

地球温暖化予測に基づく将来台風変化予測とその確率モデリング

Prediction and Stochastic Modeling of Future Typhoon Characteristics based on AGCM Projections under Global Warming Scenario

安田誠宏¹・安藤 圭²・森 信人³・間瀬 肇⁴

Tomohiro YASUDA, Kei ANDO, Nobuhito MORI and Hajime MASE

The present study evaluated the prediction power of a stochastic typhoon model for the typhoons to attack three major bay areas in Japan, by taking typhoon characteristics based on AGCM projections under global warming scenario. Utilizing the Monte Carlo simulation as the stochastic modeling on the data of past typhoons for 100 years, it was found out that the number of typhoons that would hit Japan will decrease by 30 percent and that the mean of the lowest central atmospheric pressures of typhoons would be more less equal with one another. On the other hand, it was found that the arrival probability of the typhoons of 920 hPa or less in their central atmospheric pressures will increase by several percent.

1. 緒 論

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第4次報告書 (AR4, 2007) によると, 現在進行中の熱帯域の海面水温上昇に伴って, 将来の熱帯低気圧 (台風及びハリケーン) の強度は増大し, 最大風速や降水強度は増加する可能性が高いと報告されている. これは, 温暖化の進行に伴って気象が極端化し, 将来甚大な災害がもたらされる恐れがあることを示しており, 市民の生活に対する影響が強く懸念される. そのため, 予測され得る温暖化環境下において, 台風に代表される極端現象に関して, できる限り正確かつ定量的な影響評価を行う必要がある.

しかしながら, 温暖化予測に用いられる現状の全球気候モデルは, 台風の気候特性を再現するにはまだ十分ではなく, その予測結果にはバイアスがある. AR4においても, 世界的に熱帯低気圧の発生数が減少するとの予測については, 信頼性が低いと記述されており, 熱帯低気圧の発生事象数や日本に上陸する台風の特性に関しては, 温暖化予測実験結果だけで将来変化を論ずることは難しい. そのため, 台風に関する温暖化予測においては, 統計解析に基づく確率的な検討が必要といえる.

これまでに温暖化予測実験結果の知見を取り入れて確率的に評価した研究としては, 気象研究所・気象庁のRCM20によるIPCCの温暖化ガス排出シナリオA2に基づいた温暖化予測実験結果を「確率台風モデル」へ導入し, 日本沿岸における台風特性の変化を試算した橋本ら (2005) によるものがある. 確率台風モデルは, 台風の

属性値 (中心位置, 中心気圧, 最大風速半径など) や, その時間変化量を統計解析して得られた確率分布や回帰式に基づき, モンテカルロ・シミュレーションによって任意の期間中に発生する台風の属性値を与えるモデルであり, 既に数多くの研究がなされてきている. 例えば, 高潮推算 (長友ら, 1980) や降雨と高潮の同時生起特性評価 (端野・桑田, 1987), 高潮と波浪の極値推定 (山口ら, 1994, 1995; 野中ら, 2002), 潮位と越波量の確率評価 (加藤ら, 2003), 自己回帰モデルの統計的性能の詳細な検討 (橋本ら, 2001), 高潮と高波の同時生起確率評価 (國富ら, 2005) などに適用されている.

橋本ら (2005) の研究では, 統計解析の結果に基づき, 日本近海における台風属性値の時間変化量の空間平均場を北へ1.5°または東へ1.5°平行移動させることで, 地球温暖化の影響を考慮しており, 三大湾 (東京湾, 伊勢湾, 大阪湾) の周辺に襲撃する台風の中心気圧や風速の極値が変化することを示している. 河合ら (2006) は, 空間平均場が北へ15°平行移動するという橋本ら (2005) の仮定に基づき, 瀬戸内海の高潮の極値推定を確率台風モデルを用いて行い, 地球温暖化で大きな高潮偏差や高い潮位が発生しやすくなるが, その変化に海域差があると述べている. さらに, 河合ら (2007) は, 瀬戸内海だけでなく東京湾や伊勢湾についても, 高潮の極値と継続時間について確率台風モデルを用いて検討し, 将来の台風変化に伴って高潮偏差の極値が増減すると推測されるが, あらゆる海域で増加するとは限らない可能性があることを示している.

