

大気・波浪・海洋結合モデルによるハリケーンカトリナの高潮場のシミュレーション

金 庚玉¹・李 漢洙²・Mohammed Haggag³・山下隆男⁴

一般に、浅い海域が長く続けば続くほど、白波砕波の発生率が増え海水流動が活発化し、吹き寄せ効果が大きくなる。また、外洋や広い湾では旋回する台風の強風域に引きずられるような循環流が発達し、これが陸によって遮られると急激な水位上昇が発生する。このため、陸棚の幅が広く水深が浅い海域では、同一規模の低気圧でもより大きな高潮が発生する。2005 年のハリケーンカトリナの高潮もこのケースである。本研究では、大気・波浪・海洋結合モデルを用いて、上述のような陸棚上での高潮の増幅機構を考慮したハリケーンカトリナの高潮場の数値シミュレーションを行った結果を示す。

1. 緒 言

最近 100 年で地球の平均気温は 0.6℃上昇しており、この温暖化による熱エネルギーの多くは海洋に吸収されている。最近の 10 年間で海面が 3.1 cm 上昇し、2100 年までには 50 cm の海面上昇が予想されている。特に、海洋の温度分布は高緯度で低く、熱帯低気圧の発生場所である低緯度で極めて高いことから、今後のハリケーンや台風の巨大化が危惧される。気候変動予測の数値シミュレーション結果からは、温暖化による台風の発生数の増加より規模の巨大化が指摘されている。

1998 年には、中部アメリカでハリケーン (Mitch) により 20,000 人、中国では洪水で 4,000 人が犠牲になり、バングラデシュでも記録的な洪水が発生した。ヨーロッパでは、2002 年に深刻な洪水が発生し、2003 年には記録的な猛暑となった。地球温暖化に起因する気候の急激な変化は着実に進行しており、過去の気候特性とこれから数十年先のそれとの線形関係が無くなってきていることは明白である。

1987 年以降、飛行機による台風観測が実施されるようになり、北西太平洋で発生、消滅する台風情報まで正確に知ることができるようになり、これまでに観測された最強の台風は Tip で、わが国では台風 7920 号として登録されており、和歌山県白浜町に上陸し、台風 7916 号とともに大きな災害をもたらした台風である。ハリケーンに比べて台風が強いことや、1997 年には北西太平洋上で連続してスーパー台風が発生していることや、大規模なハリケーンや台風は連続して同一年に複数発生する傾向がある (カトリナに続いてリタが発生した) こ

とを周知しておく必要がある。さらに、2005 年のハリケーン・カトリナの高潮災害は、今世紀最初のカテゴリ 5 のハリケーンの来襲による災害として捉えるより、スーパーハリケーン頻発への警鐘として見るべきであろう。

陸棚の広く発達した海域での高潮の増幅機構は次の 2 つの観点から説明される。ひとつはいわゆる吹き寄せ効果で、他の一つは高潮循環流の形成によるものである。高潮の発生は、これらの効果以外にも、吸い上げの効果があるが寄与率は小さい。一般に、浅い海域が長く続けば続くほど、白波砕波の発生率が増え海水流動が活発化し、吹き寄せ効果が大きくなる。ハリケーンや台風の最大風速半径は 70 km 前後であるため、陸棚の幅がこれより広い 100 km あたりを境にして、吹き寄せ効果が急激に大きくなる。これは、外洋や広い湾では旋回する台風の強風域に引きずられるような循環流が発達するからである。この渦は低気圧性 (北半球で反時計回り) で、深海では流れは周辺へ発散するが、水深が規定される浅海域では発散効果が弱く、渦が維持されやすくなる。すなわち、浅海域では高潮循環流が維持されやすい。これが陸によって遮られると急激な水位上昇が発生する。このため、メキシコ湾のミシシッピ川河口部やベンガル湾ブラマプトラ川河口部のように、陸棚の幅が広く水深が浅い海域では、同一規模の低気圧でも大きな高潮が発生する。2005 年の発生したハリケーンカトリナの高潮もこのケースである。

