

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

河合弘泰¹・橋本典明²・松浦邦明³

確率台風モデルを用いて現在と地球温暖化後の将来の気候下における台風の条件を与え、それぞれの台風に対する瀬戸内海の高潮を数値計算モデルで計算し、得られた高潮偏差や天文潮位と重ね合わせた潮位の極値分布を調べた。現在の気候を仮定した 500 年間のシミュレーションの中にも、現行の高潮対策施設の想定を超える高潮偏差を発生させる台風が現れた。また、地球温暖化に伴う台風特性の変化によって瀬戸内海の高潮偏差の極値は増加するが、その傾向はもともと高潮の顕著な海域で強い。台風特性の変化と平均海面の上昇によって潮位の極値も高くなるが、大阪では台風特性の変化、高松では平均海面の上昇が大きく寄与すると考えられる。

1. はじめに

2005 年のハリケーン・カトリーナによる高潮は、米国ニューオーリンズ市周辺の運河や海岸の堤防を決壊させ、米国史上最大級の自然災害をもたらした。この災害は設計以上の高潮によってもたらされたものである。一方、日本の高潮が顕著な内湾では、1953 年の台風 13 号や 1959 年の伊勢湾台風による未曾有の高潮災害を契機として、朔望平均満潮位に伊勢湾台風級のモデル台風で発生する高潮偏差を上乗せした潮位、あるいは既往最高の潮位が計画高潮位として定められ、高潮対策施設が整備されてきた。このように定められた潮位を超える潮位の発生は非常に稀と考えられるが、最近でも 1999 年の台風 18 号で八代海や周防灘に、2004 年の台風 16 号で備讃瀬戸周辺に、それぞれ計画高潮位を超える潮位が発生し、死者を伴う高潮氾濫に至ったことも事実である。さらに、地球温暖化に伴って平均海面が上昇しつつあり、台風が強大化する可能性もある (Oouchi ら, 2006)。これらのことは、今後、計画高潮位を超える潮位の発生確率を増加させ、沿岸の構造物の破壊確率も増加させると考えられる (例えば, Kawai, 2000; 酒井・岡安, 2004)。

さて、沿岸部の安全性を市民に説明するためには、現行の高潮対策施設の計画高潮位の再現期間や、この潮位を超えた潮位の出現特性を明らかにしておかなければならない。ところが、高潮が顕著な内湾のあらゆる港湾・海岸に検潮所が設置されているわけではなく、設置されていても検潮記録が蓄積された年数は限られている。そのため、過去の検潮記録だけを頼りに高潮偏差や潮位の極値分布を正確に推定することは難しい。また、将来に向かって予測することもできない。

そこで本研究では、現在と将来の気候下における台風の諸元を確率台風モデルによって与え、これらの台風による高潮の出現特性を、瀬戸内海を例として解析した。

2. 長期台風データの作成と高潮の推算

(1) 確率台風モデルによる長期台風データの作成

「確率台風モデル」とは、過去の台風の属性値 (例えば、中心位置、中心気圧、最大風速半径) を統計処理して得られた属性値の出現確率分布や自己回帰式に基づき、モンテカルロ法で任意の年数間の属性値を与えるものである。本研究では、1951~2000 年の台風に基づいた確率台風モデル (橋本ら, 2003) を用いて、「現在」の気候下における台風を与えた。また、気象庁・気象研究所では IPCC の温暖化ガス排出シナリオ A2 に基づいて気候予測をしている。この予測で得られた 2081~2100 年の気圧と風のデータ (石原ら, 2004) を統計解析し、その結果に基づいて「台風属性値の時間変化量の空間場が北へ緯度で 1.5° 移動する」と仮定した、確率台風モデル (橋本ら, 2005) も用い、「将来」の気候下における台風を与えた。

