

第1回インド洋熱帯低気圧と気候変動に関する 国際会議出席報告*

杉 正 人*¹・中 澤 哲 夫*²・柳 瀬 亘*³

1. 会議の概要

2009年3月8日から11日まで、アラビア半島の東にあるオマーンの首都マスカット市で、表記会議が、オマーン政府、サルタン・カブス大学 (SQU) そして世界気象機関 (WMO) の共催で、SQU を会場に開かれた。参加者は全体で200名ほど。このうち、オマーンからの120名のほか、多い順に、インド (11)、イラン (9)、米国 (7)、フランス、日本、アラブ首長国連邦 (各5)、オーストラリア (4)、バングラデシュ、ドイツ (各3)、サウジアラビア、イエメンなどからの参加があった (第1図)。

この会議は、2007年にオマーンやイランを襲ったゴヌ (Gonu) や2008年にミャンマーを襲ったナルギス (Nargis) などのインド洋でのサイクロンについて、その特徴や予報、避難などの現状について議論するとともに、これらのサイクロン活動が、温暖化などの気候変動とどのように関連しているのかを議論する目的で初めて開催されたもので、第1表に示す6つのテーマで構成されていた。それらのテーマに沿ったセッションのうちいくつかは、最初に40分間の基調講演が設定されており、これから始まるセッションのテーマを示す役目が果たされていた。本稿では、これらのセッションで行われた発表の内容について報告したい。また、この会議に先立ち、熱帯低気圧に対する気

候変化の影響に関する専門家チーム会合も開かれ、杉がメンバーとして出席したので、後段ではこの会合についても報告する。
(中澤哲夫)

2. 現業のサイクロン予報と警戒システム

Nakazawa (気象研究所) は、「気象庁におけるナルギスの週間アンサンブル予報について」と題して発表を行った。ミャンマーの気象局長官である、Tun Lwin 氏から、ナルギスの上陸を早い段階から予報できていたことに感謝の言葉が述べられた。また、インドの気象局長官、Ajit Tyagi 氏からも、TIGGE のようなアンサンブル予報データを使って、サイクロンの予報に役立てるような研究が必要であるとのコメントがあった。また、「上陸を予報できているのは環境場が効いているからか」との質問もあり、「そのとおりであるが、ナルギスの場合、必ずしも指向流とはあっていないようで更なる研究が必要」と答えた。



第1図 会議場のひとこま。前列向かって左から3人目が、McBride氏、その右に、Knutson氏、Chan氏、Fritz氏、そして杉氏が見える。

* Report on the first international conference on Indian Ocean tropical cyclones and climate change.

*¹ Masato SUGI, 気象庁気象研究所 (現所属：海洋研究開発機構地球環境変動領域)。

*² Tetsuo NAKAZAWA, 気象庁気象研究所。

*³ Wataru YANASE, 東京大学気候システム研究センター (現所属：東京大学海洋研究所)。

第1表 セッションのテーマと基調講演.

| テ ー マ | 基 調 講 演 |
|-----------------------------------|---|
| 現業のサイクロン予報と警戒システム | 熱帯低気圧と気候変動：インド洋の観点から Tropical cyclones and climate changes: An Indian Ocean perspective (T. Knutson) |
| 近年インド洋で大きな影響のあったサイクロン (ナルギスやゴヌ等) | 地球温暖化と熱帯低気圧の活動について Global warming and tropical cyclone activity (J. C. L. Chan) 熱帯低気圧の将来変化に関する予測の改善に向けて Toward improved projection of the future tropical cyclone change (M. Sugi) |
| サイクロン発生についての進展 | |
| リスクと脆弱性の評価 (歴史的サイクロンデータセットの構築を含む) | 南インド・南太平洋における熱帯低気圧のデータアーカイブ, 気候学, 季節予報の構築 On developing a tropical cyclone archive, climatology and seasonal prediction for the South Indian and South Pacific oceans (Y. Kuleshov) |
| 災害への準備, 危機管理及び減災 | オマーン湾岸で発生した, サイクロン・ゴヌによる高潮 Cyclone Gonu storm surge in the Gulf of Oman (F. Hermann) |
| 気候変動とサイクロン活動度 | |

