

港湾構造物に及ぼす気候変動の影響とその定量的予測 - 防波堤を対象として -

Quantitative Evaluation of Vulnerabilities in Coastal Structures due to Climate Change -Case Studies for Breakwaters-

高木泰士¹・柏原英広²・柴山知也³

Hiroshi TAKAGI, Hidehiro KASHIHARA and Tomoya SHIBAYAMA

Climate change is expected to lead to increases in both sea level and typhoon intensity. Such changes may threaten the stability of breakwaters. In this study, calculations using the SWAN model showed that a 10% increase in wind speed can lead to a 20% increase in wave height. The expected sliding distances for the breakwaters at Shibushi Ports were estimated using a probabilistic method proposed by Takagi et al. (2008). It is noteworthy that in the future sliding distances may become three times greater than current ones due to a combination of increases in sea level and wave height.

1. はじめに

ここ数年、特にIPCCの第4次評価報告書(2007)が公表されて以来、地球温暖化とそれがもたらす様々な気候変動については、科学的に裏付けされたもはや不可避な課題として、科学者や政治家のみならず、広く一般の人々が認識するに至っている。海岸工学の分野においても、海岸侵食の加速や高潮リスクの増大等、社会に非常に大きな影響を及ぼすと懸念される諸問題に関して、各方面において精力的な研究がなされている。また、学術分野以外でも、最近国土交通省が「地球温暖化に起因する気候変動に対する港湾政策のあり方」を答申(2009年3月)するなど、気候変動への適応が具体的な施策として、現実化する動きをみせている。

しかし、気候変動の影響が海岸・港湾構造物の機能や安定性に負の影響を及ぼすことが数々指摘されているものの、果たして定量的にどの程度の影響が予想されて、その影響に対してどのような対策を講ずるべきか、またそもそも対策は本当に必要なのか、等々、具体的な判断材料が十分に提供されている状況にはないと考えられる。

このような背景を鑑みて、筆者らは気候変動が港湾構造物に及ぼす影響をできる限り定量的に明示することを目的として研究を開始した。港湾構造物の中でも、防波堤は海象の変化の影響を特に受けやすい構造物であり、また供用も一般に50年以上と長期に渡るため、気候変動が及ぼす将来影響を適切に予測し、設計や維持補修に反

映していく段階にあると考える。本研究では、気候変動が防波堤に及ぼす影響を定量的に予測する手段を提案し、具体的な事例を通じて、その将来影響の分析を試みる。

2. 検討概要

地球温暖化によって引き起こされると予測されている様々な気候変動のうち、海面上昇と台風の強大化の2つは海岸・港湾構造物に特に重要な影響を及ぼすと考えられる。このうち、海面上昇についてはIPCC(2007)が今世紀末の平均水位上昇量が18~59cmに達すると予測している。一方、台風の強大化については、同じくIPCCの報告書の中で「熱帯低気圧(台風およびハリケーン)の強度は強まり、最大風速や降水強度は増加する可能性が高い」と述べられている。また、Kunutson et al. (1999)は、海面水温2.2度の上昇が台風の最大風速を5~12%増加させるという結果を、Oouchi (2006)は年最大風速が北半球では平均15.5%、南半球では平均6.9%上昇するという気候シミュレーションの結果をそれぞれ示している。

このように海面上昇、台風の強大化とともに将来予測にはある程度の幅があり、また不確実性も大きいものと考えられるが、今回の研究では、将来の海面上昇量に対しては18~59cmの範囲で一様に発生すると仮定し、また台風の強大化については、将来的な風速の増加率を仮定して考慮することとし、本研究では上記の研究などを参考に将来10%の風速増加が発現すると仮定した。また、風速増加に起因する波浪増大は、第3世代波浪推算モデルSWANにおける風速入力値を解析範囲の全域に渡って一様に10%増加させることで再現する。

一方、防波堤の被災程度に関する予測については、Takagi et al. (2008)が既設防波堤の安定性を確率的手法で評価す

1 正会員 博(工) 五洋建設株式会社 国際事業本部
2 修(工) 富山県 新川土木センター
3 フェロー 工博 横浜国立大学名誉教授、早稲田大学教授
理工学術院

