

5. 地球温暖化で台風はどうか

杉 正 人*

1. はじめに

2004年に日本には10個の台風が上陸し、各地に大きな被害をもたらした。2004年の台風の発生数は29個で、平年の26.7個と比べてとくに多かったわけではない。しかしながら、上陸数の10個は平年の上陸数2.6個の3.8倍で、それまでの最高記録の6個を大幅に上回る「異常な」数である。この異常な上陸数は、地球温暖化と関係があるのだろうか？ また、2004年は北大西洋のハリケーンの活動も例年になく活発であった。トロピカルストーム（台風に相当）の発生数が15個（平年は10.1個）、カテゴリー3以上の強いハリケーンの数も6個（平年は2.5個）であった。さらに、2005年には非常に強いハリケーン「カトリナ」がニューオーリンズに上陸し、非常に大きな被害をもたらした。このような中、2005年には「地球温暖化に関連して、最近強いハリケーンの数が増えている」という内容の論文 (Emanuel 2005; Webster *et al.* 2005) が、相次いで Nature 誌と Science 誌に発表され、アメリカの気象学会では、地球温暖化とハリケーンの関係について大論争が起きている (Pielke *et al.* 2005; Anthes *et al.* 2006; Pielke *et al.* 2006)。地球が温暖化すると、台風やハリケーンの数が増えるのか？ その強さは強くなるのか？ 本講演では、この問題について大気大循環モデルによる数値実験の結果とその解釈について紹介する。

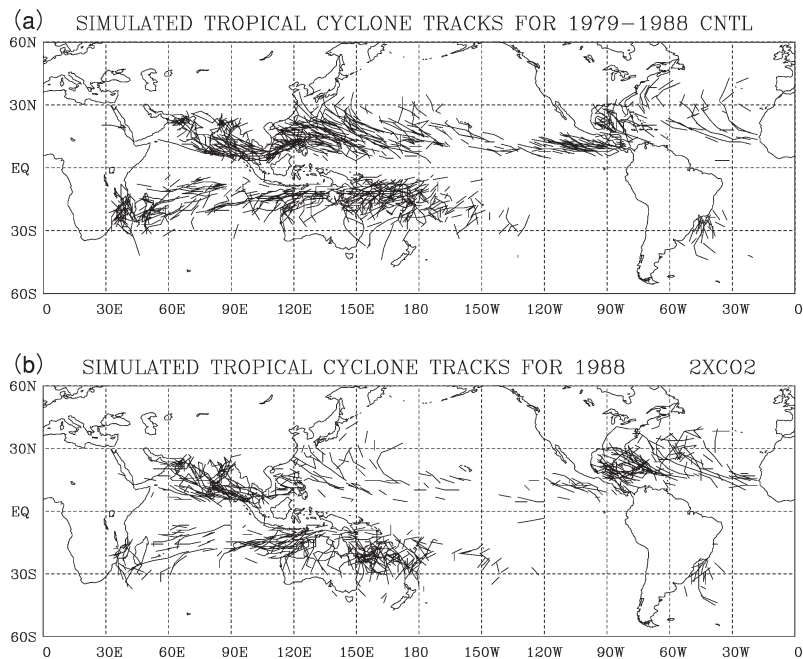
2. 温暖化で台風はどうか—数値実験の結果—
大気大循環モデル (GCM) を用いて最初にこの問題に取り組んだのは、Broccoli and Manabe (1990) である。彼らは、水平分解能約300 kmの米国地球流

体力学研究所 (GFDL) のモデルを用いて実験を行った。その結果、雲を固定した場合には熱帯低気圧の数が増えるが、雲を変動させると熱帯低気圧の数は減少した。Haarsma *et al.* (1993) も、ほぼ同じ程度の分解能のイギリス気象局のモデルを用いた実験を行った。その結果は、温暖化すると熱帯低気圧の数は大幅に（約50%）増えるというものであった。これらの数値実験に対して、熱帯低気圧の研究者達から、「熱帯低気圧を再現するにはモデルの分解能が低すぎて、結果はまったく信用できない」という強い批判が出された (Evans 1992; Lighthill *et al.* 1994)。