本研究では、再現期間の長い高潮偏差や潮位の極値を調べるために、それぞれの気候条件下における 500 年分の台風を用いることにした。そして、瀬戸内海に顕著な高潮を発生させる可能性があるものとして、図-1 に破線で示す楕円 (東経 132.5°, 北緯 34° を中心に南北に短半径 200 km, 東西に長半径 400 km) を中心気圧が 980 hPa 以下で通過する台風を抽出した。瀬戸内海には過去に室戸台風、4216 号 (周防灘台風)、9119 号 (りんご台風)、9918 号が顕著な高潮を発生させているが、確率台風モデルでこれらと全く同じ台風が与えられたときにもこの抽出条件を満たすように、この楕円を設定している。その結果、現状の気候下では 795 個、将来では 884 個の台風が抽出された。

(2) 高潮の推算

前節 (1) で与えた個々の台風に対する高潮を計算し

1 正会員 修(工) (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部海洋水理・高潮研究室長

2 フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院環境都市部門

3 水修 (財)日本気象協会 首都圏支社調査部応用気象課

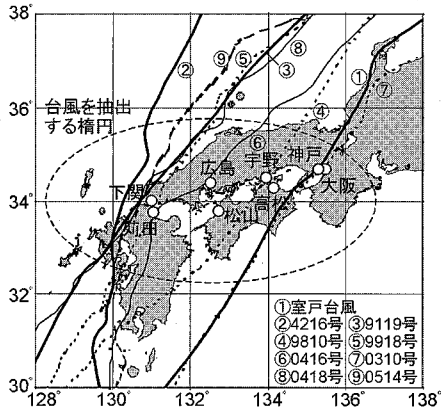


図-1 台風の抽出条件と既往の代表的な台風

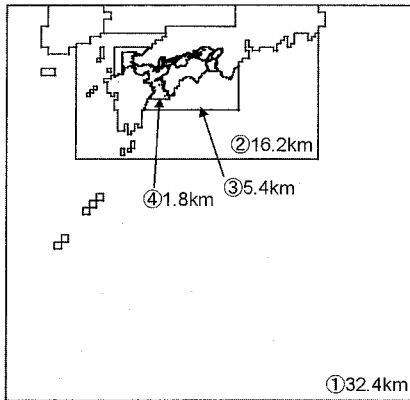


図-2 高潮の計算領域

た。台風の海面気圧には Myers の分布を仮定し、海上風は傾度風と場の風の成分をベクトル合成する経験的力学モデルで推定した。風速低減係数には、橋本ら(2003)と同じ 0.65 を用いた。これらの海面気圧と海上風を外力とし、単層の線形長波方程式に基づく数値計算モデルで流れを計算した。ただし、実務で一般的に行われているように、天文潮位は一定とし、高潮偏差だけを計算する方法にした。その計算領域は、図-2 に示すように、日本列島の南半分を含む太平洋沿岸を 32.4 km 間隔の格子で再現し、その内部に細かな格子の領域を接続させ、瀬戸内海の全域を 1.8 km 間隔の格子で再現したものである。

以上の方法による高潮推算の精度を確認するために、最近の 6 つの台風 (9810 号, 9918 号, 0310 号, 0416 号, 0418 号, 0514 号; それぞれのコースは図-1 を参照) について推算した結果を図-3 に示す。周防灘の西端に位置する荊田や下関では観測値より小さい傾向があるものの、それ以外の地点では観測値に近い値が得られている。

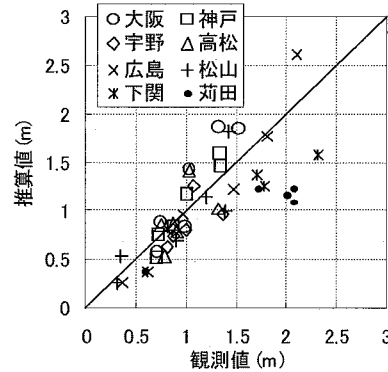
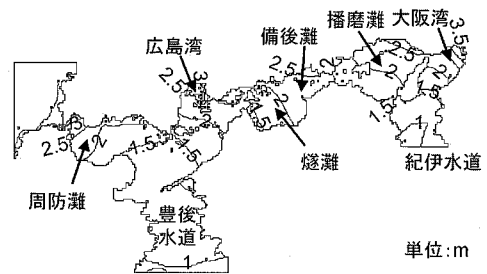
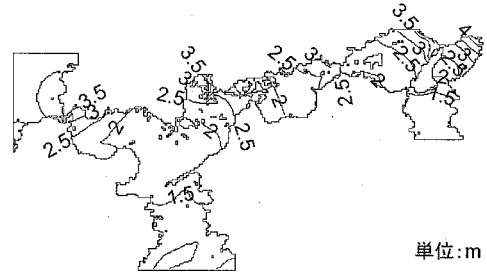