る方法を提案しており、このモデルによって試算される期待滑動量が気候変動によって将来的にどの程度の影響を受け、またどのような点に留意をすべきかを考察する。

3. 検討対象とする防波堤

本研究では、九州南岸に位置する志布志港の沖防波堤を具体例として取り上げ、気候変動が防波堤の安定性に及ぼす影響の評価を試みる。志布志港(若松地区)の沖防波堤は、図-1に示す通り、ハネ部を除く直線部が延長2570mと長く、設置水深や断面諸元が異なる8タイプ(図中Ⅰ~Ⅷ)のケーソン式防波堤より構成される。8タイプの防波堤のうち、両端の2タイプ(図中ⅠとⅧ)はケーソン前面に消波工が設置されており、その他の防波堤は無消波である(Takagi et al, 2008)。本研究では、表-1に諸元を示す無消波の防波堤6断面を検討対象とする。

4. 第3世代波浪推算モデルによる将来波浪の予測

本研究では気候変動の一影響として台風の強大化を考慮する。この際、先に述べた通り、台風の強大化により将来的に風速が10%増加すると仮定するが、最終的には防波堤の安定性を問題とするため、風速増加が波浪の増大に及ぼす影響を定量的に評価することが必要になってくる。そこで、第3世代波浪推算モデルSWAN (Cycle III version 40.51)を用いて対象地点での波浪を予測することとし、その中で風速入力値を解析範囲の全域に渡って10%増加させることで簡易的に将来の台風強大化を考慮することとした。

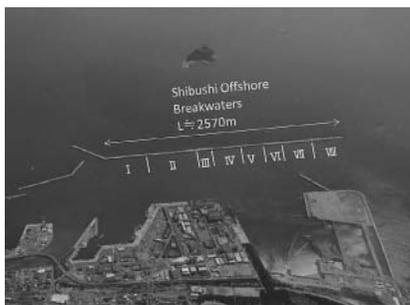


図-1 志布志港沖防波堤の全景

表-1 志布志港沖防波堤の断面諸元

Section	函数	堤体高 (m)	ケーソン堤体幅 (m)	設置水深 (m)	マウンド上水深 (m)	根固水深 (m)	天端高 (m)
Ⅱ	40	15.5	18.5	-11.5	-8.5	-7.2	+7.0
Ⅲ	11	15.5	19.1	-11.5	-8.5	-7.2	+7.0
Ⅳ	22	16.0	20.5	-12.4	-9.0	-7.7	+7.0
Ⅴ	16	16.0	22.8	-13.2	-9.0	-7.7	+7.0
Ⅵ	13	16.0	24.9	-13.2	-9.0	-7.7	+7.0
Ⅶ	16	16.0	29.5	-15.0	-9.0	-7.7	+7.0

(1) SWANモデルの波浪再現性

波浪増大の将来予測をSWANモデルに基づいて評価するが、そのためには予め波浪再現性を検証し、適用可能であることを確認しておく必要がある。また、後に示すような確率的手法に基づいて防波堤の安定性を評価する方法では波浪推算精度自体をパラメータとして使用する。したがって、ここではSWANの波浪再現性の水準が使用に耐えうるものであるかを確認するとともに、推算精度の定量化を試みる。

波浪推算の再現性確認には、志布志湾のナウファス波浪観測情報(設置水深36.2m)を利用する。また、検証は表-2に示す合計10個の台風を対象として行う。

SWANを用いた波浪推算では、図-2に示すように広領域から狭領域へと順次3段階の領域に対して計算を進める。第1領域は日本全域をカバーする領域(120~150E, 20~50N)、第2領域は九州南岸の海域をカバーする領域(129~133E, 29~33N)、そして第3領域は志布志湾を含む鹿児島沿岸部をカバーする領域(130.2~131.8E, 30.8~31.8N)である。その他、本研究で使用した計算条件のうち、特に重要な項目を表-3にまとめて示す。

表-2 再現性確認において対象とする台風

No.	台風	発生期間	No.	台風	発生期間
1	TY0206	7-Jul-2002 - 11-Jul-2002	6	TY0406	17-Jun-2004 - 22-Jun-2004
2	TY0207	13-Jul-2002 - 16-Jul-2002	7	TY0415	17-Aug-2004 - 20-Aug-2004
3	TY0209	23-Jul-2002 - 28-Jul-2002	8	TY0416	22-Aug-2004 - 31-Aug-2004
4	TY0304	24-May-2003 - 1-Jun-2003	9	TY0418	2-Sep-2004 - 8-Sep-2004
5	TY0310	6-Aug-2003 - 9-Aug-2003	10	TY0423	16-Oct-2004 - 21-Oct-2004