その後、1990年代の後半に、Bengtsson *et al.* (1996) により、水平分解能約120 kmのMax Planck研究所のモデルを用いた実験が行われた。この実験では、それ以前に行なわれた低分解能のモデルを用いた実験よりもずっと現実に近い熱帯低気圧を再現できるようになった。彼らの結果は、地球温暖化により熱帯低気圧の数が大幅に（30%以上）減少するという、やや意外な結果であった。この結果は、「温暖化すると熱帯低気圧の数は増えるだろう」という常識的な予想とは異なるものであったために、熱帯低気圧の研究者達からは、「実験設定に問題があり、結果は信用できない」などの批判を受けた (Landsea 1997)。Bengtsson *et al.* (1996) に続いて、Sugi *et al.* (1997, 2002) も、水平分解能約120 kmの気象庁の全球予報モデルを用いた実験を行った。結果は、Bengtsson *et al.* (1996) と同様に、「温暖化すると熱帯低気圧（台風やハリケーン）の数が大幅に（30%以上）減る」というものであった（第1図）。問題は、常識的な予想とは異なる実験結果を、どのように合理的に説明するかということである。それ以前の低分解能のモデルに比べれば、約120 kmの水平分解能の全球気モデルでは、より現実に近い熱帯低気圧を再現でき

* 気象研究所予報研究部。

© 2008 日本気象学会



第1図 水平分解能120 kmの気象庁全球予報モデルでシミュレートされた台風（熱帯低気圧）の経路。現在気候実験（a）と温暖化実験（b）を示す。（Sugi *et al.* 2002）

るようになったが、それでも実際の台風やハリケーンと比べるとその強度は弱い。このため、強い台風やハリケーンがさらに強くなるかどうか、あるいは強い台風やハリケーンの数が増えるかどうかというような問題には十分答えられない（第2図a）。温暖化したときの台風やハリケーンの強さの変化については、最大可能強度（MPI）理論による考察（Emanuel 1986, 1987）や、高分解能のハリケーンモデルを用いた「予報実験」による考察（Knutson *et al.* 1998）により、「温暖化すると台風やハリケーンの強さは強くなる」、「温暖化すると強い台風やハリケーンの数が増える」と予想されている（第2図b）。この予想と、全球モデルの実験結果とは一見矛盾している。したがって、実験結果をどのように理解するかが大きな問題である。

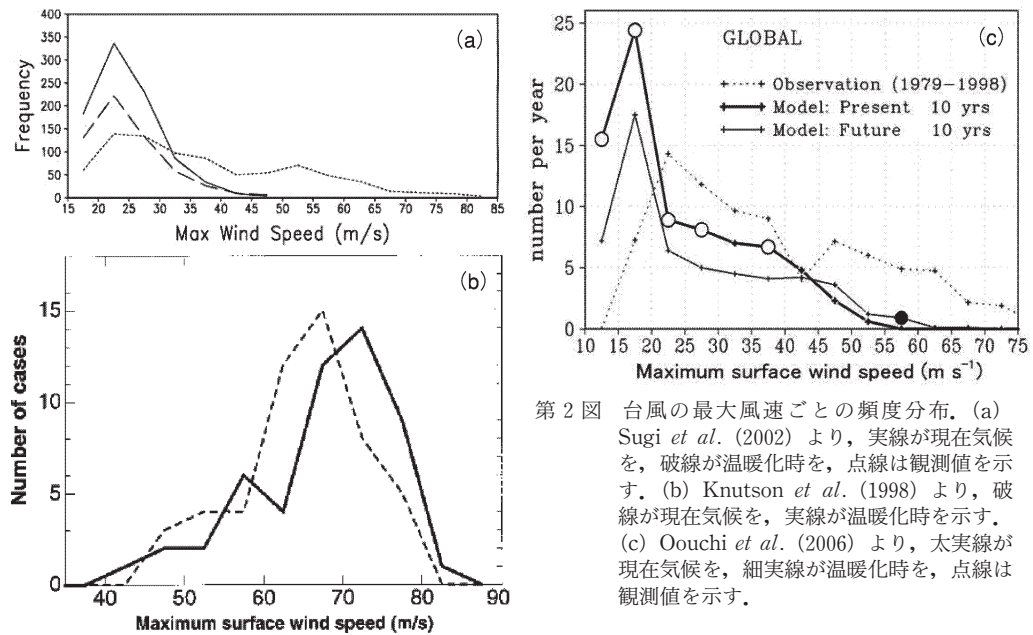
2002年には、超大型超高速のスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」が稼動するようになり、これまでよりもずっと高分解能のモデルによる実験ができるようになった。「人・自然・地球共生プロジェクト」第4課題の気象研究所・気象庁・地球科学技術総合推進機構合同研究チームは、地球シミュレータを使って水平分解能20 kmの気象研究所・気象庁モデルによる

