

国立国会図書館 調査及び立法考査局

Research and Legislative Reference Bureau
National Diet Library

論題 Title	気象予報による災害予測の現状と課題
他言語論題 Title in other language	Current Situation and Issues of Disaster Prediction by Weather Forecast
著者 / 所属 Author(s)	山下 修弘 (YAMASHITA Nobuhiro) / 国立国会図書館調査及び立法考査局専門調査員 国土交通調査室主任
雑誌名 Journal	レファレンス (The Reference)
編集 Editor	国立国会図書館 調査及び立法考査局
発行 Publisher	国立国会図書館
通号 Number	849
刊行日 Issue Date	2021-9-20
ページ Pages	1-20
ISSN	0034-2912
本文の言語 Language	日本語 (Japanese)
摘要 Abstract	気象観測や数値予報による気象予報は、豪雨災害の軽減等に大きな影響を与えることから、気象業務などを概観し、線状降水帯、土砂災害の危険度分布への近年の取組について考察する。

* この記事は、調査及び立法考査局内において、国政審議に係る有用性、記述の中立性、客観性及び正確性、論旨の明晰（めいせき）性等の観点からの審査を経たものです。

* 本文中の意見にわたる部分は、筆者の個人的見解です。

気象予報による災害予測の現状と課題

国立国会図書館 調査及び立法考査局
専門調査員 国土交通調査室主任 山下 修弘

目 次

はじめに

I 気象の観測と予報

- 1 気象の観測
- 2 数値予報
- 3 気象情報等

II 気象警報等

- 1 気象警報と発表の指標
- 2 気象警報と避難行動

III 近年の気象業務の取組

- 1 線状降水帯の予測
- 2 大雨警報（土砂災害）の危険度分布

おわりに

キーワード：キキクル、線状降水帯、海洋気象観測、土砂災害警戒情報、危険度分布、土壤雨量指数、タンクモデル

要 旨

- ① 災害時における円滑かつ迅速な避難の確保を更に促進するための措置などを含めた、災害対策基本法等の一部を改正する法律（令和3年法律第30号）が令和3年4月に成立し、避難勧告と避難指示の一本化や、警戒レベル5について「緊急安全確保」としての位置付けなどが行われた。
- ② 気象業務により災害の予防などを行う気象庁は、線状降水帯の予測精度向上を最優先課題と位置付けており、令和3年6月から「顕著な大雨に関する情報」（線状降水帯の発生状況）を公表することとした。また、令和3年3月には大雨警報（土砂災害）等の危険度分布に「キキクル」と愛称を付して、危険度を5段階に色分けした地図などが自主的な避難の判断に活用されるよう周知広報に努めるとしている。
- ③ 気象の観測は、アメダスなどによる地上気象観測、レーダー気象観測、衛星による観測、船舶による観測など、多様な手段により実施されている。また、コンピュータによる数値予報では、地球全体を対象とした全球モデルなどで、対象領域を格子状に分割してシミュレーションするなどしている。しかし、数値予報から実際の気象を予報する際に利用する予測値には、統計的に作成されるものもあり、頻度の少ない現象についての予測精度は低くなる。
- ④ 線状降水帯の発生メカニズムについては未解明な部分も多いが、湿った空気の流入に関しての観測が重要とされ、海洋観測の強化などを打ち出して、気象庁や海上保安庁の船舶に新たな計測器を設置して水蒸気量の観測を開始することとしている。海洋の水蒸気量の観測が有効な手段であれば、一般船舶に新たに水蒸気量の観測を依頼することも一法であると思われる。
- ⑤ 土砂災害の危険度分布は、昭和54年の石原・小葉竹の論文を基にして全国で同一のパラメータを用いた「土壌雨量指数」などにより判断されている。一方で、表面雨量指数等は同様の考え方であるが、モデルやパラメータについて修正を加えたり、各箇所の土質に近い複数組のパラメータを利用したりなどしている。より良いと思われるモデル等を検討することは重要と考えられる。
- ⑥ 刻々と変化する気象状況の予測精度を上げることや、土質の状況などのように事前に時間をかけて検討できる情報について見直していくことなど、避難に関する情報を提供する気象予報の精度をより一層向上させるためになすべきことは多い。

はじめに

降雨が局地化・集中化・激甚化の様相を示すなどの自然環境の変化が言われている。これに対応するなどのため、令和3年4月には、災害時における円滑かつ迅速な避難の確保を更に促進するための措置などを含めた、災害対策基本法等の一部を改正する法律（令和3年法律第30号）が成立している⁽¹⁾。そして、内閣府は、令和元年台風第19号等を踏まえた検討の結果⁽²⁾も踏まえ、「避難勧告等に関するガイドライン」について名称を含め改定した「避難情報に関するガイドライン」を公表して⁽³⁾、避難勧告と避難指示（緊急）の一本化⁽⁴⁾、警戒レベル5について「緊急安全確保」として位置付ける⁽⁵⁾改定を行っている。

一方で、気象業務により災害の予防を行うことが任務の一つである気象庁⁽⁶⁾では、平成30年10月に策定した「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」⁽⁷⁾に基づき、数値予報の高度化・精度向上について、技術開発に取り組んでいる。そして、令和2年7月豪雨において、線状降水帯（後述）の予測に関する課題が浮き彫りとなったことを受け、気象庁では線状降水帯の予測精度向上を最優先課題と位置付け、取組を加速していくこととしている⁽⁸⁾。

また、令和3年3月には、大雨による災害発生の危険度の高まりを地図上で確認できる大雨警報（土砂災害）、大雨警報（浸水害）、洪水警報の「危険度分布」の愛称を「キキクル」に決定して、現時点の危険度が5段階に色分けされた地図などが、自主的な避難の判断に活用されるように周知広報に努めるとしている⁽⁹⁾。

* 本稿におけるインターネット情報の最終アクセス日は、令和3年8月12日である。

- (1) 『防災に関してとった措置の概況 令和3年度の防災に関する計画』（第204回国会（常会）提出）（令和3年版防災白書）pp.35-36. <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/pdf/r3_all.pdf>
- (2) 「令和元年台風第19号等を踏まえた避難情報及び広域避難等に関するサブワーキンググループ」で、令和2年6月1日から検討が開始され、避難情報及び広域避難等に関する制度面における改善の方向性について議論し、同年12月24日に「令和元年台風第19号等を踏まえた避難情報及び広域避難等のあり方について（最終とりまとめ）」が公表された（同上、p.40.）。
- (3) 「避難情報に関するガイドラインの改定（令和3年5月）」内閣府防災情報のページ <http://www.bousai.go.jp/oukyu/hinanjouhou/r3_hinanjouhou_guideline/>
- (4) 避難のタイミングを明確にするため、警戒レベル4の避難勧告と避難指示（緊急）を避難指示に一本化した（『防災に関してとった措置の概況 令和3年度の防災に関する計画』前掲注(1), p.41.）。
- (5) 災害が発生・切迫し、警戒レベル4での避難場所等への避難が安全にできない場合に、避難場所等への避難から、自宅や近隣の建物で緊急的に安全確保する行動へと行動変容するよう促す情報を、警戒レベル5「緊急安全確保」として位置付けた（同上、p.41.）。
- (6) 気象庁の任務は、「気象業務の健全な発達を図ることにより、災害の予防、交通の安全の確保、産業の興隆等公共の福祉の増進に寄与するとともに、気象業務に関する国際協力を行う。」とされている。これは、国土交通省設置法（平成11年法律第100号）の第46条では、「気象庁は、気象業務の健全な発達を図ることを任務とする。」とされ、また、気象業務法（昭和27年法律第165号）の第1条では、「この法律は、気象業務に関する基本的制度を定めることによって、気象業務の健全な発達を図り、もつて災害の予防、交通の安全の確保、産業の興隆等公共の福祉の増進に寄与するとともに、気象業務に関する国際的協力を行うことを目的とする。」とされていることから、このように解釈している。「気象庁の任務」気象庁ウェブサイト <<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/intro/gyomu/index1.html>>
- (7) 平成30年8月に、交通政策審議会気象分科会において、観測・予測精度向上に係る技術開発が重点的な取組事項の一つに位置付けられた「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」を受けたものである。
- (8) 気象庁『気象業務はいま2021』2021.6, p.8. <<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/hakusho/2021/HN2021.pdf>> 取組の内容については、観測の強化として、海洋観測の強化、気象レーダーの更新、アメダスへの湿度計導入、ひまわり10号（次期ひまわり衛星）のデータ利用の検討が行われており、予測の改善として、予測技術開発、先進研究への取組が行われている。
- (9) 「「危険度分布」の愛称は「キキクル」」気象庁ウェブサイト <https://www.jma.go.jp/jma/press/2103/17a/20210317_kikendoaishou.html>