本研究では, 超高解像度全球大気循環モデルGCM20によるA1Bシナリオに基づく温暖化予測実験結果 (KAKUSHIN, 2007) を用いる. この結果をもとに, 日本近海での現況と将来の台風特性を分析し, 得られた変

1 正会員 博(工) 京大助教 防災研究所
2 学生員 京大大学院 工学研究科
3 正会員 博(工) 京大准教授 防災研究所
4 正会員 工博 京大教授 防災研究所

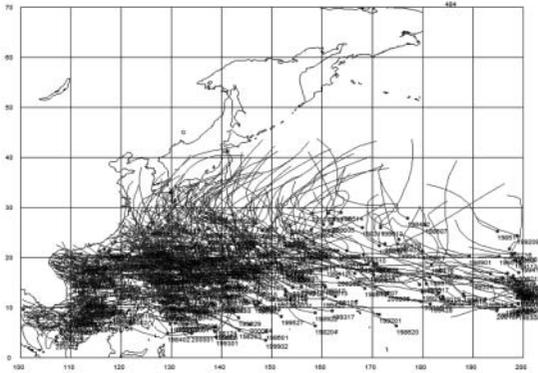


図-1 AGCMによる現在気候下での台風経路(1979~2003年)

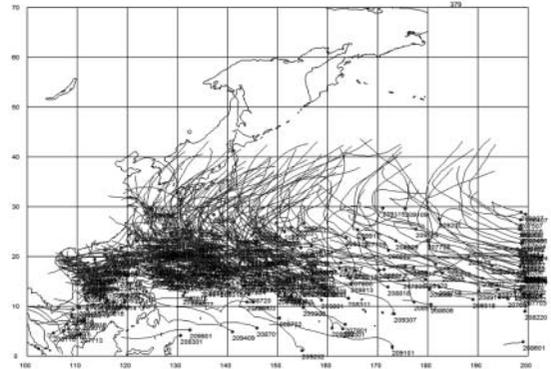


図-2 AGCMによる将来気候下での台風経路(2075~2099年)

化の特徴をこれまでの台風経路(気象庁ベストトラック)に反映させた将来台風の想定トラックを作成する。そして、将来台風想定トラックをもとに確率台風モデルを用い、所定期間(例えば、100年間)に発生する台風のモンテカルロ・シミュレーションを繰り返し、将来台風特性を確率的に評価する。以上のように、本研究は、温暖化予測実験結果だけでは定量的に議論できない、日本近海における将来台風の影響評価の方法論を提案するものである。

2. 温暖化予測実験データ

20km格子の超高解像度全球大気モデル(MRI/JMA AGCM, 以下AGCM)による最新の温暖化予測実験結果を用いた。現在気候実験の海面水温(SST)・海水密接度・海水厚については観測値が用いられている。SST・海水密接度は、英国ハドレーセンターによる年々変動を含んだ月平均値である。一方、将来気候実験(近未来実験・21世紀末実験)では、IPCC AR4のために実施された大気海洋結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP3)による、マルチモデルアンサンブル平均SSTから取り出した将来トレンドに、観測SSTの年々変動を加えたものが用いられている。

現在条件については1979~2003年、将来条件については21世紀末の2075~2099年の各25年間の予測結果を用いた。また、Oouchiら(2006)の方法により、台風属性値として、6時間毎の台風の中心位置(台風経路)、発生個数、台風出現位置および消滅位置を抽出した。対象範囲は、北西太平洋の東経100~200度、北緯0~70度である。

なお、AGCMによる全球の海上風の解析およびそれを用いた波候の将来変化予測については、森ら(2009)によって検討されている。

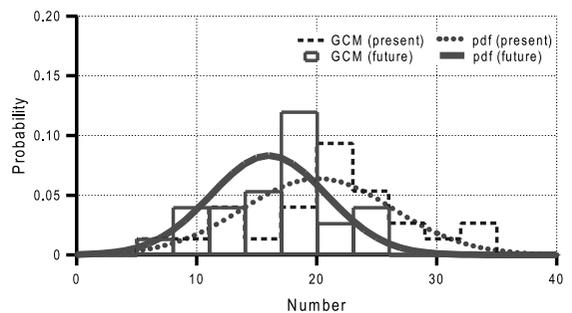


図-3 現在気候と将来気候による台風の年発生数の変化

3. 全球気候モデルによる台風の将来変化予測

AGCMによる現在再現実験結果と将来予測実験結果から得られた台風について、その特性の変化を比較した。

(1) 台風経路

図-1および図-2は、それぞれ現在再現実験による台風経路、将来予測実験による台風経路である。現在、将来のいずれにおいても、AGCMでは日本列島を通過して北東方向に抜けていく台風の数が少ない。