Mohapatra (IMD, インド) からは, インドでは INSAT のほかに Kalpana と呼ばれる衛星データを用いて現業のサイクロン予報を実施しているとの報告があった。また, インド洋のサイクロンのベストトラックデータとして, e-Atlas と呼ばれるデータベースを作成したとのことだった。(中澤哲夫)

3. 近年インド洋で大きな影響のあったサイクロン (ナルギスやゴヌ等)

Sugi (気象研究所) は, 「気候変化に伴う熱帯低気圧の将来変化の予測の改善を目指して」という演題で基調講演を行った。講演では, 気象庁気象研究所グループが中心になって実施している, 全球20km モデルによる温暖化予測実験の結果について話をした。前半では, 共生プロジェクト (2002-2007) の結果と, その成果が反映されている「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC) の第4次報告書の結論, 残された課題について話した。後半では, その残された課題の解決に向けて, 現在「革新プログラム (2007-2012)」で取り組んでいる研究の初期の成果について話した。

この講演で強調した点の一つは, 「温暖化による熱帯低気圧の強度の強まりと, 発生数の減少について, 全球的な変化についてはかなり信頼度が高いが, 地域的な変化予測については非常に不確実性が大きい」ということである。熱帯低気圧に限らず, 気候変化の予測では一般に, 地域的な変化の予測の不確実性は全球

の変化の予測と比べてずっと大きい。このことは, 実際に各地域, 各地点で温暖化の影響評価を行うために大きな問題となる。すなわち, 科学者は, 社会が必要としている不確実性の小さい予測情報を出していない。将来の気候変化の予測の改善という点では, まずこの地域変化の予測の改善を最重点課題として取り組む必要がある。

講演で, 強調したもう一つの点は, 予測の信頼度を高めるためには, 予測結果の科学的理解・合理的説明が重要であるという点である。温暖化によって熱帯低気圧の強度が強くなるというのは, 比較的理解しやすいが, なぜ発生数が減少するかということは簡単には理解できない。温暖化で熱帯低気圧の発生数が減る理由はかなり複雑で, 講演の中の短い時間で十分理解してもらうのは難しいが, 講演の後の質問内容からは, 説明のポイントは理解してもらえたと思われる。本講演については, 地元の新聞でも記事に取り上げられ, その中でも発生数減少のメカニズムに関する記述が掲載されていた。(杉 正人)

Chan, Johnny, C. L. (香港市立大学, 中国) は, 北太平洋西部の台風活動度の十年スケール変動について解析し, 活発期の環境場は低気圧性偏差を伴い, 鉛直シアが弱いなど台風発生に有利な条件を伴っており, また発生域が東に伸びるため個々の寿命も長くなることを示した。Al-Azri (SQU, オマーン) はアオコ発

生に関する発表を行った。2008年にオマーン沿岸でアオコが異常発生したことを報告していた。クロロフィルは、海面水温の低下とともに増加することはわかっているが、2008年のケースでは海面水温の低下とは相関がなく、原因はよくわかっていないようである。

(中澤哲夫, 柳瀬 亘)

4. サイクロン発生についての進展

Yanase (東京大学) は、「ベンガル湾における熱帯低気圧の発生に関する数値シミュレーションとデータ解析」と題して発表を行った。ベンガル湾でのサイクロンの発生を季節変化や季節内振動に伴う環境場の変化の観点から議論した。環境場の解析は Emanuel and Nolan (2004) にならい、下層渦度、鉛直シア、中層湿度、潜在強度 (海面水温と潜在不安定性を考慮した指標) の変化に着目した。PMEL の McPhaden 氏からは、鉛直シアの変化もベンガル湾サイクロンの発生と対応している点が興味深いというコメントをもらった。

(柳瀬 亘)