このように、気象予報は、特に大雨による土砂災害、洪水、浸水の被害の軽減に大きな影響を与えるものと考えられることから、第Ⅰ章において、気象の観測と予報について概観し、第Ⅱ章において、気象予報に基づく気象警報等について紹介し、第Ⅲ章において、令和3年6月から発表することとされた「顕著な大雨に関する情報」（線状降水帯の発生状況）と、令和元年6月から高解像度化された土砂災害の危険度分布について、これらの取組状況を考察する。

I 気象の観測と予報

1 気象の観測

(1) 地上気象観測

気象庁では、気象台、測候所等（以下、これらを「気象官署」という。）において、気圧、気温、湿度、風向・風速、降水量、日照時間などの地上気象観測を行っている。また、集中豪雨等の局地的な気象現象を把握することを目的として、気象官署を含む全国各地の約1,300か所で、自動観測を行うアメダス⁽¹⁰⁾により、降水量などを観測しており、このうち約840か所では、降水量に加えて、気温、湿度、風向・風速を観測している⁽¹¹⁾。湿度については、令和3年3月から、新たに観測を開始したものである⁽¹²⁾。

(2) レーダー気象観測

気象庁は、全国20か所に設置した気象ドップラーレーダー⁽¹³⁾により、日本の陸上全域と周辺の海洋における降水の分布とその強さを5分ごとに観測している。また気象ドップラーレーダーは、反射されて戻ってくる電波（反射波）のドップラー効果を利用して、風で流される雨粒や雪の動きを観測する機能も備えている。令和元年度からは、降水の強さをより正確に推定することが可能な二重偏波（MP）気象ドップラーレーダー⁽¹⁴⁾への更新が進められている⁽¹⁵⁾。

レーダー観測は、電波の発射から反射波を受信するまでの時間から降水域までの距離を測り、また、受信した反射波の強度から降水強度を観測している⁽¹⁶⁾。レーダーの反射波の強度は、同じ強さの雨であっても、大きい雨粒が多い場合には、小さい雨粒が多い場合よりも大きく観測される⁽¹⁷⁾。二重偏波の気象レーダーは、落下する雨粒が空気抵抗の影響を受けて上下方向

(10) アメダス（Automated Meteorological Data Acquisition System: AMeDAS）は、地域気象観測システムのことであり、昭和49年11月1日に運用を開始している。

(11) 気象庁 前掲注(8), p.76.

(12) この湿度観測により水蒸気監視能力が強化され、線状降水帯の予測に資することが期待されるとしている（同上, p.13.）。

(13) ドップラー効果による反射波の周波数のずれを利用して、雨の動きすなわち降水域の風を観測することができる。ドップラー効果により、降水域がレーダーに近づいている場合には、反射波の周波数は高くなり、逆に遠ざかる場合には、反射波の周波数は低くなる。「気象レーダー」気象庁ウェブサイト <<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/radar/kaisetsu.html>>

(14) 水平偏波と垂直偏波の2種類の電波を同時に使用したドップラーレーダーで、マルチパラメータ（MP）レーダーとも呼ばれる。

(15) 気象庁 前掲注(8), pp.77-78.

(16) 「気象レーダー」前掲注(13)

(17) レーダーの反射波の強度は雨粒の直径の6乗に比例するため、雨粒の直径の3乗に比例する雨量とは単純に正比例しない。例えば、大粒の雨が、落下の途中で空気抵抗などにより分裂した場合には、レーダーの反射波の強度では小さくなって観測される。中島俊夫『よくわかる気象学—イラスト図解専門知識編—』ナツメ社, 2019, pp.154-155.

につぶれ、大きな雨粒ほどつぶれ具合が大きくアンパンのような形になることを利用するなどして、雨粒の粒径分布に関する情報を得ている⁽¹⁸⁾。

気象レーダーについては、地球表面が曲面であるため、レーダーから遠方にある低い高度の雨雲による降雨が観測できないこと、気象レーダーから遠い場所ほど精度は悪くなること、雪が雨に変化する面で、レーダーの反射が特に強くなる⁽¹⁹⁾ことなどの誤差がある⁽²⁰⁾。

(3) 高層気象観測

上空の大気の動きを知る必要があるため、気象庁は、全国 16 地点で毎日 2 回（日本標準時 9 時、21 時）に観測機器（ラジオゾンデ）を気球に吊るして飛揚させ、地上から上空約 30 キロメートルまでの気圧、気温、湿度、風向・風速を観測している⁽²¹⁾。

また、地上から上空に向けて電波を発射し、気流の乱れや雨粒によって散乱されて戻ってきた電波を利用して上空（気象条件により最大 12km 程度）の風向・風速を観測するウィンドプロファイラを全国 33 か所に設置している⁽²²⁾。

(4) 衛星気象観測

静止気象衛星は、赤道上空約 35,800km の静止軌道上に位置しており、地球の自転周期に合わせて周回するため地上から見ると静止して見え、同じ地域を連続して観測できることが強みである。気象庁が運用している静止気象衛星「ひまわり」は、常に東経 140 度付近の上空にあり、日本を含む東アジア・西太平洋地域の範囲を 24 時間、常時観測している。現在は、8 号、9 号の 2 基体制であり、16 の波長帯による 10 分ごとの全球観測に加え、2.5 分ごとの日本周辺観測などを行っている⁽²³⁾。衛星画像の解像度は、可視画像⁽²⁴⁾で 0.5 ～ 1km、赤外画像⁽²⁵⁾と水蒸気画像⁽²⁶⁾は 2km であるが、赤道直下の解像度であり、高緯度になると斜めに撮影することになるため解像度は落ちる⁽²⁷⁾。

また、赤外画像により降水強度の計算が行えるが、背の高い雲により強い降水がもたらされることが多いという統計結果に基づくもので、推定の精度には限界があるとされている⁽²⁸⁾。

(18) 大きな雨粒の多い雨の場合は、水平偏波の方が垂直偏波よりも反射波の強度が大きくなることなどを利用して、「マルチパラメータレーダ（MP レーダ）について」Xバンドマルチパラメータレーダウェブサイト <<http://mp-radar.bosai.go.jp/mpradar.html>>。

(19) 雪から雨粒に融ける途中のみぞれは、雨粒よりも大きく、液体に覆われているため、雪や雨粒よりもレーダー波をよく反射して、この層からの反射波が局所的に強く観測されることがある（「気象レーダー」前掲注(13)）。

(20) 中島 前掲注(17), pp.168-169.

(21) 気象庁 前掲注(8), p.78.

(22) 同上, p.79.

(23) 同上, pp.126-127.

(24) 可視画像は、雲などによって反射された太陽光線を観測しており、雨を伴うような発達した雲がより白く写る。夜間は太陽光の反射がないため観測できない。「衛星観測画像の見方」気象庁ウェブサイト <https://www.data.jma.go.jp/sat_info/himawari/satobs.html>

(25) 赤外画像は、雲、地表面などから出ている赤外線を観測しており、雲の温度の違いなどで画像の明暗が出る。しかし、集中豪雨をもたらす積乱雲のような厚い雲も、晴れた日の高層に薄く現れる雲も、温度が低く、同様に白く写る。同上

(26) 水蒸気画像は、水蒸気によく吸収され、同時に放射される帯域の赤外線を利用して。雲がないところでも、上層、中層での水蒸気からの放射を観測して、水蒸気の多寡で画像の明暗が出る。同上

(27) 中島 前掲注(17), p.126.

(28) 瓜田真司「10 人工衛星による地球環境と降水量の把握」松山洋・増田耕一編『大気と水の循環—水文気象を学ぶための 14 講—』朝倉書店, 2021, pp.80-81.

静止気象衛星以外には、南極及び北極の付近を通り、高度約 800～1,000km と静止衛星よりも低高度を短い周期で周回している極軌道気象衛星の画像の利用⁽²⁹⁾や、全球測位衛星システム (GNSS)⁽³⁰⁾の電波が、空気中の水蒸気が多いほど地上の受信機への到達が遅くなることを利用して、大気の水蒸気量を把握する⁽³¹⁾など、衛星を用いた観測が実施されている。

(5) 海洋気象観測

気象庁では、北西太平洋域 (日本近海から赤道や日付変更線までの海域) において、海洋気象観測船 2 隻⁽³²⁾による海洋気象観測を季節ごとに実施し、気候・海洋変動の監視に当たっている。気象予報の予測精度向上には、台風や線状降水帯の発生・発達に必要な水蒸気量や熱の供給源である海洋の状況を精度良く把握することが必要であり、そのための観測船の能力の充実・強化がますます重要としている⁽³³⁾。

また、一般の船舶による気象観測・通報に関して、気象業務法 (昭和 27 年法律第 165 号) などにより、無線電信を施設することを要する船舶などに対して、必要な気象観測測器を備え付けること、観測を実施すること、観測成果を気象庁に報告することを義務付けている。観測の内容は、気圧、海面水温、露点温度、風向・風速、天気などで、検定を受けた気象機器を用いて、海域により 3 時間おきに観測を行うなどして、船舶気象報として気象庁に報告することとされている⁽³⁴⁾。