(2) 台風発生個数

台風の発生個数について、図-3のように、AGCMの現在と将来実験結果を比較した。発生した台風の総数は、現在条件で485個(19.4個/年)、将来条件で381個(15.2個/年)であった。このことから、温暖化の影響で、モデル上で発生する台風の個数は4.2個/年減少していた。一方で、AGCMの現在再現データとベストトラックデータを比較したところ、AGCMはベストトラック(26.7個/年)よりも発生する台風が27%少なく、大きなバイアスがある。

(3) 台風発生・消滅位置

台風の発生位置、消滅位置について、AGCMの現在再

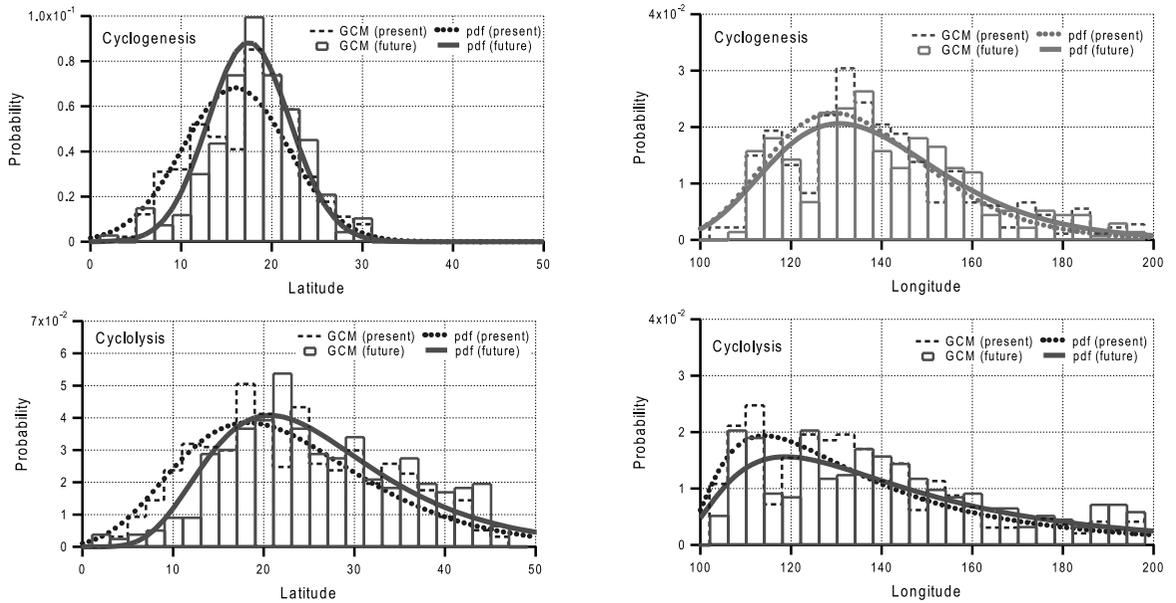


図-4 AGCMによる台風位置の変化（上：発生，下：消滅，左：緯度方向，右：経度方向）

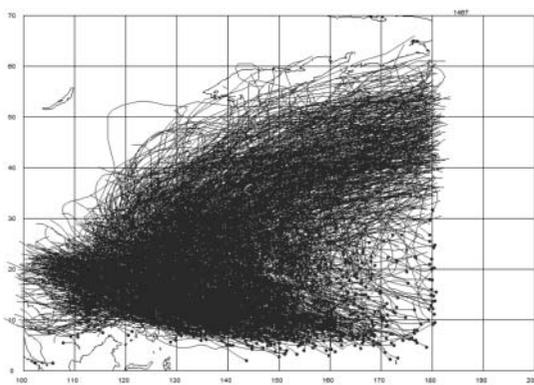


図-5 1951～2005年の気象庁ベストトラック

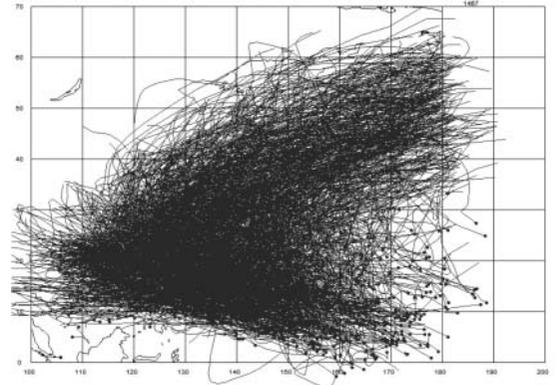


図-6 AGCM 現在と将来の変化割合を基に歪ませた将来想定台風経路

現と将来予測のデータを比較した結果を図-4に示す。緯度方向は2度ごと、経度方向は4度ごとに、台風出現個数および消滅個数を求め、台風の総数で除し、さらに区切幅で除して確率密度分布を求めた。その分布に対数正規分布をあてはめた結果(pdf)も示している。

