくことが、将来の減災のために重要である。高精度の気象予測は、総合防災のみならず、再生可能エネルギーの供給や都市の電力需要、放射性物質などの拡散・沈着予測、食糧生産や運輸・交通、国家の安全保障にも関わる重要な課題であることを再度強調しておく。

(4) 計算機要求

次世代スパコンに関わる計算機要求については、適用アプリの具体例を基に、総メモリ量、演算性能、メモリ帯域、ネットワーク性能などの各項目について、本報告の 4.3.1 項の(3)に詳しく述べられている。

地球シミュレータでは行われなかったデータ同化研究の京への適用は、同時に現在の京のような計算機が抱える大きな弱点をも露呈することにつながった。観測データの品質管理や様々なジョブステップで構成されるデータ同化の一連の手続きをこなすには、京の設計思想はあまりにも貧弱で、計算本体よりデータの入出力により多くの実行経過時間を要することもしばしばである。次世代計算機においては、ビッグデータへの対応がますます重要にかつ本質的になるのは疑いようがない。上述の日本気象学会の「ポスト『京』に向けた気象・気候シミュレーションの展望」専門部会では、計算速度のみならずデータ入出が成果を得るまでのスループットを決める重要な要因となってきたことが指摘されたほか、実験結果の可視化やデータマイニングといった後処理を効率的に進めるためにも、高い計算速度に見合った I/O 性能の必要性が強調された。

課題	要求性能 (PFLOPS)	要求メモリ バンド幅 (PB/s)	メモリ量/ ケース (PB)	ストレージ 量/ ケース (PB)	計算時間/ケース (hour)	ケース数	総演算量 (EFLOP)	概要と計算手法	問題規模	備考
高解像度気象予報(全球)	130	360	3	58	340	1	150000	モデル名NICAM, 有限体積法	格子点数: 1兆(水平解像度220m,鉛直94層)、ステップ数: 520万 (dt=1秒、2ヶ月)	10万ノードを仮定(ノードあたり隣接通信1GB/s)
高解像度気象予報(領域)	33	※33	0.09	0.3	0.5	2700	160000	モデル名ASUGA, 有限体積法	格子点数: 7500x7500x500、ステップ数: 13万 (dt=1秒、36時間)	演算量、メモリ量に関しては、SR1600でのプロフィールを元に外挿。メモリアクセス量は、B/F値が1と仮定して見積もった。出力は、25変数は10分毎に出力する。通信に関しては、22500ノードを仮定(ノードあたり隣接通信40GB/s)
局所的・集中的大雨、熱帯気象の高度予測	220	270	0.7	5	580	2	900000	大気モデル-NICAM(有限体積法)、アンサンブルデータ同化-LETKF	水平解像度3.5km、鉛直100層、1000アンサンブルメンバー、3時間おきの同化サイクル、2ヶ月積分	10万ノードを仮定(大気モデルのノードあたり隣接通信1GB/s) 演算量、メモリ転送量、メモリ使用量は、京でのプロフィールを元に外挿

※印の値は未だ精査中である。より精度の高い数値はWeb版(→「1.2. 本文書の構成」)を参照のこと。