2 数値予報

数値予報とは、コンピュータを用いて地球大気や海洋・陸地の状態の変化を数値シミュレーションによって予測するものである。具体的には、最初に予測領域を格子に分割し、観測データなどに基づき、それぞれの格子の中心 (格子点) に、初期時刻の気温、風などの気象要素や海面水温・地面温度などの値 (初期値) をあてる。次に、初期時刻の状態から、物理学や化学の法則に基づいた予測式⁽³⁵⁾を用いて、1 分後、2 分後などの刻み (計算時間ステップ) で時間変化を計算して、これを繰り返すことにより数時間後、1 日後などの状態を予測するものである⁽³⁶⁾。そして、次の予報の開始時刻に実測値と比較することなどにより、新しい初期値を設定し、再度計算を繰り返すことにより数値予報を更新していく。

⁽²⁹⁾ 「静止気象衛星と極軌道気象衛星」気象衛星センターウェブサイト <<https://www.data.jma.go.jp/mscweb/ja/general/geopolar.html>> 極軌道気象衛星は、地球上のある地点からみると、1 日 2 回程度その地点の近傍上空を通る。静止気象衛星に比較して低高度であるため、高解像度の画像が得られる一方で観測範囲は狭い。

⁽³⁰⁾ GNSS (Global Navigation Satellite System. 全球測位衛星システム) は、米国の GPS、日本の準天頂衛星 (QZSS)、ロシアの GLONASS、欧州連合の Galileo 等の衛星測位システム (地球上の現在位置を測定するためのシステム) の総称である (「GNSS とは」国土地理院ウェブサイト <https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi_aboutGNSS.html>)。

⁽³¹⁾ 中島 前掲注(17), p.103. なお、国土地理院が全国に約 1,200 か所の観測所を設置して GNSS による水蒸気量の観測を行っている (釜堀弘隆・川村隆一『トコトン図解気象学入門』講談社, 2018, pp.183-184.)。

⁽³²⁾ 「凌風丸」(平成 7 年竣工) 及び「啓風丸」(平成 12 年竣工) (気象庁 前掲注(8), p.48.)。

⁽³³⁾ 同上, p.48.

⁽³⁴⁾ 気象庁『船舶気象観測指針 改訂第 8 版』2019, p.1. <<https://marine.kishou.go.jp/brochure/guide-jp.pdf>>

⁽³⁵⁾ 基礎方程式には、水平方向の運動方程式、鉛直方向の運動方程式又は静力学平衡の式、連続の式 (質量保存の式)、熱力学方程式、水蒸気の予測式などがある (気象庁情報基盤部『令和 2 年度数値予報解説資料集 (数値予報課)』2021.2, p.36. <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpkaisetu/53/No53_all.pdf>)。

⁽³⁶⁾ 気象庁 前掲注(8), pp.120-121.

(1) 数値予報モデル

数値予報の計算に用いるプログラムを数値予報モデルと呼んでおり、気象庁では、19の数値予報モデルを運用している(令和3年3月現在)⁽³⁷⁾。気象予報に関する代表的なものとしては、地球全体を対象領域として大気の状態を予測する全球モデル、全球モデルより計算を行う格子点の間隔を細かくしたメソモデル、更に細かくした局地モデルがある。

全球モデルは、水平方向の格子点間隔は約20kmであり、鉛直方向には0.01hPaの高さ⁽³⁸⁾まで100層⁽³⁹⁾に分けていて、地球全体が予測対象領域である。6時間ごとに1日4回、132時間先(5日半先)までの予測などが行われている。

メソモデルは、格子点間隔は5kmであり、鉛直方向には約22kmの高さまで76層に分けていて、日本周辺が予測対象領域である。3時間ごとに1日8回、39時間先までの予測などが行われている。

局地モデルは、格子点間隔は2kmであり、鉛直方向には約20kmの高さまで58層に分けていて、日本付近であるがメソモデルよりも狭い範囲が予測対象領域である。1時間ごとに1日24回、10時間先までの予測が行われている⁽⁴⁰⁾。(表参照)

表 数値予報モデルの例

名称	格子点間隔 (鉛直方向の層数)	予測時間 (時刻：日本標準時)	実行回数 (1日)	主な利用目的
全球モデル	水平方向 約20km (鉛直方向 100層)	132時間(3時、15時) 264時間(9時、21時)	4回	府県天気予報、台風予報、週間天気予報、メソモデルの境界条件など
メソモデル	水平方向 5km (鉛直方向 76層)	39時間(0時、3時、6時、 12時、15時、18時) 51時間(9時、21時)	8回	防災気象情報、降水短時間予報、府県天気予報、局地モデルの境界条件など
局地モデル	水平方向 2km (鉛直方向 58層)	10時間(毎時)	24回	防災気象情報、降水短時間予報など

(出典) 気象庁『気象業務はいま2021』2021.6, p.122. <<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/hakusho/2021/HN2021.pdf>>; 同『気象庁ガイドブック2021』2021.4, p.59. <<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/jma-guidebook/GideBook2021.pdf>>を基に筆者作成。

(2) 格子点の間隔

数値予報で表現できる現象(雨など)は、一般に格子点間隔の5倍から8倍程度⁽⁴¹⁾の大きさの現象と言われている。前記のように、数値予報モデルの全球モデルは格子点間隔が約20kmであることから、100kmから150km程度以上の現象を表現でき、広がり数千km前後の高気圧や低気圧、台風等の現象を予測している。また、メソモデルは格子点間隔が5kmで

⁽³⁷⁾ 同上, p.122.

⁽³⁸⁾ 全球モデルの場合、鉛直方向には高度による座標ではなく、気圧による座標を用いている。なお、気圧はヘクトパスカル(hPa)の単位で表されていて、ヘクトは100倍を表す接頭辞、パスカルは圧力の単位で、1パスカルは1m四方に1ニュートンの圧力と定義されている。

⁽³⁹⁾ 全球モデル、メソモデル、局地モデルとも、鉛直方向の格子間隔は均等ではなく、下層ほど格子点の間隔が狭く、上層ほど間隔が広がっている。大気の下層ほど地表面(海面を含む)と大気との間の熱や水蒸気の移動、地表面摩擦などの影響を考慮しなければならないからである。中島 前掲注(17), p.238.

⁽⁴⁰⁾ 気象庁 前掲注(8), pp.120-122; 同『気象庁ガイドブック2021』2021.4, pp.57-59. <<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/jma-guidebook/GideBook2021.pdf>>

⁽⁴¹⁾ 中島 前掲注(17), pp.228-229. 空気の波状の動きを観測するには、観測点が5か所程度は必要である。

あることから、25km から 40km 程度以上の現象を表現でき、広がり数百 km 前後の豪雨をもたらす梅雨前線や集中豪雨等の現象を予測している。さらに、局地モデルは格子点間隔が 2km であることから、10km から 15km 程度以上の現象を表現でき、広がり数十 km から数百 km 程度の豪雨をもたらす現象等を予測しているが、積乱雲は広がり 10km 程度であるため予測が困難である⁽⁴²⁾。

格子点は、モデル計算上の区切りであり自由に設定できることから、この格子点の間隔を仮に 1km にすれば 10km 程度の積乱雲のような現象も捉えることができるはずであるが、格子点の間隔を短くすることにより、計算量が莫大に増えるため、実際には利用されていない⁽⁴³⁾。

格子点の間隔を半分にすると、水平方向、鉛直方向で 2 の 3 乗である 8 倍の格子点の計算を行う必要がある上に、格子点の間隔を短くした場合には、一般に計算における時間間隔の計算時間ステップも短くしなければならず⁽⁴⁴⁾、16 倍程度の計算量となると考えられる。

(3) ガイダンス

数値予報は格子点の予測値を計算しているが、これらは風、気温、湿度などの気象情報の膨大な数値データである⁽⁴⁵⁾。これらの膨大な予測値のうち予報に大きな影響のある要素を可視化した図を予報官が見ることにより、今後の気象状況の推移が検討されるが、発表すべき天気予報や防災情報など多くの予報を迅速に行うために、数値予報に統計的な後処理を行った量的な予測値（降雨量など）を直接示す資料（ガイダンス）が作成されている⁽⁴⁶⁾。

ガイダンスでは、過去の一定期間の数値予測データと実際の観測データから作成する、統計的關係式が利用されている。したがって、統計的關係式の作成に用いた過去の一定期間においてほとんど発生しなかった現象（頻度の少ない大雨など）については予測精度が低く、また、一度も起きたことがない現象に対してガイダンスを用いて予測することは適切ではないとされている⁽⁴⁷⁾。

3 気象情報等

以上のような気象の観測や数値予報により、気象庁が発表している降水に関する比較的短期間の情報について、以下のようなものがある。

(1) 解析雨量図

気象庁・国土交通省が保有する気象レーダー⁽⁴⁸⁾の観測データと、気象庁・国土交通省・地方自治体が保有する全国の雨量計のデータを組み合わせて、1 時間の降水量の分布を 1km 四方

(42) 気象庁情報基盤部 前掲注(35), pp.126-127.