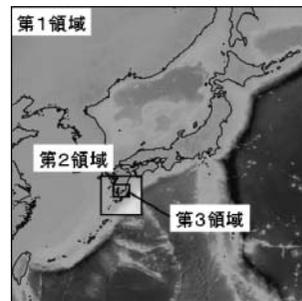


図-2 SWANで計算を行う3段階の計算領域

表-3 SWANにおける計算条件

計算格子間隔	0.25度 (第1領域) / 0.03度 (第2領域) / 0.01度 (第3領域)
積分時間間隔	30分 (第1領域) / 15分 (第2領域) / 5分 (第3領域)
計算期間	台風来襲時を挟む13日間
計算周波数領域	0.04~1.0Hz
周波数分割数	40
方向分割数	36

表-4 選択した物理過程モデルの一覧

物理過程	選択モデル
風から波へのエネルギー輸送項	KomenおよびJanssen model
白波砕波によるエネルギー散逸項	Komen model
浅水砕波によるエネルギー散逸項	Battjes and Janssen model
海底面摩擦によるエネルギー消費項	JONSWAP model
4波波浪成分間での非線形相互作用によるエネルギー輸送項	Hasselmann DIA
3波波浪成分間での非線形相互作用によるエネルギー輸送項	Eldeberky model

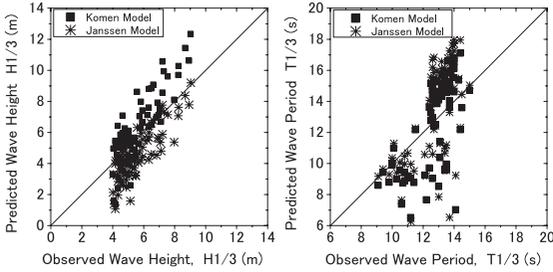


図-3 波浪追算結果 (左:有義波高, 右:有義波周期)

また、SWANでは波浪の発達から減衰に至る各物理過程において、様々なモデルやオプションを選択することが可能であるが、本研究では事前の試行計算において適合性が高いと判断された表-4に示すモデルの組み合わせを使用することにした。なお、風データについては、京都大学生存圏研究所が気象庁の数値予報データ (MSM) を再構成して作成したNetCDFデータを利用している。

図-3は表-2に示す合計10個の台風来襲時の波浪追算を行った結果であり、2時間ごとの観測波浪に対する推算波浪の比較を示している。但し、期間中の全ての結果ではなく、防波堤の安定に影響を及ぼすと考えられる比較的大きな波として、有義波高4m以上の波を抽出し、表示している。また、SWANの物理過程モデルのうち、風から波へのエネルギー輸送項に関しては、KomenモデルとJanssenモデルの双方に対して計算を行っている。

図-3左の有義波高については、Komenモデルでの追算値が全般的に過大評価を示し、逆にJanssenモデルでの追算値は過小評価となっており、どちらも再現性が十分に高いとは言い難い結果といえる。しかし、KomenモデルとJanssenモデルの両者をあわせた結果は、観測値の平均的な傾向を良く表しており、相関性も悪くはない。また、この次のステップでは防波堤の安定性を確率的手法に基づいて評価することになるが、そこでは個々の推算値に有意な誤差が発生しているとしても、推定精度が定量的に明らかになっていることで適用可能となる場合もある。一方、図-3右の有義波周期の追算値は観測値に対してかなり大きなばらつきを示しており、また相関性も高くはなく、信頼性に疑義がもたれる。

以上のような検討結果を踏まえ、本研究ではSWANによる波浪推算結果のうち、有義波高についてはさらに推算精度を検証した上で使用することとし、有義波周期については再現性が十分ではないと考え、使用しないこととした。有義波周期については代わりに、Goda (2007)がWilsonの推算式を再整理して求めた次の関係式に基づき、別途求めることにする。

$$T_{1/3}(s) \approx k \cdot H_{1/3}^{0.63}(m) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$ は有義波高、有義波周期、また k は比例係数であり、基準とする有義波高、有義波周期の関係より計算することができる。