図-4より、将来台風では、現在台風と比較して、全体として出現位置、消滅位置が共に北東にずれる傾向がわかる。緯度の出現位置分布に注目すると、あてはめた対数正規分布の最頻値は、現在が北緯17.6度、将来が北緯18.5度であり、0.9度北に移動する。また経度の出現位置分布に注目すると、あてはめた対数正規分布の最頻値は、現在が東経131.5度、将来が東経132.6度であり、約2度東に移動する。次に、緯度の消滅位置分布に注目すると、

あてはめた対数正規分布の最頻値は、現在が北緯19.3度、将来が北緯21.7度となって、約2.4度北にシフトする。また、経度の消滅位置分布に注目すると、あてはめた対数正規分布の最頻値は東経116.1度の現在の位置が、将来では東経120.8度となっており、約4.7度東に移る。以上の結果から、温暖化によって台風の経路が北上し、さらに東に移動するのに伴い、将来的に台風被害地域が変化することが予想される。

4. 将来想定台風経路の作成と確率台風モデルへの適用

(1) 確率台風モデル

上記の結果をふまえ、國富ら(2005)によって開発さ

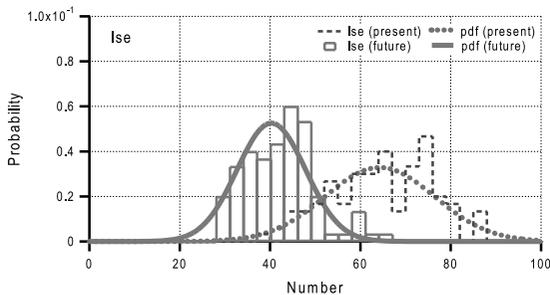
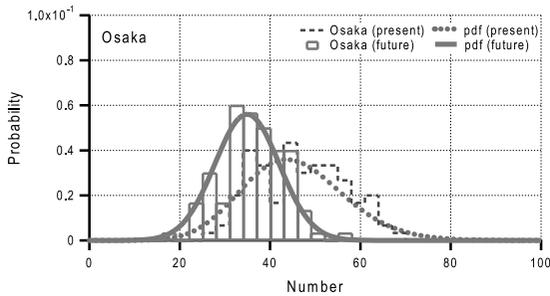
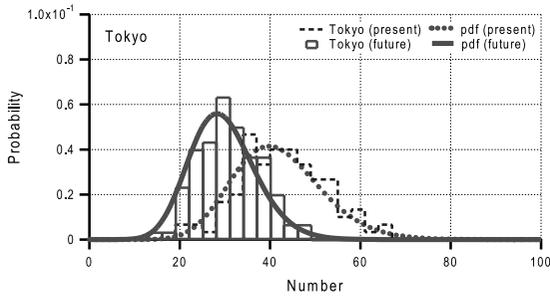


図-7 三大湾への台風来襲確率の変化

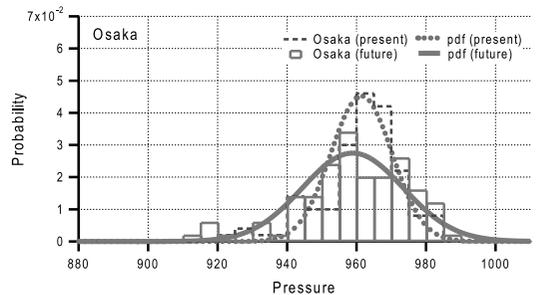
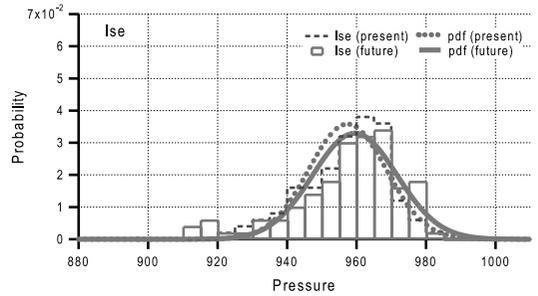
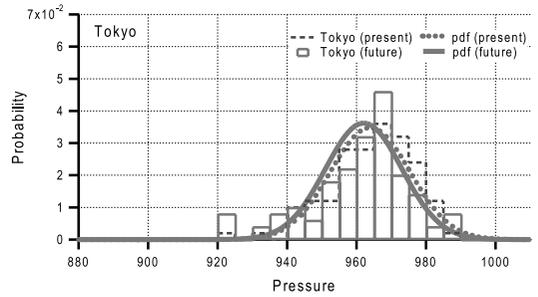