(43) 中島 前掲注(17), pp.230-231.

(44) 安定な計算を行うため、格子点間隔と計算時間ステップと風速との関係があり、格子点間隔を半分にするれば、計算時間ステップも半分（例えば 2 分を 1 分へ）程度にする必要がある（気象庁情報基盤部 前掲注(35), p.42.）。

(45) 2018 年時点での気象庁の全球モデル、局地モデルでは一億以上の格子点が設定されている。

(46) 気象庁予報部『ガイダンスの解説』（数値予報課報告・別冊第 64 号）2018.3, p.3. <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpreport/64/No64_all.pdf>

(47) 気象庁情報基盤部 前掲注(35), p.66.

(48) 国土交通省が整備しているレーダーは、令和 2 年 3 月末時点で、全国で C バンド（波長が約 5cm）レーダーが 26 基、X バンド（波長が約 3cm）MP レーダーが 39 基ある（国土交通省水管理・国土保全局『河川データブック 2021』2021.7, pp.39-41. <https://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen_db/pdf/2021/0-1all.pdf>）。

のメッシュの画像で表したものが解析雨量図である。気象レーダーで観測した降水量の推定値を、近隣の雨量計で観測された降水量の実測値で補正⁽⁴⁹⁾している。解析雨量図には、30分ごとに作成される解析雨量図と、10分ごとに作成される速報版解析雨量図とがある⁽⁵⁰⁾。

(2) 降水短時間予報

降水短時間予報は、1時間降水量を15時間先まで予報しているもので、6時間先までと7時間先から15時間先までとで発表間隔や予測手法が異なっている⁽⁵¹⁾。

6時間先までは10分間隔で発表され、各1時間降水量を1km四方のメッシュで予報しているもので、解析雨量図の降水量分布を利用して降水域の移動速度を把握し、直前の降水分布を移動させて作成している。予報時間が延びるにつれて、降水域の位置や強さのずれが大きくなるので、予報時間の後半には数値予報による降水予測の結果も加味している。

7時間先から15時間先までは1時間間隔で発表され、各1時間降水量を5km四方のメッシュで予報しているもので、数値予報モデルのうち、メソモデルと局地モデルを統計的に処理した結果を組み合わせ、降水量分布を作成している⁽⁵²⁾。

(3) 降水ナウキャスト

降水ナウキャストは、降水短時間予報より短い5分間隔で作成される情報で、1時間先までの5分ごとの降水の強さを1km四方のメッシュで予報している⁽⁵³⁾。

降水ナウキャストによる予測には、レーダー観測やアメダス等の雨量計データから求めた降水の強さの分布及び降水域の発達や衰弱の傾向、過去1時間程度の降水域の移動や地上・高層の観測データから求めた移動速度を利用して、降水域の移動の状態が変化しないと仮定して、降水の強さに発達・衰弱の傾向を加味して、降水の分布を移動させて計算している。そのため、新たに発生する降水域等を予測に反映することはできない⁽⁵⁴⁾。

(4) 高解像度降水ナウキャスト

高解像度降水ナウキャストは、気象庁の気象ドップラーレーダーの観測データに加え、気象庁・国土交通省・地方自治体が保有する全国の雨量計のデータ、ウィンドプロファイラやラジオゾンデの高層観測データ、国土交通省のレーダーのデータも活用して、250m解像度の降水分布を30分先まで予報⁽⁵⁵⁾している。上記の降水ナウキャストが2次元で予測するのに対し、高解像度降水ナウキャストでは、予報時間の前半においては3次元的に降水分布を追跡する手法で、予報時間の後半にかけては気温や湿度等の分布に基づき雨粒の発生や落下等を計算する

(49) 雨量計は正確な雨量を観測するが、レーダーは雨粒の電波の反射の強度により雨量を推定しているため、雨量計の観測に比較すると精度が落ちる。

(50) 「解析雨量」気象庁ウェブサイト <<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/kurashi/kaiseki.html>>

(51) 7時間先から15時間先までの予測手法は6時間先までの予測手法と異なることから、「降水15時間予報」と呼ぶこともある。

(52) 「降水ナウキャスト、降水短時間予報」気象庁ウェブサイト <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/kurashi/kotan_nowcast.html#kotan>

(53) 気象庁ウェブサイトでの降水ナウキャストの表示は令和3年2月24日に終了した。

(54) 「降水ナウキャスト、降水短時間予報」前掲注(52)

(55) 予報時間35分先から60分先までは、30分先までと同じアルゴリズムで予測した1kmメッシュの解像度の予報を行っている。

モデルを用いた予測を行っている。積乱雲の発生予測にも取り組んでいて、地表付近の風、気温及び水蒸気量から積乱雲の発生を推定する手法などを用いて、発生位置を推定している⁽⁵⁶⁾。

Ⅱ 気象警報等

1 気象警報と発表の指標

気象庁は、大雨や暴風などによって発生する災害の防止・軽減のため、気象警報・注意報などの防災気象情報を発表している⁽⁵⁷⁾。

気象庁が発表する気象警報・注意報と、そのうちの降雨に関するものは、次のようになっている⁽⁵⁸⁾。

- ① 注意報：災害が発生するおそれのあるときに注意を呼びかけて行う予報（16種類⁽⁵⁹⁾）
 - ・大雨注意報：大雨による土砂災害や浸水害が発生するおそれがあると予想したときに発表し、雨がやんでも土砂災害等のおそれが残っている場合には、発表を継続する。
 - ・洪水注意報：河川の上流域での大雨や融雪によって下流で生じる増水により洪水災害が発生するおそれがあると予想したときに発表し、対象となる洪水災害として、河川の増水及び堤防の損傷、並びにこれらによる浸水害が挙げられる。
- ② 警報：重大な災害が発生するおそれのあるときに警戒を呼びかけて行う予報（7種類⁽⁶⁰⁾）
 - ・大雨警報：大雨による重大な土砂災害や浸水害が発生するおそれがあると予想したときに発表し、特に警戒すべき事項を標題に明示して「大雨警報（土砂災害）」、「大雨警報（浸水害）」又は「大雨警報（土砂災害、浸水害）」のように発表する。雨がやんでも重大な土砂災害等のおそれが残っている場合には、発表を継続する。
 - ・洪水警報：河川の上流域での大雨や融雪によって下流で生じる増水や氾濫により重大な洪水災害が発生するおそれがあると予想したときに発表する。
- ③ 特別警報：警報の発表基準をはるかに超える大雨等が予想され、重大な災害が発生するおそれが著しく高まっている場合に、最大級の警戒を呼びかける予報（6種類⁽⁶¹⁾）
 - ・大雨特別警報：台風や集中豪雨により数十年に一度の降雨量となる大雨が予想される場合に発表し、特に警戒すべき事項を標題に明示して「大雨特別警報（土砂災害）」、「大雨特別警報（浸水害）」又は「大雨特別警報（土砂災害、浸水害）」のように発表する。

雨に関する警報は、「雨量」のみを用いて危険度を評価し、発表を判断していたが、平成20年から「雨量」に加え、土砂災害や洪水害の危険度を評価する指標として「土壌雨量指数」⁽⁶²⁾

⁽⁵⁶⁾ 「高解像度降水ナウキャスト」気象庁ウェブサイト <<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/nowcast.html>>

⁽⁵⁷⁾ 「気象警報・注意報」同上 <<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/bosai/warning.html>>

⁽⁵⁸⁾ 「気象警報・注意報の種類」同上 <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/bosai/warning_kind.html>

⁽⁵⁹⁾ 大雨、洪水、大雪、強風、風雪、波浪、高潮、雷、濃霧、乾燥、なだれ、着水、着雪、融雪、霜、低温各注意報の16種類

⁽⁶⁰⁾ 大雨、洪水、大雪、暴風、暴風雪、波浪、高潮各警報の7種類

⁽⁶¹⁾ 大雨、大雪、暴風、暴風雪、波浪、高潮各特別警報の6種類

⁽⁶²⁾ 降雨による土砂災害危険度の高まりを把握するための指標であり、これまでの降雨が土壌中に水分量としてどれだけ溜まっているかを示すもの（「土壌雨量指数」気象庁ウェブサイト <<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/bosai/dojoshisu.html>>）。

及び「流域雨量指数」⁽⁶³⁾を導入している。平成 29 年 7 月からは「表面雨量指数」⁽⁶⁴⁾の導入などにより、土砂災害・洪水害・浸水害の危険度をこれらの三つの「指数」で評価し、警報の判断を行っている⁽⁶⁵⁾。