(2) SWANモデルの波高推算精度

表-2の10個の台風を対象として実施したSWANの推算結果のうち、観測値が4m以上の合計76個の有義波高データを抽出し、観測値と推算値の比の度数分布を示した結果を図-4に示す。Janssenモデルと比較すると全般的にはKomenモデルの信頼性がより高い結果となっており、当該地点における波浪推算ではKomenモデルの使用がより適当であるといえる。また、度数分布自体は、Komenモデル、Janssenモデルともに波高の比が大きい部分での裾の広がりが見られ、正規分布よりも対数正規分布で表現するのが適当と考えられる。波高の比を x とすると、対数正規分布の確率密度関数 $f(x)$ は式(2)で表わすことができる。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x \varepsilon}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \lambda}{\varepsilon} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 λ は x の自然対数の平均値、 ε は x の自然対数の標準偏差であり、今回の場合、Komenモデルの結果では $\lambda = -0.06$ 、 $\varepsilon^2 = 0.08$ 、Janssenモデルの結果では $\lambda = 0.26$ 、 $\varepsilon^2 = 0.08$ がそれぞれ得られている。

(3) 台風増大とそれに伴う将来波高の増加量の予測

図-5に一例を示す通り、過去の台風時の風速データをSWANの解析範囲の全域にわたって10%増加させることで将来の台風を模擬した。

表-5は、10%の風速増加が志布志湾での波高の増加に及ぼす影響を示している。ここで、有義波高は台風期間

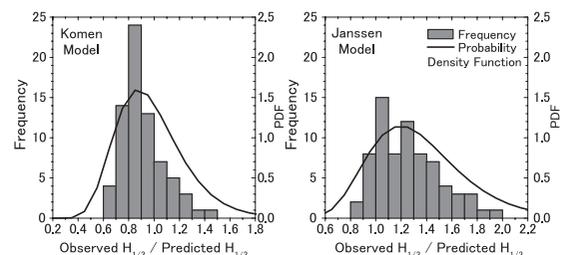


図-4 SWANによる波高推算精度 (左: Komen, 右: Janssen)

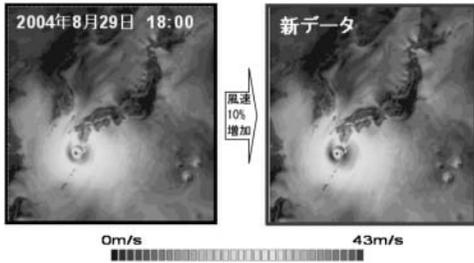


図-5 九州南岸に接近する台風とそれに基づく将来台風の例

表-5 台風の強大化に伴う波高増加率の予測結果

推算対象	有義波高観測値	有義波高推算値 (Komen)	有義波高推算値 (Janssen)	適用モデル	有義波高推算値 (将来予測)	将来波高増加率
台風0206号	4.4m	5.5m	4.1m	Janssen	4.9m	19.5%
台風0207号	3.7m	6.2m	4.0m	Janssen	5.0m	25.0%
台風0209号	5.1m	5.9m	4.1m	Komen	6.9m	16.9%
台風0304号	3.9m	4.5m	3.3m	Janssen	4.1m	24.2%
台風0310号	8.0m	8.6m	5.9m	Komen	10.3m	19.8%
台風0406号	7.1m	7.9m	5.8m	Komen	9.4m	19.0%
台風0415号	3.7m	3.4m	2.4m	Komen	4.1m	20.6%
台風0416号	9.0m	12.3m	9.2m	Janssen	11.3m	22.8%
台風0418号	6.3m	7.0m	4.8m	Komen	8.4m	20.0%
台風0423号	6.3m	8.8m	6.1m	Janssen	7.5m	23.0%
全体平均						21.1%

中のピーク値を表しており、将来予測に関しては、JanssenとKomen両モデルのうちで、過去の推算値がより観測値に近いモデルに対してのみ計算を行っている。

10%の風速増加に対して、波高の増加は17~25%である。このうち、Janssenモデルを適用した場合は平均22.5%の増加、またKomenモデルを適用した場合は平均19%の増加となっており、適用モデルによる差異は顕著ではない。なお、波高増加率の全体平均は21%であり、これは風速増加の自乗 ($1.1^2=1.21$ 倍) に一致している。