McPhaden (NOAA/PMEL, 米国) は、ナルギスがベンガル湾を東進した際に海面に及ぼした影響を ARGO フロートの観測より示していた。海洋の慣性振動にも影響された海洋混合により、海面温度がナルギスの通過に伴って大きく減少している様子が良く示されていた。今後、インド洋での係留ブイの更なる展開に意欲を示していた。今回の会議参加も、インド洋沿岸各国の協力を得るためのものだそうだ。

このセッション中、何人かの発表で示されていた北インド洋での Tropical Depression (TD) 発生の季節変化が気になった。よく知られているように、日本では台風に相当する Tropical Storm (TS) 発生数は、春と秋にピークを持つダブルピークであるのに、TS まで達しなかった TD 発生数は夏にピークを持つシングルピークを示していた。インドの研究者に聞いたところ、どうもここで TD と呼んでいるのは、モンスーン低気圧 (monsoon depression) のことのようなのである。TS は鉛直シアの影響を強く受けるので、夏のシアが大きいときには発生が抑制されるのはよく知られていることである。その一方、モンスーン低気圧は、インド北部からベンガル湾にかけてのびるモンスーントラフに沿ってできる低圧部であり、インドモンスーンの発達する夏に多いことから、TD をモンスーン低気圧とすれば理解できる。わたし (中澤) の

理解では、TD は TS にまで発達しない熱帯低気圧のことを指すものと思っていたが、インドでは違うことのようにだ。

(柳瀬 亘, 中澤哲夫)

5. リスクと脆弱性の評価 (歴史的サイクロンデータセットの構築を含む)

ロシアから来たという Kuleshov (国立気候センター, オーストラリア) による基調講演は、南インド洋のサイクロン発生数の気候学や El Niño/La Niña との関連に関するもので面白かった。南半球の熱帯低気圧のデータセットを紹介し、サイクロン発生数は、El Niño の時のほうが La Niña の時よりも南インド洋全体では多くなるが、東インド洋に限ると逆の傾向となっていることが示された。また、これらの場所でのサイクロン発生数が、周辺環境場の高い海面水温・高い相対湿度・大きな渦度と対応していると指摘した。

Ahmed (ウィスコンシン大学, 米国) は、バングラデシュのサイクロンによる水害について発表した。バングラデシュでの被害が大きい原因としてベンガル湾の奥が狭くなっていることや土地の低さという地理的条件の他に、人口の多さや建物の弱さなどの人為的な原因についても述べた。Kwarteng (SQU, オマーン) は、ゴヌによる被害の前後の違いを高解像度の衛星データを用いて示した。上空からでも明瞭に見られるマスカットでの水害の爪痕を見ると、ゴヌによる災害の凄まじさが伝わってきた。Levinson (NOAA, 米国) は、新しい全球ベストトラックのデータセット IBTrACS の紹介をした。海域毎に様々な機関が報告しているデータを合わせ、不確実性の範囲なども検証していた。データフォーマットも数種類揃えているとのことで、グローバルな熱帯低気圧の研究には有り難いデータである。

発表内容の紹介ではないが、Levinson 博士との交流についても少し報告したい。博士の発表には興味があったのだが、Parallel セッションであったために聴講することができなかった。セッション終了後、そのことを話すと、発表されたファイルをもらうことができた。著者には、Nakazawa and Hoshino (2009) で引用している Kossin も入っている。Levinson 博士には、わたし (中澤) たちの論文の最終版を差し上げた。米国統合台風警戒センター (JTWC) と日本の気象庁では、同じ台風を見ている、ドボラック法のパラメータ推定に違いがあることがわかったと話

たら、「さもありません」と、うなずいていた。

(中澤哲夫, 柳瀬 亘)

6. 災害への準備, 危機管理及び減災

Fritz (ジョージア工科大学, 米国) は, このテーマにおける基調講演を行った。ゴヌによるオマーンでの水害を調査し, ゴヌは海岸から離れていたものの, サージ (高潮) による 2 m ほどの水位上昇に, 更に 2 m ほどの高波が加わり最大で 5 m ほどの海水が街を襲ったことを紹介していた。

(柳瀬 亘)