2 気象警報と避難行動

災害対策基本法（昭和 36 年法律第 223 号）第 60 条第 1 項では、市町村長は、災害が発生し、又は発生するおそれがある場合において、地域の居住者等に対し避難のための立退きを指示することができる⁽⁶⁶⁾とされている。そして、内閣府は、市町村等が発出する避難情報等について、災害のおそれがある状況などに応じて段階的に分類した警戒レベル等に関するガイドラインを改定している⁽⁶⁷⁾。最高レベルである警戒レベル 5（緊急安全確保）は、災害発生又は切迫している状況で、命の危険があるため直ちに安全確保すべき段階であり、警戒レベル 4（避難指示）は、災害のおそれが高い状況で、危険な箇所から全員避難するべき段階であるなどとされている⁽⁶⁸⁾。

気象庁は、大雨特別警報は、地元の自治体が緊急安全確保を発令する判断材料となる警戒レベル 5 相当の情報、土砂災害警戒情報（後述）は、地元の自治体が避難指示を発令する目安となる警戒レベル 4 相当の情報などとしている⁽⁶⁹⁾。

このように、避難指示等の制度の整理が行われている一方で、避難指示・勧告⁽⁷⁰⁾という命令・依頼の文章が発出されているにもかかわらず、避難する人が少ないという深刻な問題があると言われている。この問題の原因の一つが、避難指示・勧告の評価が、避難が実現したかではなく、その指示を発令したかどうかという基準で行われる傾向があり、「発令せずに批判を受けるよりは、とりあえず発令しておこう」という態度が醸成されると、現実的な実効性に疑問を抱かれる事態が生じることであるとされる⁽⁷¹⁾。避難指示・勧告が、現実的な実効性に疑問を抱かざるを得ないほど多くの人々を対象に連発される事態が生じていることについての疑問も出されている⁽⁷²⁾。また、多数の避難者を受け入れる避難場所が十分にあるのかも疑問であり、

63 河川の上流域に降った雨により、どれだけ下流の対象地点の洪水危険度が高まるかを把握するための指標である（「流域雨量指数」同上 <<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownbosai/ryuikishisu.html>>）。

64 短時間強雨による浸水危険度の高まりを把握するための指標である（「表面雨量指数」同上 <<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownbosai/hyomenshisu.html>>）。

65 太田琢磨「土壌雨量指数・表面雨量指数・流域雨量指数の概要と基準の設定方法について」（気象等の情報に関する講習会 資料）2018.2.28, p.4. 同上 <<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/minkan/koushu180228/shiryou1.pdf>>

66 災害対策基本法第 60 条第 1 項は「災害が発生し、又は発生するおそれがある場合において、人の生命又は身体を災害から保護し、その他災害の拡大を防止するため特に必要があると認めるときは、市町村長は、必要と認める地域の居住者等に対し、避難のための立退きを勧告し、及び急を要すると認めるときは、これらの者に対し、避難のための立退きを指示することができる。」から、「災害が発生し、…市町村長は、必要と認める地域の必要と認める居住者等に対し、避難のための立退きを指示することができる。」と令和 3 年 5 月に改正されている（「災害対策基本法等の一部を改正する法律新旧対照条文」 p.19. 内閣府防災情報のページ <http://www.bousai.go.jp/taisaku/kihonhou/pdf/r3_01_taisyohyou.pdf>）。

67 「避難情報に関するガイドラインの改定（令和 3 年 5 月）」前掲注(3)

68 内閣府（防災担当）『避難情報に関するガイドライン』2021.5, p.26. <http://www.bousai.go.jp/oukyu/hinanjouhou/r3_hinanjouhou_guideline/pdf/hinan_guideline.pdf>

69 「気象警報・注意報」前掲注(57)

70 災害対策基本法が令和 3 年 5 月に改正される前は、「避難勧告」という制度があった。

71 矢守克也「第 4 章 防災における「予測」の不思議なふるまい」山口富子・福島真人編『予測がつくる社会—「科学の言葉」の使われ方—』東京大学出版会, 2019, pp.101-102.

72 矢守克也『天地海人—防災・減災えっせい辞典—』ナカニシヤ出版, 2017, p.19. 避難勧告・指示のおかげで被害が低減されている一面はあるが、平成 26 年の台風第 18 号（10 月 6 日静岡県浜松市付近に上陸）では全国で合計約 365 万人に避難指示・勧告が発令されている一方で、死者・行方不明者は全国で 7 名であり、同年の台風第

避難場所が押し寄せた人によってパンク状態にもなっていたとされる⁽⁷³⁾。

このように、広い範囲に避難情報を出すなどすると、災害を予測したにもかかわらず実際に災害が起きなかった「空振り」が増える結果となり、避難行動に結びつかないおそれがあり（いわゆるオオカミ少年効果）、対象範囲をより限定し、災害予測の信頼度をより一層上げるなど、予測精度を高めることも必要と考えられる。例えば、気象庁では、気象予報ではないが、東日本大震災後に、活発な余震活動に伴い、異なる場所でほぼ同時に発生した地震が一つの地震として処理されるなど、緊急地震速報が適切に発表できていないことについて、小規模の地震を計算対象から外すようソフトウェアの改善を図った⁽⁷⁴⁾ことが挙げられる。

避難行動を確実なものとするために、前記のように内閣府は避難情報の発出のガイドラインを見直すなど伝え方の工夫を行うほか、「防災気象情報の伝え方に関する検討会」⁽⁷⁵⁾が令和3年4月に出した報告書では、気象庁は、防災気象情報の信頼度を維持するために、数値予報モデルの物理過程の改良、新規データの利用拡充等、継続的な予報精度の向上に努める⁽⁷⁶⁾こととされている。

Ⅲ 近年の気象業務の取組

1 線状降水帯の予測

(1) 顕著な大雨に関する情報

毎年のように線状降水帯による顕著な大雨が発生し、数多くの甚大な災害が生じており⁽⁷⁷⁾、災害発生の危険度の高まりにつながるものとされている。気象庁は、「防災気象情報の伝え方に関する検討会」が令和3年4月に出した報告書⁽⁷⁸⁾を受け、令和3年6月17日から、「線状降水帯」というキーワードを使って解説する情報として「顕著な大雨に関する情報」⁽⁷⁹⁾を発表

19号（10月13日鹿児島県枕崎市付近に上陸）では全国で合計約181万人に避難指示・勧告が発令されている一方で、死者・行方不明者は全国で3名であったとしている。

⁽⁷³⁾ 饒村曜「気象災害から学ぶ（132）」『近代消防』58(1), 2020.1, p.88. 令和元年台風第19号により、東京都の5区（墨田・江東・足立・葛飾・江戸川）だけで165万人、21都県では1000万人以上に対し、避難指示や避難勧告が出され、首都圏では避難場所に押し寄せた人でパンクする事態が起きている。

⁽⁷⁴⁾ 「緊急地震速報の改善について」2011.8.10. 気象庁ウェブサイト <https://www.jma.go.jp/jma/press/1108/10a/cew_kaizen.html>

⁽⁷⁵⁾ 平成30年7月豪雨において、防災気象情報の段階的な発表、早い段階からの嚴重な警戒の呼びかけ、避難勧告等の呼びかけなどが必ずしも住民の避難行動につながらず、甚大な水害や土砂災害が広域に発生したことを受けて、同年11月に学識者に加え、報道関係者、自治体関係者、関係省庁により防災気象情報の伝え方の改善方策を検討するために設置された検討会である（「防災気象情報の伝え方に関する検討会」同上 <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kentoukai/tsutaekata/tsutaekata_kentoukai.html>）。

⁽⁷⁶⁾ 「防災気象情報の伝え方の改善策と推進すべき取組 参考資料」防災気象情報の伝え方に関する検討会『防災気象情報の伝え方の改善策と推進すべき取組』2021.4.28, p.[参考資料]25. 同上 <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kentoukai/tsutaekata/report3/tsutaekata_report3.pdf>

⁽⁷⁷⁾ 線状降水帯が発生した主な豪雨災害として、令和2年7月九州を中心とした豪雨、平成30年7月西日本豪雨、平成29年7月九州北部豪雨、平成27年9月関東・東北豪雨、平成26年8月広島土砂災害、平成25年10月伊豆大島土石流災害がある（「線状降水帯予測、10年計画で挑む 気象庁、困難克服なるか」『日本経済新聞』（電子版）2020.10.6. <<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO64686520W0A001C2CC1000/>>）。

⁽⁷⁸⁾ 「防災気象情報の伝え方の改善策と推進すべき取組」防災気象情報の伝え方に関する検討会 前掲注⁽⁷⁶⁾, pp.6-7.