本研究では、大気・波浪・海洋結合モデルを用いて、上述のような陸棚上での高潮の増幅機構を考慮したハリケーンカトリナの高潮場の数値シミュレーションを行った結果を示す。

2. 浅い陸棚上での高潮の増幅機構

陸棚の広く発達した海域では、なぜ高潮が大きくなるのか? これは次の 2 つの観点から説明される。ひとつは 1 次元解析的説明で、よく知られているコールディング

1 工博 博士研究員 日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門
2 学生員 工修 京都大学 大学院工学研究科
3 学生員 工修 広島大学 大学院国際協力研究科
4 正会員 工博 広島大学教授 大学院国際協力研究科

式による吹き寄せ効果に基づくもので、他の一つは平面的な流れ場からの説明で、高潮循環流の形成によるものである。高潮の発生は、吹き寄せ効果以外にも、吸い上げの効果があることが知られているが、静的な吸い上げ効果は1 hPaの気圧低下に対して1 cmの海面上昇が見込める。例えば中心気圧 870 hPa の台風 Tip の場合でも1.3 mの海面上昇に寄与する程度である。浅海域の高潮は吹き寄せ効果により大きさが決まる。すなわち、強風がどの程度海水を流動させるかに関わってくる。この度合いは、水深に反比例し、吹送距離と海面せん断応力に比例する。海面せん断応力は、定式上は風速の2乗に比例することになっているが、その抵抗係数は波浪と風速の関数である事が知られている。外洋では波浪は水深の影響を受けないが、波長の半分より浅い海域（浅水変形海域）では、波形勾配や白波砕波率が水深により変化する。特に、白波砕波率は重要なファクターで、大半の風の運動量フラックスが波浪に遷移し、白波砕波過程を介して流れに移行するため、水深が浅くなり砕波し易くなると風のエネルギーはより効率的に海水流動へと受け渡される。換言すれば、浅い海域が長く続けば続くほど、白波砕波の発生率が増え海水流動が活発化し、吹き寄せ効果が大きくなる。

平面的には、ハリケーンの規模と大陸棚の幅とで説明できる。前述したように、浅海域では吹き寄せによる強い流れのエネルギーが渦として維持される。

これが陸によって遮られると急激な水位上昇が発生する。このため、メキシコ湾のミシシッピ川河口部やベンガル湾ブラマプトラ川河口部のように、陸棚の幅が広く、水深が浅い河海域では、同一規模の低気圧でも極めて大

きな高潮が発生する。このような地形はわが国の海域には無く、現在の台風規模では4 mを超えるような高潮がわが国に発生することはない。しかしながら、地球温暖化により台風の規模が増大すれば高潮が大きくなるのは当然で、これをどの程度に見定めるかが今後の高潮防災の鍵になろう（山下, 2005）。

3. 大気・波浪・海洋結合モデル

波浪推算モデル Wave Watch III (Tolman, 2002)、メソ気象モデル MM5、海洋モデル POM を連結系として、波浪・高潮相互作用を取り込んだ次世代型の高潮数値モデル（金・山下, 2004）を研究用ソフトウェアとして、著者対応で公開している（広島大学大学院国際協力研究科）。各モデルの概要は以下のようである。

(1) MM5: 米国 National Center for Atmospheric Research (NCAR) で開発された等圧面座標 (p - σ 系) での非静力学方程式系のメソスケール気象モデル。

(2) 外洋波浪モデル: 波浪のエネルギー平衡方程式を基礎式としているモデルで、水深、平均流の変化に伴う波浪の屈折、変形特性を考慮している。ソース項はそれぞれ、風からのエネルギー供給項、非線形エネルギー輸送項、白波砕波によるエネルギー消散項および海底摩擦項で構成されている。これらのソース項は全て波浪の方向スペクトル密度に依存し、移流項とのバランスで方向スペクトル密度が決定される。ソース項に非線形干渉等の非線形性を考慮した第Ⅲ世代の波浪モデルである。本研究では、米国環境予測センター NOAA の Wave Watch III (WW3) と SWAN とを用いる。また、風からのエネルギー供給項と白波砕波減衰項のバランスは Tolman & Chalikov (1999) の方法（以降 Tolman と表示する）と Jannsen (1991) の方法の2通りを検討する。