数値実験を実施した（第3図）。実験の結果は、Bengtsson *et al.* (1996) や Sugi *et al.* (1997, 2002) の結果と同様に、「温暖化すると熱帯低気圧（台風やハリケーン）の数が大幅に（30%）減る」というものであった（Oouchi *et al.* 2006）。さらに、20 kmモデルの実験では、温暖化により熱帯低気圧の総数は減る一方で、強い台風やハリケーンが増えることが示された（第2図c）。この実験結果は、MPI理論やハリケーンモデルによる予報実験の結果とも整合しているものといえる。問題は、温暖化によって熱帯低気圧の総数が減ることと、強さが強くなるという

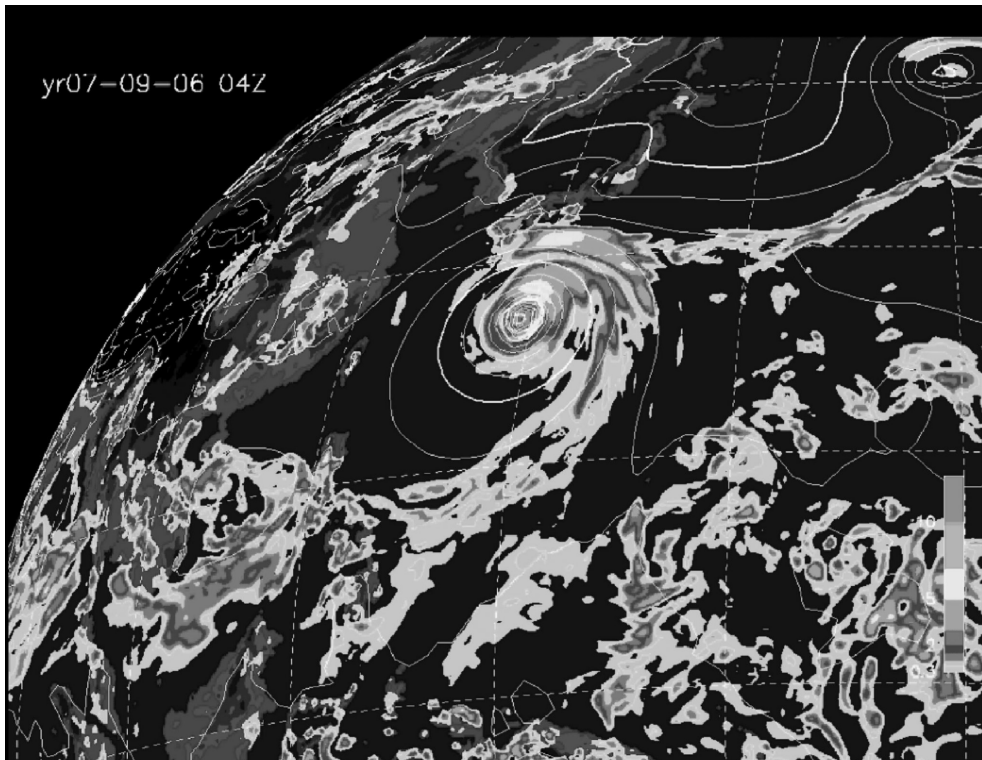
一見矛盾しているように見える結果をどのように説明できるかである。

3. 温暖化で台風の数減り、強さは強くなる —その謎を解く—

Sugi *et al.* (2002) は、Sugi *et al.* (1997) の実験結果を詳しく解析し、温暖化によって台風の数減る理由を調べた。その結果、温暖化により熱帯の大気の上層が下層より暖まって大気の成層が安定化し、熱帯の大規模な大気の循環が弱くなることが台風の数減少と密接に関係していることが示された。大気が安定になると、積乱雲の活動によって同じ量の凝結熱が放出された場合に、その加熱によって発生する上昇流や補償下降流は弱くなる。温暖化した場合には、大気中の水蒸気量が増えることにより降水量も増えるが、降水量（凝結熱）が増えることにより上昇流が強くなる効果と、大気が安定化することにより上昇流が弱くなる効果とを比べると、後者のほうが大きい。このため、温暖化すると熱帯の大規模な大気の循環が弱くなるのである。ここで重要な点は、温暖化して水蒸気が大幅に増えても、降水量は大幅には増えないという点である。これは、降水量は供給される水蒸気の量に