⁽⁷⁹⁾ 発表の基準は、①解析雨量（5kmメッシュ）において前3時間積算降水量が100mm以上の分布域の面積が500km四方以上、②形状が線状（長軸・短軸比2.5以上）、③領域内の前3時間積算降水量最大値が150mm以上、④領域内の土砂キキクル（大雨警報（土砂災害）の危険度分布）において土砂災害警戒情報の基準を実況で超過（かつ大雨特別警報の土壌雨量指数基準値への到達割合8割以上）又は洪水キキクル（洪水警報の危険度分布）において警報基準を大きく超過した基準を実況で超過の全ての条件を満たした場合としている。

することとし、大雨による災害発生の危険度が急激に高まっている中で、線状の降水帯により非常に激しい雨が同じ場所で降り続けている状況を発表している。これは警戒レベル相当情報を補足する情報であり、警戒レベル4（自治体から避難指示が出るレベル）相当以上の状況で発表されている⁽⁸⁰⁾。

一方で、この情報は線状降水帯の「予測」ではなく、「発生」が確認されてから出されるもので、発表時には、既に大雨となり状況が悪化していて、屋外への避難は難しい状況が予想されるという報道がある⁽⁸¹⁾。また、気象庁も、「顕著な大雨に関する情報」が未発表でも甚大な災害が発生する場合⁽⁸²⁾や、発表後に雨雲が急速に衰弱して重大な災害が発生しない場合もあることを留意点に挙げている⁽⁸³⁾。

(2) 観測の強化

線状降水帯の発生メカニズムについては未解明な部分も多く、今後も継続的な研究が不可欠であるとしているが、基本的には低層を中心に大量の暖かく湿った空気の流入が持続し、その空気が局地的な前線や地形などの影響で上昇して積乱雲が発達して、この積乱雲群が線状に並ぶ状況であるとされている⁽⁸⁴⁾。そのため、観測の強化としては、湿った空気の流入に関して、海洋観測の強化、アメダスへの湿度計の設置などが挙げられている⁽⁸⁵⁾。

気象庁は、特に観測点が少ない海洋について、海洋観測の強化を打ち出しており、気象庁観測船（前記の2隻）と海上保安庁測量船（4隻）に海洋の水蒸気を捉えるための自動計測のGNSS観測装置を設置し、順次観測を開始することとしている。気象庁観測船については、6月下旬～7月中旬はターゲット海域（九州の西～南東の沖合）を中心に、水蒸気の供給が多く予測される場所に移動する機動的な観測（GNSS観測と高層観測）を実施し、海上保安庁測量船については、測量海域内でのGNSS観測を一定期間継続して実施する予定としている⁽⁸⁶⁾。

また、アメダスへの湿度計の設置については、令和3年3月から新たに湿度の観測を開始している。

(3) 更なる海洋での気象観測の可能性

前記のように、気象業務法では、一般船舶の気象観測が義務付けられている。船舶における気象観測は船舶の航行安全を主要な目的とするもので、観測が直ちに自船の航行保安に役立つばかりでなく、気象衛星や気象レーダー、陸上における観測などとともに気象や波浪の解析・予報に利用され、再び船舶の航行保安に役立てられ、また、陸上の国民生活に影響を及ぼす気象災害の防止・軽減に重要な貢献をしている⁽⁸⁷⁾とされている。

⁽⁸⁰⁾ 「顕著な大雨に関する情報」気象庁ウェブサイト <<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/kenchoame.html>>

⁽⁸¹⁾ 若林勇希「“あれこれ情報出すのはやめて” 気象庁検討会で何が」2021.6.4. NHK ウェブサイト <<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20210604/k10013065871000.html>>

⁽⁸²⁾ 例えば、令和2年7月豪雨の岐阜県及び長野県は、大雨特別警報が出されているが、顕著な大雨に関する情報の発表基準は満たしていない（気象庁大気海洋部「令和3年出水期に向けた勉強会—顕著な大雨に関する情報について—」2021.5, p.21. <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/minkan/tsutaekata_ooame.pdf>）。

⁽⁸³⁾ 同上, p.20.

⁽⁸⁴⁾ 「顕著な大雨に関する情報」前掲注⁽⁸⁰⁾

⁽⁸⁵⁾ 気象庁 前掲注⁽⁸⁾, p.8.

⁽⁸⁶⁾ 気象庁「船舶 GNSS 機動観測の運用方法について」（線状降水帯予測精度向上ワーキンググループ（第2回会合）資料3）2021.5.24. <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kondankai/senjokousuitai_WG/part2/part2-shiryos3.pdf>

⁽⁸⁷⁾ 気象庁 前掲注⁽³⁴⁾, p.1.

そして、船舶による海洋の気象観測データは、天気予報など防災への利用を目的としていることから、使用する気圧計、温度計、湿度計、風速計などは検定を受けた測器を用いるなどとされている⁽⁸⁸⁾。

一方で、令和3年6月から開始された「顕著な大雨に関する情報」については、沖縄県、東京都、鳥取県、島根県、鹿児島県など、広範な地域で発表されている。このようにいわゆる線状降水帯の発生地が広域であることから、海洋の水蒸気量の把握が線状降水帯の発生予測に有効な情報であることが判明した場合には、海洋での観測を広域で行うことがより重要になると考えられる。

海洋の広域での水蒸気量の観測については、一般船舶に気象業務法で義務付けられた観測に加えて、新たに水蒸気量の観測を依頼することなども一つの方法と思われ、海に囲まれた日本の気象観測がより一層的確に行われることが期待できると考えられる。

2 大雨警報（土砂災害）の危険度分布

(1) 危険度分布の高解像度化（メッシュの細分化）

大雨警報（土砂災害）の発表後、命に危険を及ぼす土砂災害がいつ発生してもおかしくない状況となったときに、市町村長の避難指示の発令判断や住民の自主避難の判断を支援するよう、対象となる市町村を特定して警戒を呼びかけるため、都道府県と気象庁が共同で土砂災害警戒情報を発表している。そして、土砂災害警戒情報が発表された市町村内で危険度が高まっている詳細な領域は大雨情報（土砂災害）の危険度分布（土砂キキクル）で示されている。土砂キキクルでは、大雨による土砂災害発生の危険度の高まりを、地図上で領域（メッシュ）ごとに5段階に色分けして示している⁽⁸⁹⁾。

気象庁は、平成25年に土砂災害警戒に関する情報の発表を開始してから、5km四方のメッシュで危険度の判定を行っていたが、令和元年6月からは1km四方のメッシュごとに危険度の判定を行っており、土砂キキクルでも高解像度化（1kmメッシュの細かさで色分けした地図を表示）を図っている。これにより、避難が必要な範囲をよりの確に示すことが可能になり、市町村が避難指示等を発令する際の対象地域の絞り込みの支援につながっているとしている⁽⁹⁰⁾。

(2) 危険度の判定方法

上記の5段階の色分けについては、土壌雨量指数⁽⁹¹⁾等の2時間先までの予測値が「注意報基準未満の場合」（無色：今後の情報等に留意）、「注意報基準以上となる場合」（黄色：注意）、「警報基準以上となる場合」（赤色：警戒）、「土砂災害警戒情報の基準以上となる場合」（うす紫色：非常に危険）及び、土壌雨量指数等の実況値が「すでに土砂災害警戒情報の基準以上となった場合」（濃い紫色：極めて危険）に対応している。

⁽⁸⁸⁾ 同上, pp.1-2.

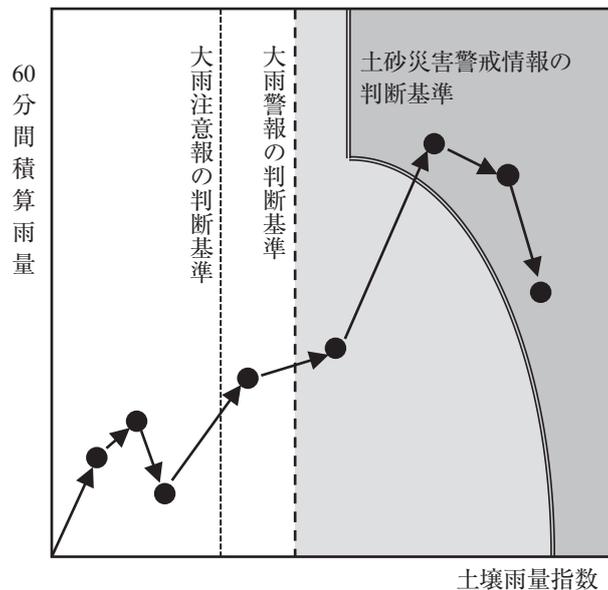
⁽⁸⁹⁾ 「土砂災害警戒情報・土砂キキクル（大雨警報（土砂災害）の危険度分布）」気象庁ウェブサイト <<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/bosai/doshakeikai.html>>

⁽⁹⁰⁾ 気象庁大気海洋部気象リスク対策課「土砂災害に関する防災気象情報の高度化」『河川』898号, 2021.5, pp.51-52.