7. 気候変動とサイクロン活動度

Alam (バングラデシュ技術大学, バングラデシュ) の発表では, 21世紀末に, 東インド, バングラデシュ付近で, どのような気候変化が想定されるのかについて報告されていた。それによれば, チェラプンジーやアッサム付近の現在でも大量の雨が記録されている地域で, さらに10%ほど降水が増加するとの結果が示された。この増加は夏のモンスーン期に起きており, 逆に冬のモンスーン期には減少していることも報告された。冬のモンスーン期の減少が, どの領域で起きているのかも興味がある点だった。

(中澤哲夫)

8. 勧告

今回の会議では, 最後にオーストラリア国立気候研究センターの McBride 博士より, インド洋沿岸国などに向けた勧告案が示されたので, ここで紹介したい。

- ① 今回と同様の会合を 2 年毎にインド洋沿岸国で実施すること。
- ② インド洋沿岸国は, 温暖化時のサイクロンに関する地域的全球的な研究を協力して実施して行くよう奨励すること。
- ③ SQU は, 人間活動による気候変化とその影響に関する学生と大学院生への教育を重視すること。また, 同大学が, 気候変化の影響と気候災害に関する研究の地域センターの設立コンセプトを調査すること。
- ④ インド洋沿岸国が, サイクロン関連データの共有について, 地域協力をさらに強め, サイクロン活動の長期トレンドの決定を助けるよう, データの質や不均一などデータの品質に関する研究を実施すること。
- ⑤ インド洋沿岸国は, サイクロンの気候モニタリン

グと同時に, 即時的な検出や警報のため, それぞれの国で求められる観測要求をとりまとめるために協力すること。データには, 地上, 高層のみならず, レーダや, 衛星受信の施設やインフラ, 航空機によるサイクロン観測も含む。

- ⑥ インド洋で展開されてきている係留ブイネットワーク IndOOS (インド洋海洋観測システム) が, モンスーンの研究および予測に重要な海洋の観測システムであることから, まだ IndOOS の活動に加わっていない国は, 参加を検討すること。
- ⑦ 温暖化のサイクロン活動への影響については, 海域ごとに不確実性が高い。インド洋沿岸国は, どのようなパラメータがサイクロン活動に最も影響するのかを理解するために, 数値実験や診断的研究などを実施すること。TMRP を通じて, WMO が, この点では大きな役割を果たすこと。

(中澤哲夫, 杉 正人)

9. 熱帯低気圧に対する気候変化の影響に関する専門家チーム会合

この専門家チームは, 世界天候研究計画 (WWRP) の, 熱帯気象研究 (TMR) 作業部会の下での熱帯低気圧パネル (TCP) の専門家チームであり, WMO に熱帯低気圧の気候変化に関連する事項について, 専門家としての見解をまとめて報告することを目的として昨年 4 月に発足した。発足時の専門家チームメンバーは, John McBride (共同議長) (国立気候研究センター, オーストラリア), Tom Knutson (共同議長) (GFDL/NOAA, 米国), Johnny Chan (香港市立大学, 中国), Kerry Emanuel (MIT, 米国), Isaac Held (GFDL/NOAA, 米国), Greg Holland (NCAR, 米国), Chris Landsea (NHC/NWS/NOAA, 米国) の 7 名である。このうち, McBride と Chan 以外の 5 人はいずれもアメリカ人である。メンバー構成がアメリカ人に偏っているという批判もあり, 今回新たに, A. K. Srivastava (IMD, インド), Masato Sugi (気象研究所, 日本), Jim Kossin (ウィスコンシン大学, 米国) の 3 名がメンバーに加わるようになった。

会合は, 3 月 6 日と 7 日の 2 日間 SQU で開かれた。共同議長の Knutson 以外のアメリカ人は, 電話会議とメールでの参加となった。両日とも, 午前中は

オマーンに集まったメンバーだけによる会議が、午後は1時から5時まで（アメリカ東部の午前4時から8時、中西部の午前2時から6時）電話会議が開かれた。今回の専門家チーム会合の目的は、2006年11月にコスタリカで開かれた、第6回世界熱帯低気圧ワークショップ（IWTC-VI）でまとめられた、「熱帯低気圧と気候変化に関するステートメント」のアップデートである。