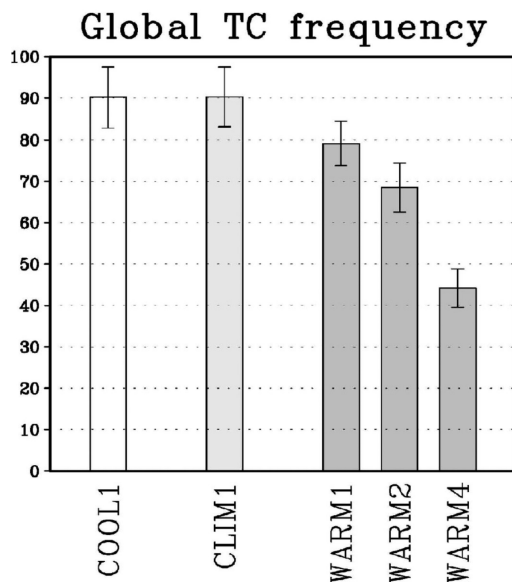
第2図 台風の最大風速ごとの頻度分布。(a) Sugi *et al.* (2002) より、実線が現在気候を、破線が温暖化時を、点線は観測値を示す。(b) Knutson *et al.* (1998) より、破線が現在気候を、実線が温暖化時を示す。(c) Oouchi *et al.* (2006) より、太実線が現在気候を、細実線が温暖化時を、点線は観測値を示す。



第3図 地球シミュレータで水平分解能20 km の気象研究所・気象庁全球大気モデルによりシミュレートされた台風（「人・自然・地球共生プロジェクト」第4課題 気象研究所・気象庁・地球科学技術総合推進機構合同研究チーム作成のアニメーションより）。白い部分が雲域を示す。

よってコントロールされるのではなく、大気の放射冷却の量によってコントロールされているためである (Allen and Ingram 2002)。

Yoshimura and Sugi (2005) は、温暖化したときに台風の数が減る理由をさらに調べるために、海面水温を変えずに大気中の二酸化炭素濃度を増加させた場合と、逆に二酸化炭素濃度を変えずに海面水温だけを増加させた場合の実験を比較した。その結果、第4図のように、海面水温だけを増加させても台風の数はいずれもあまり変わらないが、二酸化炭素だけを増加させると、台風の数が大幅に減少することが明らかになった。海面水温だけを増加させると、降水量が増加するとともに、大気の安定度も増加する。この場合には、降水量が増加して大気の循環が強まる効果と、安定度が増加して循環が弱まる効果が互いに打ち消しあっていると考えられる。一方、二酸化炭素だけを増加させると、降水量は減少するが、安定度は変化しない。このため、大気の循環が弱まり台風の数が増えると考えられる。このことから、温暖化で台風の数が増える理由としては、二酸化炭素だけを増やした場合に降水量が減少することが重要であることがわかる。