⁽⁹¹⁾ 「土壌雨量指数」前掲注⁽⁶²⁾参照

土砂災害発生の危険度の判断基準については、60分間積算雨量と土壌雨量指数との関係から判断している(図1参照)。土砂災害警戒情報の判断基準線は、過去に土砂災害が発生しなかった降雨や、土砂災害の発生状況などを用いるなどして、土砂災害の危険性が相対的に高いと想定される領域の境界などとして設定されていて、一定の範囲の土砂災害の危険度を降雨に基づいて評価するためのものである⁽⁹²⁾。また、大雨警報(土砂災害)の判断基準は土砂災害警戒情報の判断基準の概ね1時間程度前に出現する土壌雨量指数であり、大雨注意報の判断基準は大雨警報の土壌雨量指数基準の概ね1時間前に出現する土壌雨量指数であり、これらの基準を超えると想定される際に警報等が発表される⁽⁹³⁾。

図1 土砂災害警戒情報の判断基準



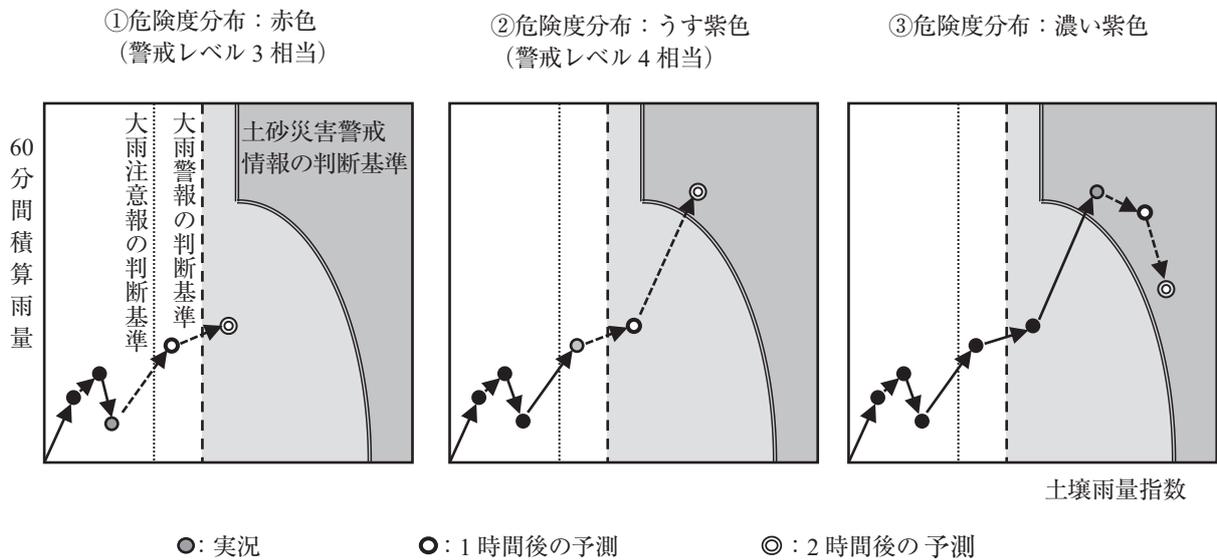
(出典)「土砂災害警戒情報・土砂キキクル(大雨警報(土砂災害)の危険度分布)」気象庁ウェブサイト <<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/doshakeikai.html>> を基に筆者作成。

92) 国土交通省河川局砂防部ほか『国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法(案)』2005.6, p.1. <https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/sabo/dsk_tebiki_h1706.pdf> なお、土砂災害警戒情報の判断基準線の設定に当たっては、有識者や最終的な利用者である市町村並びに住民などの意見を踏まえ、避難勧告等に対してより実効性のあるものにすることが望ましいとされている。

93) 岸本優輝「土砂災害に関する防災気象情報とその利活用」『基礎工』563号, 2020.6, p.33.

雨量の情報としては、実況については解析雨量（I 3 (1) 参照）を用いて、また、予想については降水短時間予報（I 3 (2) 参照）を用いている。60分間積算雨量と土壌雨量指数をプロットしていくと、折れ線（スネークライン）が描写される（図2参照）。そして、図2の①のように2時間後に大雨警報（土砂災害）の基準に到達すると予測された場合には、危険度の判定で赤色であり警戒レベル3相当と判断される。図2の②のように2時間後までに土砂災害警戒情報の基準に到達すると予測された場合には、危険度の判定でうす紫色であり警戒レベル4相当と判断され、図2の③のように既に土砂災害警戒情報の基準に到達している場合には、危険度の判定で濃い紫色であり極めて危険な状況⁽⁹⁴⁾と判断される⁽⁹⁵⁾。

図2 警戒レベルの判断



(出典)「土砂災害警戒情報・土砂キキクル(大雨警報(土砂災害)の危険度分布)」気象庁ウェブサイト <<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/bosai/doshakeikai.html>> を基に筆者作成。

94 この状況になるまでに避難を完了しておくことが重要であり、大雨特別警報(土砂災害)が発表された際の警戒レベル5の緊急安全確保の発令対象区域の絞り込みに活用することが考えられるとしている。

95 「土砂災害警戒情報・土砂キキクル(大雨警報(土砂災害)の危険度分布)」前掲注89

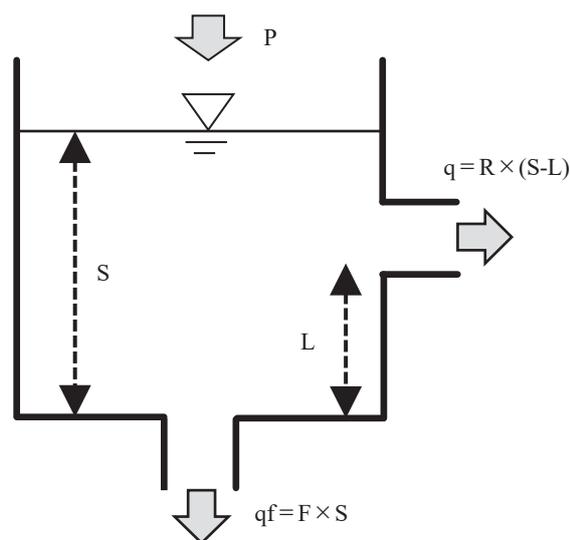
(3) 土壌雨量指数とタンクモデル

土壌雨量指数は、降った雨が土壤中に水分量としてどれだけ溜まっているかを、タンクモデルを用いて数値化したものである。大雨に伴って発生する土砂災害（がけ崩れ・土石流）には、現在の降雨だけでなく、これまでの降雨による土壤中の水分量が深く関係しており、土砂災害危険度の高まりを把握するための指標として利用されている⁽⁹⁶⁾。

タンクモデルは、土壌を、穴を設けたタンクに置きかえて、河川への流出やより深層への浸透を表現したものである。タンクモデルの基本形（図3参照）では、Pが降雨、Sが土壌に溜まった水分量の水水位、qが河川等に流出する量、qfが浸透により下層の層に流出する量である。

横穴が少し高い位置にあるのは、一定量の降雨は土壌に溜まり河川等には流出しないことを表現するためであり、横穴からの流出量は比例定数R（流出係数）を用いて $q=R \times (S-L)$ と計算し、下層へ浸透する量は比例定数F（浸透係数）を用いて $qf=F \times S$ と計算するなどとしてモデルが作られている⁽⁹⁷⁾。

図3 タンクモデルの基本形



(出典) 太田琢磨「土壌雨量指数・表面雨量指数・流域雨量指数の概要と基準の設定方法について」(気象等の情報に関する講習会説明資料) 2018.2.28, p.11. 気象庁ウェブサイト <<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/minkan/koushu180228/shiryou1.pdf>>等を基に筆者作成。

⁽⁹⁶⁾ 「土壌雨量指数」前掲注⁽⁶²⁾

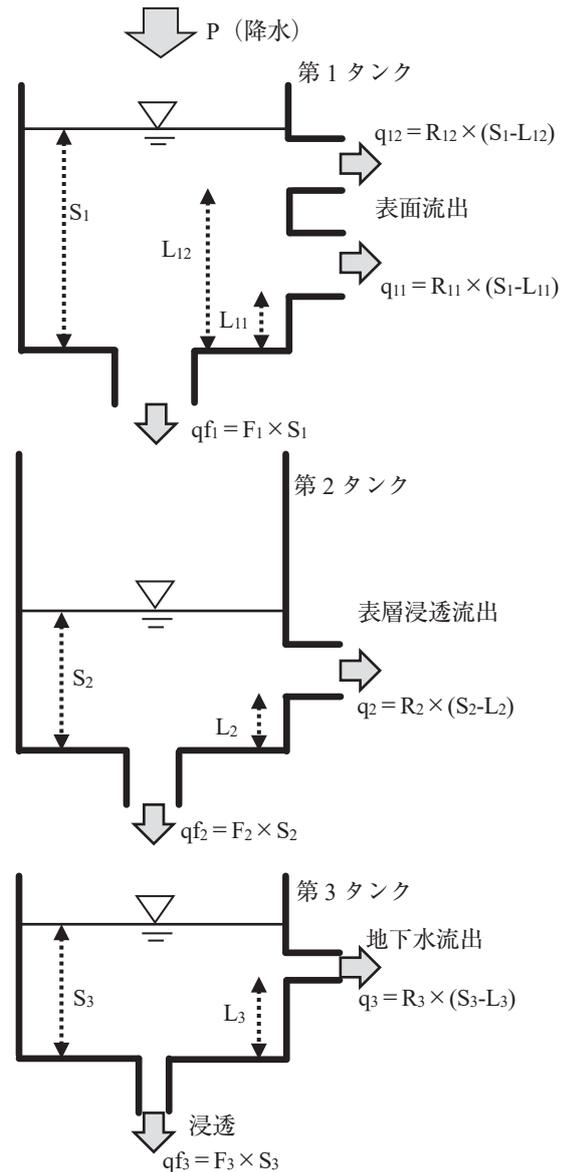
⁽⁹⁷⁾ 太田 前掲注⁽⁶⁵⁾, p.11.