(3) 海洋モデル: 水深 σ 座標系での静力学方程式系のプリンストン大学の Princeton Ocean Model (POM) を用いる。

気象シミュレーションは、Domain 1 (27 km) および Domain 2 (9 km) のネスティング計算で、鉛直分割数は23層。バックグラウンドデータはNCEPの全球客観解析データを用い、台風ボガスはNational Hurricane CenterのTropical Cyclone Report Hurricane Katrinaにより、Domain 1で毎正時に行った。

波浪、海洋シミュレーションはDomain 2で行い、波浪シミュレーションではWW3とSWANとの比較を行った。海洋シミュレーションでは、浅海域での波浪の影響を見るため、砕波せん断応力を計算した場合（図-7でCoupleと表示）としなかった場合（No coupleと表示）の2通りを行った。バロトロピック計算とし、大気との相互作用は考慮しなかった。水深は、GEBCO

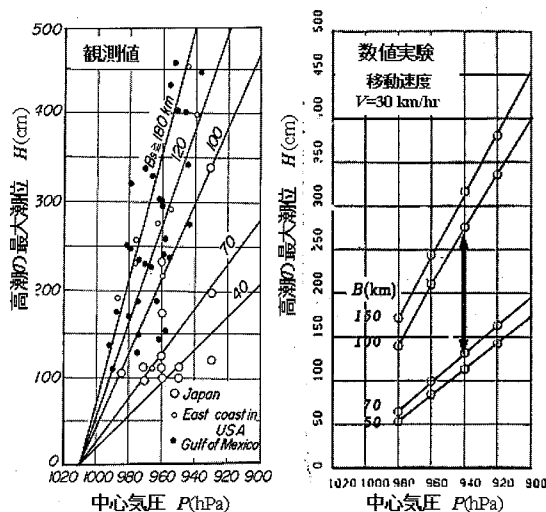


図-1 高潮最大偏差と陸棚幅の関係

1-minute (The General Bathymetric Chart of the Oceans の) を用いた。ハリケーンの経路と用いた計算領域、水深、潮位観測・出力点を図-2 に示す。

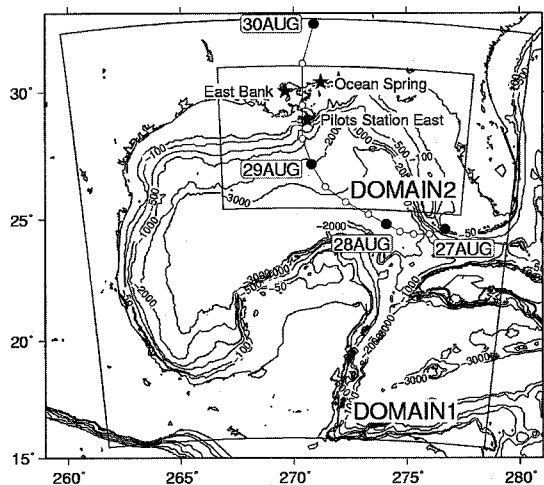


図-2 計算領域とハリケーン経路

4. 高潮のシミュレーション結果

(1) 気象場

図-3 に、Pilots Station East で観測された気圧と、計算された気圧 (NCEP の全球客観解析データ、NCEP データに台風ボーガスを行った結果: BOGUS) の比較を示す。この図から明らかなように、NCEP の客観解析データだけではハリケーンの気圧深度は再現できないことがわかる。また、本計算のボーガスでも気圧の時間変化が観測値に比べ緩やかすぎる結果となっている。これは最大風速半径が大きすぎるようなボーガシングになっているためと考えられ、今後の検討が必要であろう。

(2) 波浪場

図-4 に、本研究で用いた米国 NOAA の National Data Buoy Center 波浪観測ブイ (42007, 42003, 42040) の位置を示す。各ブイの設置水深はそれぞれ、14.0 m, 443.6 m, 3,233.0 m である。観測ブイの状況として、42007 は 08/29 05Z 以降、係留鎖が壊れ漂流しており、これ以降のデータは使えないようである。また、42003 は 08/28/05Z 以降はブイが転倒し欠測している。これは、30 年間に及ぶ観測ブイ運用史上初めての経験であった。