第4図 左の3つの棒グラフは海面水温だけを2°Cずつ増加させたときの熱帯低気圧の数の変化を示す。右の2つの棒グラフは二酸化炭素だけを2倍および4倍に増加させたときの熱帯低気圧の数の変化を示す。(Yoshimura and Sugi 2005)

Sugi and Yoshimura (2004) は、二酸化炭素だけを増やした場合に、降水量が減少する理由を考察した。一般に、二酸化炭素のような温室効果ガスの濃度を増やすと、大気放射冷却は増加し、それに伴って降水量も増加する。ところが、海面水温を変えずに二酸化炭素濃度を増加させると、大気下層で放射冷却が減少し、それに伴って降水量が減少する。これは、二酸化炭素と水蒸気が同じ波長帯に赤外放射の吸収帯を持つため (オーバーラップ効果)、上空の二酸化炭素が放出した赤外放射を下層の水蒸気が吸収することにより大気が暖まることによるものである。地球の大気に二酸化炭素と水蒸気が共存するため、オーバーラップ効果により二酸化炭素の増加に伴い降水量が減少し、それにより台風が減少するというのである。

以上の説明は、温暖化することにより、大気が安定になる効果が、水蒸気が増えて降水が増える効果よりも大きいために、大気の循環が弱まり台風の数が増えるというものである。この説明と、温暖化すると台風の強さが強くなる、あるいは強い台風の数が増えるということは、一見矛盾しているように思える。この点についてはどのように考えればよいのだろうか？これは次のように考えることができる。温暖化で台風の数が増えることの説明では、温暖化で大気が安定になるが、降水量は大幅には増えないために大気の循環が弱くなる、すなわち運動エネルギー[†]が減少することを示した。しかし、このことは、台風を含む多くの様々な強さの熱帯擾乱の全体への運動エネルギーの供給が減ることを示していて、必ずしも個々の熱帯擾乱の運動エネルギーが減少することを意味しているわけではない。一種の競争原理が働いて、多数の熱帯擾乱が台風の強さまで発達できなくなる可能性もある一方で、少数の台風が強くなる可能性もある。すなわち、1つの台風が多くのエネルギーを独り占めして発達する可能性を否定するものではない。このような仮説により、全体として台風の数が増えるが、強い台風の数は減る、という実験結果を説明できる。

4. おわりに

数値実験の結果から、地球が温暖化すると台風 (熱帯低気圧) の総数は減るが、強い台風やハリケーンの数が増加することが予想されている。温暖化で台風の数が増える理由は、水蒸気の増加により台風に供給され

[†] 正確には、対流に伴う質量フラックス (以下同様)。

る熱エネルギーが増加する効果と、大気が安定化することにより台風に供給される運動エネルギーが減少する効果を比べたときに、後者の方が大きいためであると考えられる。これに関連して重要な点は、温暖化により大気中の水蒸気が大幅に増加するのに対して、降水量（凝結熱）は大幅には増加しないということである。降水量は大気の放射冷却量によってコントロールされており、温暖化で降水量が大幅に増加しないということは、放射冷却量が大幅には増えないことによるものである。これには、二酸化炭素と水蒸気の共存による放射吸収のオーバーラップ効果が重要な役割を果たしている。この効果がなければ、温暖化時の降水量の増加はもっと大きくなり、台風の数も減ることはないであろう。

温暖化で、台風の総数が減るにもかかわらず、強い台風が増加することについては、一種の競争原理によって一部の台風が限られたエネルギーを独占して発達するという可能性が考えられる。これはまだ1つの仮説に過ぎず、今後、詳しく検討・検証していく必要がある。水平分解能20 kmのモデルで再現される台風は、それ以前の実験と比べて格段に現実に近いものとなっている。しかしながら、20 kmの水平分解能でもまだ十分とは言えず、その実験結果の信頼性を疑問視する見解も出されている。水平分解能20 kmのモデルでは、台風のエネルギー源となっている、個々の積乱雲を直接表現することは出来ないために、積乱雲の集団の全体としての効果をパラメタリゼーションによって間接的に表現している。このパラメタリゼーションが、モデルの台風の発生や発達にどのように影響しているかということを、今後、詳しく検討すべきである。そのためには、個々の積乱雲を直接表現できる水平分解能1～2 kmの雲解像モデル（CRM）を用いた実験を行って、その結果と20 kmの水平分解能のモデルの結果を比較・検討する必要がある。CRMを用いて台風の発生・発達メカニズムを調べ、水平分解能20 kmのモデルにおける台風の発生・発達メカニズムが、どの程度実際の現象を再現しているかを検討する必要がある。