気象庁は、土壌雨量指数の場合は、昭和 54 年の石原安雄氏・小葉竹重機氏の論文⁽⁹⁸⁾（以下「昭和 54 年の石原・小葉竹の論文」という。）で示されている三段に重なった直列 3 段タンクモデルを想定している。第 1 タンクの側面の流出孔からの流出量は表面流出に、第 2 タンクからのものは表層での浸透流出に、第 3 タンクからのものは地下水としての流出に対応しており、河川等流れ出す量とされている。第 1 タンクへの流入は降水に対応している。（図 4 参照）

土壌雨量指数は、各タンクに残っている水分量（貯留水量）の合計として算出されていて、土壌中の水分量に相当するとされている。土壌雨量指数のタンクモデルの模式図では、土壌雨量指数は $S_1+S_2+S_3$ として計算される。流出孔の高さ（図の $L_{11} \sim L_3$ の位置）、流出係数（図の $R_{11} \sim R_3$ でタンク内の水の高さと流出孔の位置との差に乗じて流出量を算定する係数）、浸透係数（図の $F_1 \sim F_3$ でタンク内の水の高さに乗じて浸透量を算定する係数）のパラメータの組合せについて、昭和 54 年の石原・小葉竹の論文では土壌に合わせて五つの組が紹介されているが、気象庁が土壌雨量指数の算定に用いているパラメータはそのうちの 1 組⁽⁹⁹⁾で、全国統一で使用している⁽¹⁰⁰⁾。

このモデルに、1 時間 30mm の降雨が 4 時間続けてあったと仮定して貯留水量の和を計算すると、降り始めから 6 時間、36 時間が経過した時点で、気象庁の採用しているパラメータを用いた場合（この場合は土壌雨量指数）は 89.42mm、49.82mm となる一方、他のパラメータを用いた場合には、6 時間後の貯留水量の和の最高は 102.29mm、最低は 79.92mm となっている。また、6 時間後の貯留水量の和が 96.96mm（土壌雨量指数の計算結果との差 7.54mm）、36 時間後が 45.14mm（同△ 4.68mm）となるパラメータもあり⁽¹⁰¹⁾、気象庁が採用しているパラメータの計算

図 4 土壌雨量指数の直列 3 段タンクモデルの模式図



（出典）「土壌雨量指数」気象庁ウェブサイト <<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/bosai/dojoshisu.html>> を基に筆者作成。

⁽⁹⁸⁾ Yasuo Ishihara and Shigeki Kobatake, "Runoff Model for Flood Forecasting," *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute*, Vol.29 No.1, July 1979, pp.27-43.

⁽⁹⁹⁾ 昭和 54 年の石原・小葉竹の論文で、R.Kizu Tsukigase（木津川 月ヶ瀬）とされているパラメータの組み合わせである。

⁽¹⁰⁰⁾ 「土壌雨量指数」前掲注62

⁽¹⁰¹⁾ 筆者が、時間雨量 30mm の雨が 4 時間均等に降ったと仮定して、10 分きざみで計算を行ったものである。

結果との差が一定でなく、降雨後の経過時間などにより影響が異なっている。

(4) 他の雨量指数との比較

土壌雨量指数と同様に、タンクモデルを用いて指数を計算しているものに、表面雨量指数と流域雨量指数がある。表面雨量指数は、過去の浸水害発生時の表面雨量指数値を調査した上で設定した大雨警報（浸水害）等の基準値と比較することにより、また、流域雨量指数は、過去の洪水災害発生時の流域雨量指数値を調査した上で設定した洪水警報等の基準値と比較することにより、災害発生の危険度を判断している⁽¹⁰²⁾。

表面雨量指数と流域雨量指数のタンクモデルでは、非都市部のモデルとして土壌雨量指数と同様の直列三段タンクモデルが使用されているが、昭和54年の石原・小葉竹の論文の直列三段タンクモデルを1km四方程度に適用できるよう、タンクの構造やパラメータを修正し、また、五つの組のパラメータのうち各箇所の土質に近いパラメータを用いる対応としている⁽¹⁰³⁾。このタンクモデルで、土壌雨量指数で採用されている土質に該当するパラメータを使用して前記の1時間30mmの降雨が4時間続いた場合の土壌の貯留水量の和を計算すると、雨が降りやんだ直後である降り始めから4時間後で67.31mm（土壌雨量指数の計算結果である102.59mmとの差35.28mm）、降り始めから6時間後で46.08mm（同89.42mmとの差43.34mm）、36時間後で6.54mm（同49.82mmとの差43.28mm）などとなる。

土壌雨量指数は、タンクモデルを用いて、タンクに溜まっている水量により「流出せずに土壌に溜まっている水量」を推定しているものであり、一方で、表面雨量指数と流域雨量指数は、タンクモデルを用いて、タンクから流れ出す水量により「土壌に溜まらず河川等に流出した水量」を推定しているものである。土壌に溜まっている水量と、溜まらず河川等に流出した水量は、降雨の主な行先である。土壌の貯留水量は、正しい値を把握することはできないタンクモデルによる推定値であるが、上記のように、計算に利用するタンクモデルやパラメータの違いにより、土壌の貯留水量の計算結果に大きな差が生じたり、降雨後の経過時間により影響が異なったりしている。

気象庁は、土砂災害の危険度の判断基準は、過去の土砂災害発生時の土壌雨量指数等を調査した上で設定しているため、土壌雨量指数におけるタンクモデルでの計算では考慮されていない要素（地盤の崩れやすさの違いなど）も判断基準には一定程度反映されているとしている⁽¹⁰⁴⁾。

しかし、過去に災害の発生した際の降雨の状況（短時間で大量の降雨、長時間での降雨など）と、最近の降雨の状況が同じとは限らないなど、判断基準に反映できない要素もあると思われ、避難が必要な範囲をよりの確に示すためにも、より良いと思われるモデルやパラメータによる指数を検討することは重要と考えられる。

(102) 「表面雨量指数」前掲注(64); 「流域雨量指数」前掲注(63)

(103) 太田琢磨・牧原康隆「大雨警報における浸水雨量指数の適用可能性—タンクモデルを用いた内水浸水危険度指標—」『気象庁研究時報』65巻, 2015, pp.4-6. <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/kenkyu/65/jmr_vol65p001.pdf>

(104) 「土壌雨量指数」前掲注(62)

おわりに

「顕著な大雨に関する情報」を公表することが開始されてから間もないが、日本の多くの地域で激しい雨が降り、望ましいことではないが活用されてきている。また、気象情報の報道などでは、キキクルやハザードマップを確認するように呼びかけており、これらの認知度も上がってきたと思われる。

しかし、ハザードマップは危険性を認識するためのものであり、色が塗られていない地域は安全な場所であることを示しているものではない⁽¹⁰⁵⁾ことも忘れてはならない。現在の降雨の状況、数十分から1時間程度後の降雨の状況、夜間にかかる場合は数時間後の降雨の状況、土砂災害については雨が降りやんだ後の状況など、多種多様なことを考えて避難等を行う必要がある。

安全な避難を行うためにも、これらの防災情報はできるだけ正確で、分かりやすいものが望ましい。刻々と変化する気象状況の予測精度を上げることや、土質の状況などのように事前に時間をかけて検討できる情報について見直していくことなど、避難に関する情報を提供する気象予報の精度をより一層向上させるためになすべきことは多い。

(やました のぶひろ)

⁽¹⁰⁵⁾ 秦康範「激甚化する気象災害に備える（前編）洪水ハザードマップの活用にあたって留意すべき事項」『監査研究』547号、2019.6、pp.13-15。例えば浸水想定区域については、河川の堤防から水があふれる外水氾濫が対象であり、必ずしも想定した場所が決壊するとは限らないことなどを挙げている。