図-5 に各観測ブイの位置での追算波高と観測波高(上図)、および下図に、波浪計算におけるソース項(入力項 S_{in} 、白波砕波消散項 S_{ds}) の時系列を、SWAN と WW3

について比較して示す。また、WW3 では S_{in} を Janssen の方法と Tolman の方法とを比較した。図中入力項は正、消散項は負の値で表示した。なお、図-5(a)の観測値において、白抜き○の部分はブイの係留が切れて漂流状態にあり観測データの信頼性が無い部分を示す。

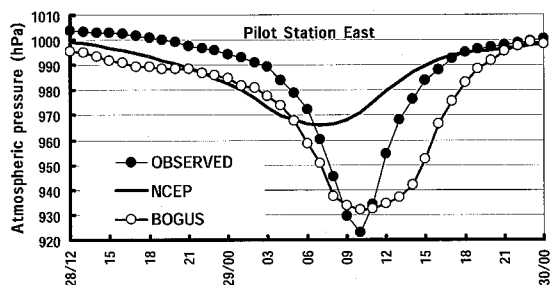


図-3 Pilot Station East における地上大気の再現性

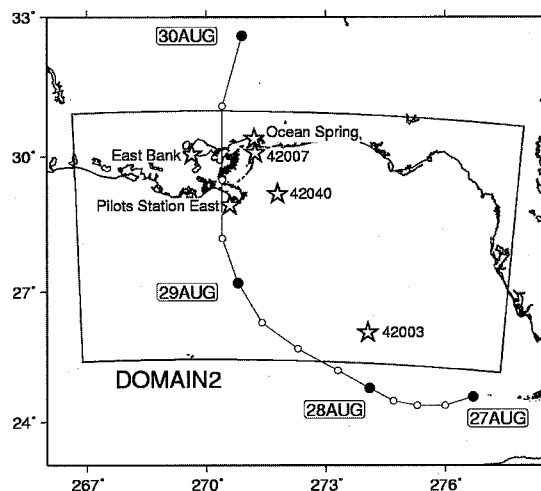


図-4 波浪観測ブイ

図-6 には、WW3 (Tolman) で計算された 08/29 06Z の波高分布を示した。以上の計算結果から、Janssen 法では S_{in} が S_{ds} より大きめで、計算波高が高めに計算され、観測値の再現性は Tolman 法が若干優れていることがわかる。また、SWAN の結果は外洋 (42003) では Tolman 法に近いが、浅海域 (42007) では WW3 に比べ波高減衰が大きい。42007 の観測結果が使用できないので明言はできないが、WW3 では水深による砕波減衰が考慮されていないので、過大評価になっていると考えられる。