図-8 三大湾来襲台風の最低中心気圧の変化

れた確率台風モデルを用いて、統計的評価を行った。このモデルでは、一般的な自己回帰モデルとは異なり、任意の空間（セル）ごとに、台風諸元のセル進入時諸元量と、それに対するセル内における単位時間あたりの諸元変動量（諸元変動率）を変数として扱い、セルにおける次時間の諸元量を求める方法がとられている。

確率台風モデルを作成する際に用いた資料は、図-5に示した1951～2005年の気象庁ベストトラックデータであり、台風資料の数は55年間で1472個であった。ここから、経緯度とも1度間隔で台風諸元情報を抽出した。ただし、取得個数が2個以下と少ないセルについては、周囲1セルの範囲まで取得範囲を広げ、当該セルにおける諸元情報とした。抽出した情報は、1度四方のセルに侵入してきた時の台風の中心気圧、進行速度、進行方位および、台風が当該セルを出て行くまでに変化した同一諸元の変動率である。

(2) 将来想定台風経路モデルの作成

現在に対して将来の台風発生個数は、図-3のように対

数正規分布の最頻値が、20.1個から15.9個に減少していた。ベストトラックによる台風の発生個数は、対数正規分布の最頻値は24.7個であった。これらの関係から、 $24.7 \times 15.9 / 20.1 = 19.5$ 個を温暖化後の台風発生個数についての対数正規分布の最頻値とした。また、AGCMの現在および将来、ベストトラックにあてはめた対数正規分布の標準偏差は、それぞれ6.2, 4.8, 5.6であった。これらの関係から、 $5.6 \times 4.8 / 6.2 = 4.3$ を温暖化後の台風発生個数についての対数正規分布の標準偏差とした。

また、図-4に示した、AGCM現在と将来の台風位置についてあてはめた対数正規分布のずれに応じて、緯度・経度の区間毎にベストトラックの発生位置および消滅位置を歪ませて、将来想定台風経路を作成した。ただし、発生時の台風の中心気圧は変化させていない。将来想定台風モデルの全経路を描いたものを図-6に示す。

5. 確率台風モデルを用いた将来の台風変化特性

現在条件には気象庁ベストトラックを、将来条件には

将来想定台風経路をそれぞれ用いて、確率台風モデルによる台風への温暖化影響評価を、人口と資産が集積し、海拔ゼロメートル地帯が広がっている三大湾（東京湾、伊勢湾、大阪湾）を対象に行った。再現期間は100年であり、100回の繰り返しシミュレーションを行った。

(1) 台風来襲確率

三大湾への台風来襲確率を図-7に示す。東京湾では、現在条件の平均来襲個数41.9個が将来条件では29.7個に、伊勢湾では64.3個が40.3個に、大阪湾では45.4個が34.9個に変化する。標準偏差は、東京湾9.88→7.28、伊勢湾12.14→7.58、大阪湾11.26→7.11と一様に小さくなる。将来発生する台風の総個数が現在より減少すると同様に、東京湾、伊勢湾および大阪湾のいずれの地域でも、来襲する台風数は減少することがわかった。

(2) 最低中心気圧

図-8は、三大湾近傍を通過する時の台風の最低中心気圧について示したものである。東京湾では、現在条件の平均値である963.9hPaが将来条件では962.1hPaに微減、伊勢湾では957.4hPaが959.5hPaに微増、大阪湾では961.4hPaから959.0hPaに微減する。標準偏差については、東京湾11.46→11.01、伊勢湾11.14→12.09、大阪湾8.81→14.51に変化する。将来気候での最低中心気圧の平均値は、現在気候に比べてほとんど変わらないか、若干小さくなるといえる。しかしながら、三大湾すべてに共通して、将来気候下のみにおいて、中心気圧が低い920hPa以下の台風が数%来襲しており、台風の強度が極端化することが予測される結果となった。量的な比較はできないが、海上風や高波についても将来極端化することが示されている（森ら、2009）。