図-3 高潮偏差の計算精度



(a) 現状



(b) 将来

図-4 500年間で最大の高潮偏差

3. 最大の高潮偏差とそれを発生させる台風の条件

(1) 最大の高潮偏差

図-4 は、現在と将来の気候下について、500 年分の台風で得られた最大の高潮偏差の平面分布を示す。いわゆる「ワーストケース (あるいは可能最大) の高潮偏差」の定義については今後も議論が必要であるが、ここに示した値はそれに匹敵する高潮偏差であると思われる。

現在と将来の何れにおいても、大阪湾、播磨灘、燧灘・備後灘、広島湾では北東岸で、周防灘では西側で、それぞれ高潮偏差が顕著になりやすい。大阪湾などでは台風が中国地方に上陸した後に南東風の吹き寄せを受けて顕著な高潮が発生しており、これは東京湾、伊勢湾、有明海、八代海、鹿児島湾など他の南北に長い内湾と同

様なメカニズムによるものと考えられる。一方、周防灘では、台風が周防灘の南方に位置するときに東風の吹き寄せを受け、さらに台風が最接近したときに吸い上げを受けて、高潮偏差が顕著になると考えられる。河合ら(2001)は、伊勢湾台風級のモデル台風を経度で 0.25° 間隔の平行なコースに走らせた場合について、最大の高潮偏差の平面分布を求めているが、その分布とも似ている。

次に、現在と将来の気候下とを比較すると、紀伊水道や豊後水道ではほとんど差はないが、大阪湾の北東部などとも高潮が顕著な海域で、最大の高潮偏差が大きくなっている。

(2) 最大の高潮偏差を発生させる台風

現在の気候下でも、500年間のシミュレーションにおいて、大阪に約3.7mの高潮偏差を起こす台風が現れた。このことは、現行の計画偏差の3mを上回る高潮偏差が発生し得ることを意味している。この高潮偏差を起こした台風は、図-5に示すように大阪湾の西側を通過するものであり、現行の設計で想定する室戸台風のコースともよく似ている。最大高潮偏差の起時は台風が大阪湾を通り過ぎてからであり、このときの中心気圧は955 hPa、進行速度は95 km/hであった。また、高松でも高松のほぼ直上を通る台風によって約1.7mの高潮偏差が得られた。このコースは0416号と大きく異なるものである。最大高潮偏差の起時は台風が日本海に抜けてからであり、このときの中心気圧は940 hPa、進行速度は80 km/hであった。

この図には将来の気候下において、大阪や高松に最大の高潮偏差を起こした台風のコースも示してある。大阪に対しては現在の気候下における台風や室戸台風と似たコースであるが、高松に対しては現在の気候下の台風とも台風0416号とも異なるコースであった。

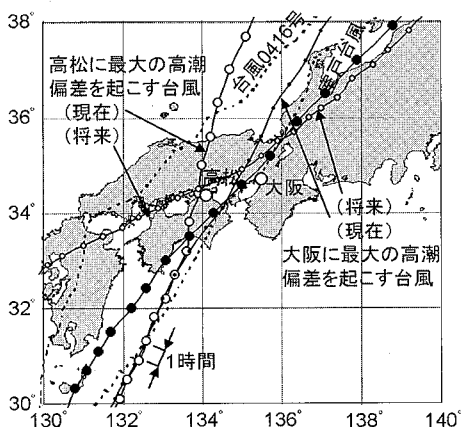


図-5 最大の高潮偏差を起こした台風

4. 高潮偏差の極値分布

各計算格子点において500年間の高潮偏差に対し極値統計解析を行った。あてはめに用いた極値分布は、Gumbel分布(極値Ⅰ型分布)、極値Ⅱ型分布($k = 2.5, 3.33, 5, 10$)、Weibull分布($k = 0.75, 1, 1.4, 2$)であり、これらの中からMIR指標(合田・小舟, 1989)で最適な分布を選択した。その結果、瀬戸内海のほとんどの領域でWeibull分布の $k = 1.4$ または 2.0 が選択され、周防灘の西部ではGumbel分布が選択された。