5. 気候変動が防波堤に及ぼす影響の定量的予測

(1) 期待滑動量に基づく防波堤の安定性評価法

台風の強大化に伴う波高増大および海面上昇の影響が防波堤の安定性に及ぼす影響をケーソンの期待滑動量に基づき評価する。期待滑動量の計算は、ケーソン式防波堤のレベル3信頼性設計法を提案した高木・柴山 (2006) や既設防波堤の被災を検証したTakagi et al. (2008) などの方法を参考にして、図-6に示す手順で行う。

ここで、沖波としては台風0310号のときのKomenモデルによる推算有義波高のピーク値8.6m (図-7参照) および同時刻の観測有義波周期13.7秒を現在の基準値と考える ($k=13.7/8.6^{0.63}=3.53$)。これに対して、将来の波高増加率を20%と仮定し、有義波高を10.3m、このときの有義

波周期を式 (1) に基づき15.3秒と仮定して将来の波浪とした。また、防波堤断面は表-1に示した断面Ⅱから断面Ⅶの計6断面を検討対象とする。将来の海面上昇量については、IPCCが予測する18~59cmの範囲の値を一様の確率でとりうる乱数を発生させることとした。また、図-6に示す計算フローの各ステップでは、表-6の各種の不確定要因を考慮しており、確率的に安定した期待滑動量を得るために初期乱数を変えて5千回の繰り返し計算を行った。なお、今回の計算では高波ピーク時の波高が2時間継続すると仮定している。

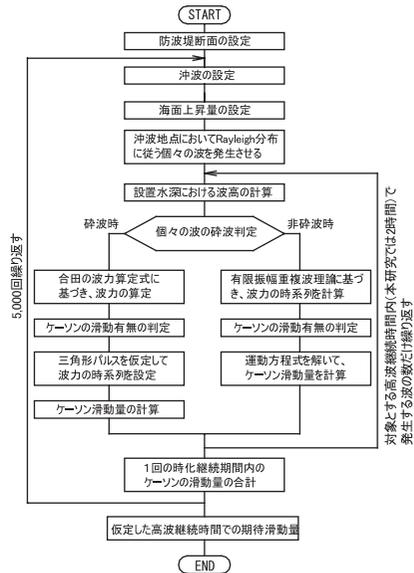


図-6 ケーソン式防波堤の期待滑動量の計算フロー

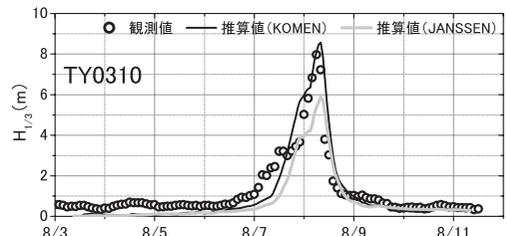


図-7 台風0310号通過時の志布志湾における波浪時系列

表-6 不確定要因の変動特性

不確定要因	偏り	ばらつき	分布関数	備考
推算沖波波高	平均値 -0.06 (対数変換後)	分散0.08 (対数変換後)	対数正規分布	Komenモデルの推算精度を採用
将来海面上昇	#	0.18~0.59m	一様分布	現在値をゼロ
個別波高	#	#	レーリー分布	継続2時間
波浪変形	バイアス 0.00	変動係数 0.10	正規分布	
波力 (砕波)	バイアス -0.09	変動係数 0.19	正規分布	合田波力
波力 (重複波)	バイアス -0.09	変動係数 0.10	正規分布	有限振幅波理論
静止摩擦係数	バイアス 0.00	変動係数 0.10	正規分布	中央値は、0.65

(2) 防波堤の滑動に及ぼす気候変動の影響と考察

図-8は、前節で説明した方法で台風0310号時の志布志沖防波堤の期待滑動量を追算した結果、および波浪増大と海面上昇という2つの気候変動が防波堤の滑動量に及ぼす影響を推算した結果の比較である。

志布志沖防波堤については、台風0310号の翌年と翌々年の2つの台風(0416号と0514号)によって大規模な被害を被っているが、0310号によっては顕著な被害は発生していない(Takagi et al., 2008)。しかし、今回の追算では最大5cmとそれほど大きな値ではないものの、期待滑動量が計算されている。これは、実際において全く無滑動であった状況を今回の追算が過大評価してしまったためか、あるいは実際若干の滑動が発生していたが、軽微なため問題にならなかったか、いずれかの理由と考えられるが、定かではない。したがって、ここでは期待滑動量の推定値自体を議論することは避け、単純に過去の追算値を基準として、将来予測値の推移に着目することとした。