参 考 文 献

- Allen, M. R. and W. J. Ingram, 2002 : Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*, **419**, 224–232.
- Anthes, R. A., W. Corell, G. Holland, J. W. Hurrell, M. C. MacCracken and K. Trenberth, 2006 : Hurricanes and global warming—Potential linkages and consequences. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **87**, 623–628.
- Bengtsson, L., M. Botzet and M. Esch, 1996 : Will greenhouse gas-induced warming over the next 50 years lead to higher frequency and greater intensity of hurricanes? *Tellus*, **48A**, 57–73.
- Broccoli, A. J. and S. Manabe, 1990 : Can existing climate models be used to study anthropogenic changes in tropical cyclone climate? *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 1917–1920.
- Emanuel, K. A., 1986 : An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I : Steady-state maintenance. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 585–604.
- Emanuel, K. A., 1987 : The dependence of hurricane intensity on climate. *Nature*, **326**, 483–485.
- Emanuel, K. A., 2005 : Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, **436**, 686–688.
- Evans, J. L., 1992 : Comment on “Can existing climate models be used to study anthropogenic changes in tropical cyclone climate”. *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 1523–1524.
- Haarsma, R. J., J. F. B. Mitchell and C. A. Senior, 1993 : Tropical disturbances in a GCM. *Climate Dyn.*, **8**, 247–257.
- Knutson, T. R., R. E. Tuleya and Y. Kurihara, 1998 : Simulated increase of hurricane intensities in a CO₂-warmed climate. *Science*, **279**, 1018–1020.
- Landsea, C. W., 1997 : Comments on “Will greenhouse gas-induced warming over the next 50 years lead to higher frequency and greater intensity of hurricanes?” *Tellus*, **49A**, 622–623.
- Lighthill, J., G. Holland, W. Gray, C. Landsea, G. Criag, J. Evans, Y. Kurihara and C. Guard, 1994 : Global climate change and tropical cyclones. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **75**, 2147–2157.
- Oouchi, K., J. Yoshimura, H. Yoshimura, R. Mizuta, S. Kusunoki and A. Noda, 2006 : Tropical cyclone climatology in a global-warming climate as simulated in a 20 km-mesh global atmospheric model : Frequency and wind intensity analyses. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 259–276.
- Pielke, R. A., C. Landsea, M. Mayfield, J. Laver, and R. Pasch, 2005 : Hurricanes and global warming. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **86**, 1571–1575.
- Pielke, R. A., C. Landsea, M. Mayfield, J. Laver and R. Pasch, 2006 : Reply to “Hurricanes and global warming—Potential linkages and consequences”. *Bull.*

- Amer. Meteor. Soc., **87**, 628-631.
- Sugi, M., A. Noda and N. Sato, 1997 : Influence of global warming on tropical cyclone climatology : An experiment with the JMA global model. WMO/TD-No. 792, 7.69-7.70.
- Sugi, M., A. Noda and N. Sato, 2002 : Influence of the global warming on tropical cyclone climatology : An experiment with the JMA global model. J. Meteor. Soc. Japan, **80**, 249-272.
- Sugi, M. and J. Yoshimura, 2004 : A mechanism of tropical precipitation change due to CO₂ increase. J. Climate, **17**, 238-243.
- 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.
- Yoshimura, J. and M. Sugi, 2005 : Tropical cyclone climatology in a high-resolution AGCM—Impacts of SST warming and CO₂ increase—. SOLA, **1**, 133-136.
-