(1) 確率高潮偏差の分布

図-6に現在の気候下における10年、100年、1000年確率の高潮偏差の分布を示す。比較的身近な再現期間である10年の高潮偏差をみると、広島湾から大阪湾にかけての広範囲で1m以上であり、播磨灘や大阪湾の北東部では1.5m以上である。100年確率では、広島湾から大阪湾にかけて1.5m以上、播磨灘や大阪湾の北東部では2m以上になる。さらに、1000年確率になると、広範囲で1.5m以上となり、大阪湾や広島湾では3m以上になっている。なお、本論文で用いた高潮計算には、図-3で示したように周防灘の西部で小さな値になる傾向がある。そのため、100年確率の値は、山口ら(2002)に比べると、周防灘東部～広島湾ではほぼ同じ値であるが、周防灘西部では0.5m程度小さな値になっている。

図-7は将来の気候下における高潮偏差の分布を示す。現在の気候下と比べると、瀬戸内海の入口付近では大差はないが、大阪湾、広島湾、周防灘などとも高潮の顕著な海域で顕著に大きくなっている。すなわち、瀬戸内海の中にも地球温暖化による台風特性の変化の影響を敏感に受ける海域と受けにくい海域のあることが分かる。

(2) 代表地点における高潮偏差の極値分布

図-8は、大阪と高松を例に、高潮偏差の極値分布を示す。大阪では高松比べて、再現年数に対する高潮偏差の変化が大きい。大阪湾の高潮対策施設では設計潮位に3mの高潮偏差を想定しており、その再現年数は現在の気候下では約100年、将来には約40年まで縮むと推定される。一方、高松では台風0416号によって1.33mの高潮偏差が生じた。この高潮偏差の再現年数は現在の気候下でも約30年と推定され、それほど珍しいものではない。将来には10年以下の身近な存在になると推定される。