期待滑動量の将来予測値は、過去追算値と比較して、波浪増大のみを考慮した場合、海面上昇のみを考慮した場合、およびその両者を考慮した場合のいずれのケースにおいてもより大きな値を示している。これは、波浪増大、海面上昇ともに防波堤への作用波力の増加につながる事が理由である。したがって、両者を考慮したケースが、過去の追算値と比較して3倍以上もの滑動量を示していることも、それぞれの和の効果のためと理解できる。しかし、波浪増大と海面上昇を同時に考慮した際には、砕波限界波高が大きくなることによる砕波圧の増加も滑動量を増加させる要因として考える必要がある。すなわち、波高が砕波限界水深のために頭打ちになっている条件では、台風の強大化によって波高が大きくなったとしても、波力の増加は沖波波高の増加ほどには大きくはならない。しかし、海面上昇の進行のために砕波限界水深が深くなると波高もそれにつれて大きくなるため、

波力の増加は顕著となる。図-8に示す将来予測の結果では、このような波浪増大と海面上昇の相乗効果のため、

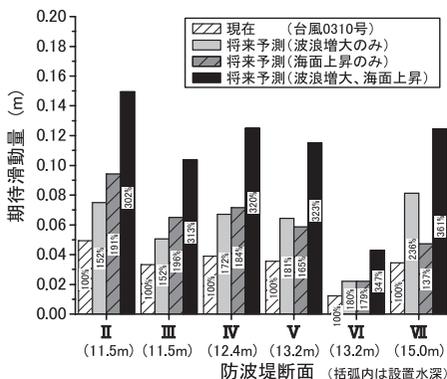


図-8 気候変動が防波堤の滑動に及ぼす影響の予測

現在と比較して3倍以上もの滑動が発生しており、気候変動が防波堤の安定性に顕著な影響を及ぼす可能性を指摘することができる。

6. まとめ

本研究では、気候変動に伴う台風の強大化と海面上昇の両者が防波堤の滑動安定性に及ぼす影響を評価する手法を提案し、志布志港を例にして具体的な試算を行った。

台風の強大化による波浪の増大については、風速が10%増加すると仮定して、第3世代波浪推算モデルSWANを用いて推算を行ったところ、20%程度の有義波高の増加が認められた。また、志布志港でのSWANによる過去10台風の再現計算では波浪推算の結果は観測値に対して対数正規分布に近い誤差分布を示し、風から波へのエネルギー輸送項としてはJanssenモデルよりもKomenモデルの方が推算精度が高いという結果となった。

気候変動の進行に伴い将来波高が20%増加し、海面が18~59cmの範囲で上昇すると仮定し、志布志港の防波堤6断面に対して期待滑動量を試算した結果では、特に波浪増大と海面上昇の両者の影響を同時に考慮した場合、顕著に期待滑動量が大きくなる事が明らかになった。今回の結果では、いずれのケースにおいても期待滑動量が20cmにも満たず、壊滅的な被害を及ぼすレベルにはないと考えられる。しかし、現状の設計条件においてある程度の期待滑動量が計算される防波堤では、将来の気候変動によってさらにその3倍以上の滑動が発生する可能性もあり、十分な注意と対策が必要であると考えられる。

謝辞：国土交通省九州地方整備局には志布志港防波堤に関する資料をご提供頂いた。ここに深甚なる謝意を表す。

参考文献

高木泰士・柴山知也(2006)：大水深地点におけるケーソン式防波堤の信頼性設計手法の提案，海岸工学論文集，第53巻，pp.901-905。
 Goda, Y. (2007)：How much do we know about wave breaking in the nearshore waters, Asian and Pacific Coasts 2007, pp.65-86。
 IPCC (2007)：IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007
 Knutson, T. R. and R. E. Tuleya (1999)：Increased hurricane intensities with CO2-induced warming as simulated using the GFDL hurricane prediction system, Climate Dynamics 15, pp.503-519。
 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 20km-mesh global atmospheric model, J Meteorol Soc Japan, Vol.84, No.2, pp.259-276。
 Takagi, H., M. Esteban and T. Shibayama (2008)：Proposed methodology for evaluating the potential failure risk for existing caisson-breakwaters in a storm event using a level III reliability-based approach, ICCE2008 (in press)