第1日目は、過去の観測データから、既に温暖化の影響が熱帯低気圧の活動に影響を及ぼしていることを検出できるか、そのような影響がモデルで説明できるか、理解できるか、という問題についての議論にほとんどの時間を費やした。この問題は、特にアメリカで、2005年のハリケーン・カトリーナ以来、そしてそれと同時期に発表された、Emanuel (2005) の Nature の論文、Webster ほか (2005) の Science の論文以来、様々な議論が続いており、現時点での専門家チームの見解をまとめておきたいというのが、（アメリカの）メンバー共通の思いのようである。IWTC-VIのステートメントのまとめの部分では、「（たとえばハリケーン・カトリーナのような）個々の熱帯低気圧について、温暖化の影響があるかないかという事は検出できない」という表現になっていたが、今回の Knutson の素案では、「熱帯低気圧の活動の強化についての温暖化の影響を示すいくつかの統計的な証拠が示されているが、このような関係を支持する科学的根拠が確立されているとはいえない」というような表現が提案され、おおむね了承された。

2日目の電話会議では、（モデルによる）将来予測の問題を中心に議論が行われた。IPCC 第4次報告書のまとめでは、「温暖化で熱帯低気圧の強度が強くなることはかなり確からしいが、全球的に発生数が減るといふ予測は強度の変化の予測と比べて信頼度が低い」という表現になっている。今回の専門家チーム会合の Knutson の素案でも、「強度の強まりについての予測の信頼度は中くらいだが、発生頻度の減少についての予測の信頼度は低い」となっていた。これに対し、杉は、「IPCC 第4次報告書以降の最近のモデルの成果も考慮すると、中解像度（120km程度）から高解像度（20km）までの全てのモデルの結果は、全球の熱帯低気圧の発生数が温暖化により減少するという点で定性的に一致した結果を示しており、全球の発生頻度については、かなり信頼性が高い。一方、海域ごとの発生数の変化については、モデルによって大き

な違いが見られる。このことから、『温暖化による熱帯低気圧の強度の強まりと発生数の減少について、全球的な変化についてはかなり信頼度が高いが、地域的な変化予測については非常に不確実性が大きい』という表現にしてはどうか」と主張した。議論の結果、この点を考慮した表現になった。（杉 正人）

10. オマーンの印象など

アラビアの国を訪問するのは今回が初めてで、貴重な異文化体験であった（今回の会議への参加がなければ、おそらく、オマーンを訪れることは一生なかっただろう）。イスラム教の国、砂漠の国という点で独特の文化圏である。男性は白、女性は黒のガウンのような服（これは、気候風土に合った合理的な服かもしれない）と、幾何学的な規則性と淡い色彩を重んずる建築様式などが強烈な第一印象として残った。街を走る自動車のほとんどが日本車で、オマーンの人々は日本に対しては特に厚い信頼と尊敬の感情を持っているようであった。日本という国が、外国の人々にこのように思われていることは、実はかなり重要なことではないかと思った。オマーンと他のアラブ諸国で、どのような違いがあるかは分からないが、他の国でもオマーンの人と同じ様な感情を日本に対して持っているとするなら、このような関係を損なわないようにこれらの国々と付き合いしていくことが大事なのではないだろうか。（杉 正人）

コーランを読む（というより唄う感じだが）ことから始まった表記の会議は、その国土の大半が砂漠であるオマーンを襲ったサイクロン・ゴヌがきっかけだった。小職もインド洋のサイクロンについてはほとんど知識がなかっただけに、多くの新鮮な情報を得ることができたことは有益であった。また、これまで THORPEX 活動にはそれほど積極的ではないと感じていたインドの気象局長官から、TIGGEなどの活動を通じてインドも積極的にかかわっていきたいとの意向が示されたことは重要である。今後具体化に向けてインドとの協力を強化していきたいと考えている。