5. 潮位の出現特性

瀬戸内海は日本でも天文潮差(干満の差)が大きい海域の一つとして知られており、大潮時には大阪湾で約1.5m、備讃瀬戸付近で約2.5m、広島湾や周防灘では

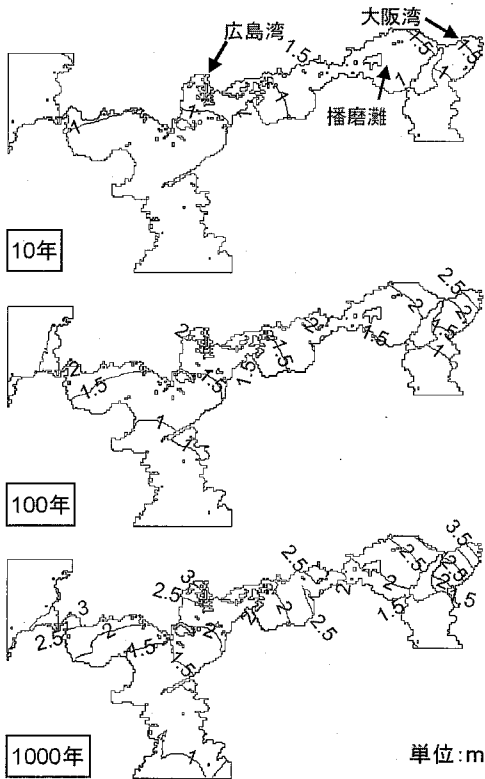


図-6 現状の気候下における確率高潮偏差

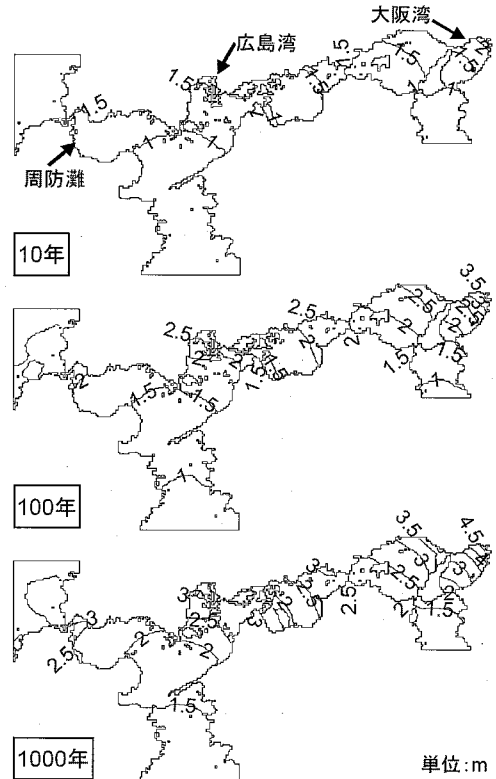


図-7 将来の気候下の確率高潮偏差

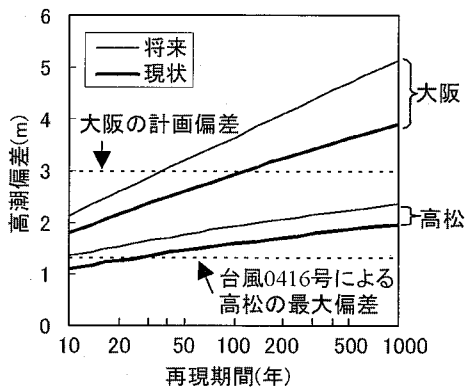


図-8 大阪と高松における高潮偏差の極値分布

3.5~4 mに達する。そのため、仮に計画偏差を超える高潮偏差が生じたとしても、その起時が干潮と重なることで、合成された潮位は計画高潮位を超えずにすむこともある。

そこで、数値シミュレーションによって得た高潮偏差の時系列に、調和定数から求めた天文潮位の時系列を、線形で重ね合わせて潮位の時系列を求め、その最高潮位の極値統計を行った。なお、平均半潮差と遅角の値には、海上保安庁(1992)に掲載されているものを用いた。

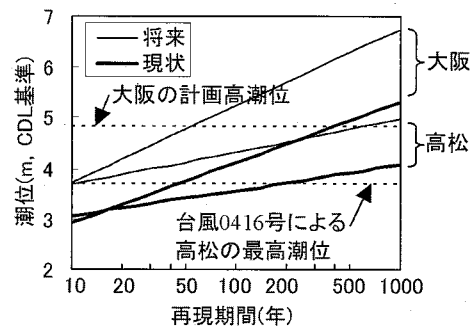


図-9 大阪と高松における潮位の極値分布

図-9は、大阪と高松を例に、潮位の極値分布を示す。将来の潮位には、シナリオ A2 に対する平均海面上昇量として約 0.4 m も加えた。大阪の計画高潮位の再現期間は、現在の気候下では約 400 年であるが、将来には約 60 年まで縮むと推定される。また、高松の台風 0416 号による最高潮位についても、現在は約 200 年であり、稀な潮位として位置づけることができるかも知れないが、将来には約 10 年と身近なものになると推定される。高松における確率潮位の上昇の多くは、平均海面上昇によるものであり、台風の強大化の影響は小さいものと考えられる。