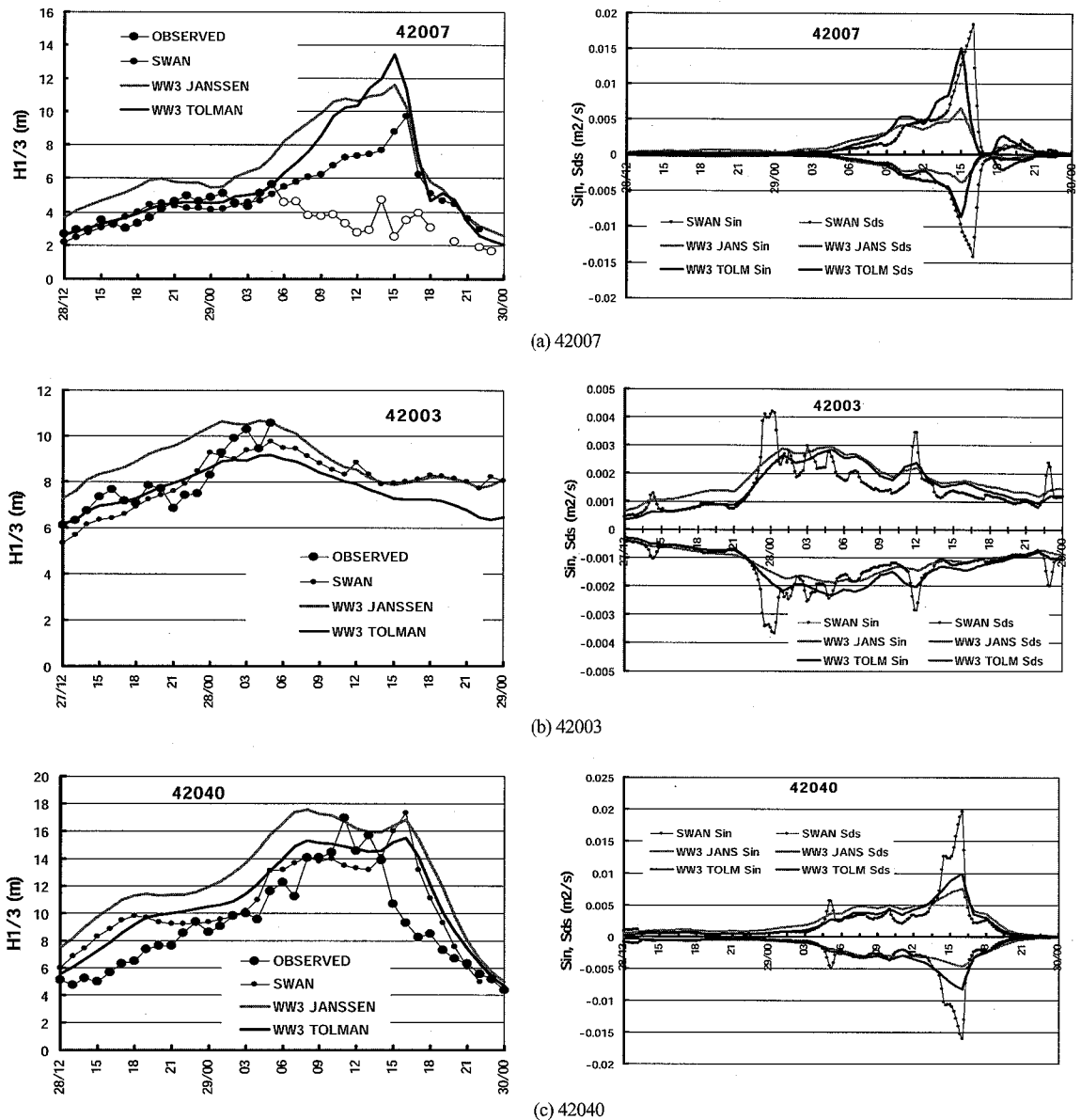


図-5 波浪観測ブイの位置での追算と観測との比較

(3) 高 潮 場

計算領域の DOMAIN2 では、風域場、気圧場データを用いて、白波砕波せん断応力を考慮した大気・波浪・海洋結合モデルによる高潮、波浪場のシミュレーションを行った。図-7 に Ocean Springs と Pilots Station East で観測された水位変化と、潮位を含む高潮の計算結果の比較を示した。図中、No Couple は波浪の影響を考慮しない場合、Couple は波浪を考慮した場合を示す。極浅海域に当たる Ocean Springs での高潮では、波浪を考慮した推算値は約 5.4 m で考慮しない場合は 3.3 m となり、約 2 m 差異を発生させており、白波砕波せん断応力が極めて重要な影響を及ぼしていることがわかる。