（中澤哲夫）

広い領域の熱帯低気圧を統計的に調べている研究者にとっては、北太平洋や北大西洋などの馴染のある海域から離れてインド洋に目を向けることは、普段使っている解析方法や解釈がどの程度普遍性のあるものか

を知る良い機会になったと思う。個々の事例の研究は、実際に大きな被害を受けたバングラデシュやオマーンからの発表が多く、主に被害状況の報告や防災戦略に関する内容であった。サイクロンのメカニズム自体に関する数値シミュレーションなどを用いた研究は少ないように感じられた。

今回の会議では様々な興味を持った研究者が集まり情報交換をしたが、日本では馴染みの無いインド洋のサイクロンに関して、どのような研究がなされているのかという様子を知るのに、非常に有意義な会議であった。今後も数年に一度このような機会を設けられると良いが、その際にはインド洋に特有なサイクロンとその環境場の特徴は何かという理解に関しても、研究者間の有機的な交流が図れると良いと感じた。

首都マスカット周辺は治安も良く、夜に訪れたスークと呼ばれる市場は非常に活気が溢れていた。町は岩山の合間や海岸付近の数ヶ所に点在し、ビルのすぐ裏に岩山がそびえたつ光景も見られた。会議の行われたSQUは白色の美しいキャンパスで、2階建てほどの建物群が屋根のある通路で結ばれている。会議室の中は日本のものと何ら変わりはないが、白い衣装（男性）や黒い衣装（女性）をまとった研究者や学生を見ると、オマーンの大学にいることを思い出させてくれた。（柳瀬 亘）

略語一覧

ARGO : Array for Real-time Geostrophic Oceanography アルゴ計画, アルゴブイ
 GFDL : Geophysical Fluid Dynamics Laboratory 地球流体力学研究所
 IBTrACS : International Best Track Archive for Climate Stewardship 気候管理のための世界ベストトラックアーカイブ
 IMD : Indian Meteorological Department インド気象局
 IndOOS : Indian Ocean Observing System インド洋海洋観測システム
 INSAT : Indian National Satellite System インド衛星システム
 IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change 気候変動に関する政府間パネル
 IWTC : International Workshop on Tropical Cyclone 世界熱帯低気圧ワークショップ
 JTWC : Joint Typhoon Warning Center 米国統合台風警戒センター
 MIT : Massachusetts Institute of Technology マサ

チューセッツ工科大学
 NCAR : National Center for Atmospheric Research 米国大気研究センター
 NHC : National Hurricane Center 米国ハリケーンセンター
 NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration 米国海洋大気庁
 NWS : National Weather Service 米国気象局
 PMEL : Pacific Marine Environmental Laboratory 太平洋海洋環境研究所
 SQU : Sultan Qaboos University サルタン・カブース大学
 TCP : Tropical Cyclone Panel 熱帯低気圧パネル
 TD : Tropical Depression 熱帯じょう乱 (最大風速が17 m/s に達しない熱帯低気圧)
 THORPEX : The Observing System Research and Predictability Experiment 観測システム研究・予測可能性実験
 TIGGE : THORPEX Interactive Grand Global Ensemble THORPEX 双方向マルチセンター全球アンサンブル
 TMR : Tropical Meteorology Research 熱帯気象学研究
 TMRP : Tropical Meteorology Research Programme 熱帯気象研究計画
 TS : Tropical Storm 熱帯ストーム (熱帯低気圧の階級の一つ)
 WMO : World Meteorological Organization 世界気象機関
 WWRP : World Weather Research Programme 世界天候研究計画

参考文献

Emanuel, K., 2005 : Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, **436**, 686-688.
 Emanuel, K. and D. S. Nolan, 2004 : Tropical cyclone activity and the global climate system. *Proc. of 26th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, American Meteorological Society, Miami, FL, 240-241.
 Nakazawa, T. and S. Hoshino, 2009 : Intercomparison of Dvorak parameters in the tropical cyclone datasets over the western North Pacific. *SOLA*, **5**, 33-36.
 Webster, P. J., G. J. Holland, J. A. Curry and H. -R. Chang, 2005 : Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*, **309**, 1844-1846.