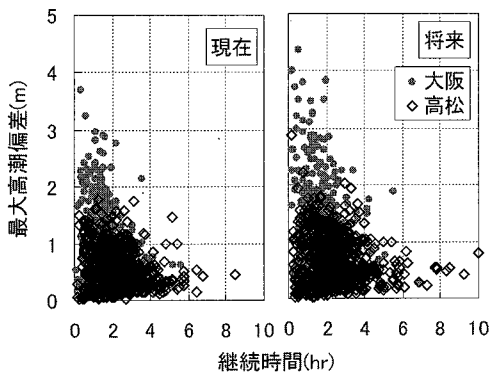


図-10 最大高潮偏差と継続時間の関係

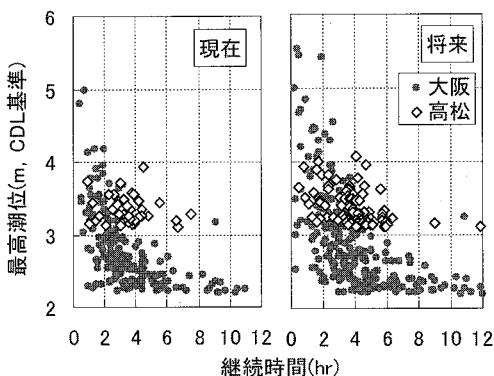


図-11 最高潮位と継続時間の関係

6. 高潮と高潮位の継続時間

防波堤ケーソンの供用年数間における滑動量の計算の実務では、個々の台風における有義波高や潮位のピークの継続時間を2時間と仮定することが多いが、その継続時間に関する検討(阿部ら, 1999; 河合ら, 2002)は十分にされていない。高潮対策施設の性能設計において、これら継続時間をどのように位置づけ、確率的な照査モデルにどのような統計値として組み込むかについては、今後も議論が必要であるが、本研究ではいくつかの定義によって継続時間の出現特性を調べてみた。

例えば、高潮偏差が最大値の0.95倍以上である時間を継続時間と定義すると、図-10のように、特に大きな高潮偏差が生じる台風では継続時間が1時間程度に集中していることが分かる。また、ここには示していないが、このしきい値を0.9倍以上にすると、継続時間は2時間程度になった。このような特性自体は、現在と将来の気候下で大きな違いはないものと考えられる。

次に、潮位が(最高潮位 - 0.5 m)以上である時間を継続時間と定義すると、図-11のようになった。大阪で

は高い潮位が発生する台風ほど継続時間は短くなるが、高松ではその傾向が明瞭でない。

7. おわりに

本研究では、確率台風モデルによる台風を用いて、現在と将来の気候下における瀬戸内海の高潮の出現特性を調べ、以下のことを示した。

- ①現在の気候下であっても、想定を超える高潮偏差を生じさせる台風が現れる可能性がある。
- ②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と推測されるが、その変化に地域差がある。
- ③大きな高潮偏差、高い潮位ほど、継続時間は短い。

なお、本研究で仮定した地球温暖化に伴う台風特性の変化は、現時点で考えられる可能性の一つに過ぎない。今後も地球温暖化に関する最新の知見を取り入れつつ、高潮の推算精度を改善し、精度の高い高潮の将来予測に取り組む必要がある。また、そうして得られた結果を防災にどう生かすのかについての議論も必要と考える。

参考文献

- 阿部光信・興野俊也・長船 徹・貝沼憲男(1999): 防波堤の信頼性設計法における時化のモデル化について, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 916-920.
- 石原幸司・栗原和夫・和田一範・村瀬勝彦・富沢洋介(2004): 洪水・渇水リスク評価に向けたMRI-RCM20の降雨特性再現性, 日本気象学会2004年秋季大会講演予稿集, p. 145.
- 海上保安庁(1992): 日本沿岸潮汐調和定数表, 書誌第742号, 267p.
- 河合弘泰・竹村慎治・山城 賢・柴木秀之・平石哲也(2001): 我が国沿岸の想定高潮偏差と湾形状による増幅特性, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 301-305.
- 河合弘泰・竹村慎治・原 信彦(2002): 東京湾における台風による高潮と高波の同時性と継続時間特性, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 251-255.
- 合田良実・小舟浩治(1989): 波浪の極値統計における分布関数の棄却基準, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 135-139.
- 酒井和彦・岡安章夫(2004): 温暖化による海面上昇を考慮した防波堤の信頼性設計法, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 686-690.
- 橋本典明・川口浩二・河合弘泰・松浦邦明・市川雅史(2003): 港湾・海岸構造物の合理的設計を目的とした確率台風モデルの構築と精度の検討, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 176-180.
- 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.
- 山口正隆・畑田佳男・野中浩一・大福 学・小出健太郎(2002): 瀬戸内海西部海域における高潮・高波の極値の推定, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 256-260.
- Kawai, H. (2000): Variation of Sliding Failure Probability of Breakwater Caisson due to Global Warming, Journal of Global Environment Engineering, JSCE, Vol. 6, pp.65-80.
- 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. of Japan, vol. 84, No. 2, pp. 259-276.