6. 結 論

本研究では、気候予測実験結果に基づく現在と将来の台風の変化特性を考慮して、想定将来台風経路モデルを作成した。確率台風モデルを用いて、将来台風の確率モデリング結果と、気象庁ベストトラックを基にした現在台風の結果を比較し、三大湾に来襲する台風特性の温暖化に伴う変化を考察した。得られた知見をまとめると以下のようなものである。

- 1) 将来発生する台風の総個数が現在より減少すると同様に、東京湾、伊勢湾および大阪湾のいずれの地域でも来襲する台風数は減少する。
 - 2) 将来気候での最低中心気圧の平均値は、現在気候に比べてほとんど変わらないか、若干小さくなる。
 - 3) 三大湾すべてに共通して、将来気候下のみにおいて中心気圧が低い920hPa以下の台風が数%来襲しており、台風の強度が極端化することが予測される。
- なお、今回得られた結果は、ある一条件における全球

気候モデルの予測結果に基づいているため、モデルの不確実性を考慮できていない。そのため、初期値境界値を変えた複数のアンサンブルランの結果を取り入れるなどして、より確率的な評価が必要と考えられる。さらに、AGCMの計算結果にベストトラックに基づくバイアス補正を施し、より信頼度が高まった将来予測台風経路を用いて、同様の検討を行いたいと考えている。

謝辞：本研究は、文部科学省21世紀気候変動予測革新プログラム「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究」および科学研究費補助金基盤(B)(20360220)のサポートによる成果であり、ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 加藤史訓・鳥居謙一・柴木秀之・鈴木勝之(2003)：確率的台風モデルを用いた潮位と越波量の確率評価，海岸工学論文集，第50巻，pp.291-295.
- 河合弘泰・橋本典明・松浦邦明(2006)：確率台風モデルを用いた地球温暖化後の瀬戸内海における高潮の出現確率分布の推定，海岸工学論文集，第53巻，pp.1271-1275.
- 河合弘泰・橋本典明・松浦邦明(2007)：確率台風モデルを用いた内湾の高潮の極値と継続時間の推定，海岸工学論文集，第54巻，pp.301-305.
- 國富將嗣・高山知司(2005)：大阪湾における高潮と高波の同時生起確率特性，海岸工学論文集，第52巻，pp.216-220.
- 長友文昭・鶴谷広一・福島 毅・宮原誠一(1980)：確率を考慮した高潮の推算手法について，第27回海岸工学講演会論文集，pp.557-561.
- 野中浩一・山口正隆・畑田佳男・大福 学(2002)：確率的台風モデルを利用した波高極値の推定システムの日本海における適用性，海岸工学論文集，第49巻，pp.176-180.
- 端野道夫・桑田康雄(1987)：確率的台風モデルによる降雨・高潮の同時生起性評価，土木学会論文集，No.387/II-8，pp.237-246.
- 橋本典明・河合弘泰・松浦邦明(2005)：地球温暖化を考慮した将来の台風特性の解析と確率台風モデルへの導入，海岸工学論文集，第52巻，pp.1221-1225.
- 森 信人・岩嶋亮太・安田誠宏・間瀬 肇・Tracey H. Tom(2009)：地球温暖化予測に基づく全球の海上風・波浪の将来変化予測，海岸工学論文集，第56巻（印刷中）.
- 山口正隆・畑田佳男・花山格章(1994)：わが国太平洋岸における高潮の極値推定，海岸工学論文集，第41巻，pp.281-285.
- 山口正隆・畑田佳男・花山格章(1995)：伊勢湾における高潮の極値の推定，海岸工学論文集，第42巻，pp.321-325.
- Oouchi, K., Yoshimura, J., Yoshimura, H., Mizuta, R., Kusunoki, S. and Noda, A. (2006): Tropical Cyclone Climatology in a Global- Warming Climate as Simulated in a 20km-Mesh Global Atmospheric Model: Frequency and Wind Intensity Analyses, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 84, No. 2 pp.259-276.
- IPCC AR4 (2007): IPCC fourth assessment report (AR4), <http://www.ipcc.ch/>.
- KAKUSHIN (2007): 21世紀気候変動予測革新プログラム，Innovative program of climate change projection for the 21st century, Japan, <http://www.kakushin21.jp/>.