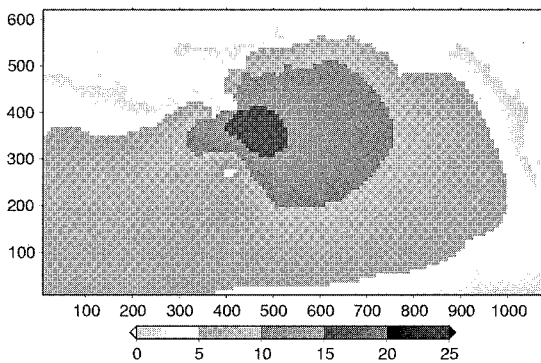
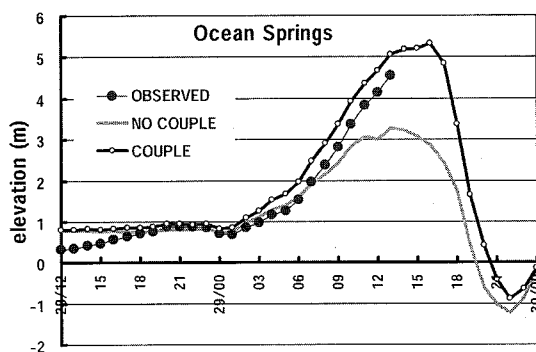
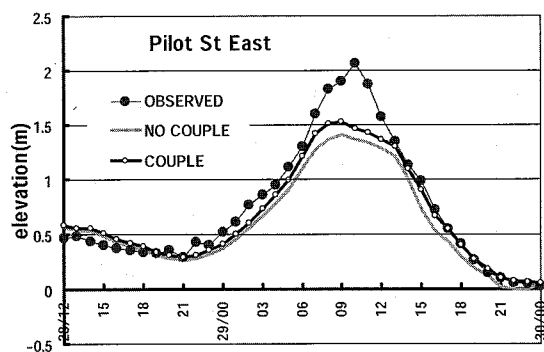


図-6 08/29 06Z の波高分布. WW3(Tolman)の結果.



(a) Ocean Springs



(b) Pilot Station East

図-7 水位変化の観測値と推算値との比較

Ocean Springs での観測値は 08/29 15Z 以降は欠測であるが、それまでは推算値と良く対応している。また、ハリケーンの経路上に近い Pilots Station East での推算結果は、観測結果と波形は良く似ているが最大値は 0.5 m 小さく、波浪の影響は顕著では無い。

図-8 に海域におけるハリケーン作用期間の最大水位の分布を示す。この水位分布は、上陸直前の 08/29 06Z の最大水位の分布とはほぼ一致するものと考えられる。図から、高潮は沿岸付近で急激に大きくなり、ミシシッピ川左岸入江湾奥のボーンユ湖で最大となっていることがわかる。

これより、極浅海域のボーンユ湖沿岸域で白波砕波による吹き寄せの増大効果が大きいことが推測される。潮汐成分は 0.5 m 程度であるので、高潮偏差は 6~7 m 以上に達していることになり、わが国の沿岸での高潮偏差に比べ、2~4 倍の大きさとなっている。これは前述したように、発達した大陸棚に起因することに加え、カト

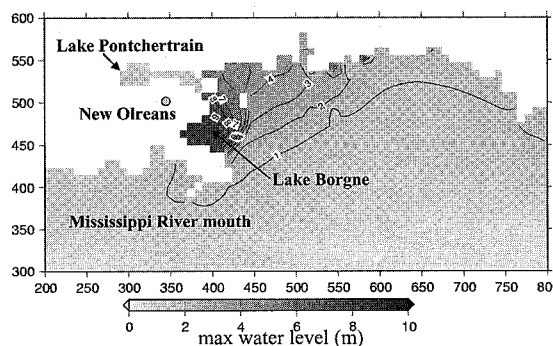


図-8 海域における最大水位分布

リーナが極浅海域のボーンユ湖沿岸域に極めて危険な経路であったことに起因する。

5. 結 語

大気・波浪・海洋結合モデルを用いて、極浅海域を含む陸棚上での高潮の増幅機構を考慮したハリケーンカトリナの高潮場の数値シミュレーションを行った結果、1) 高潮や高波を再現するための気象シミュレーションにおける台風ボガスの有効性、2) 極浅海域を含む陸棚上での高潮における白波砕波せん断応力の重要性が示された。極浅海域の Ocean Springs では波浪の影響による潮位上昇が約 2 m あった。さらに、3) ボーンユ湖沿岸域で最大水位が発生していることが示された。

なお、本研究は、科学研究費（基盤研究(B)一般、研究代表者 山下隆男）の研究の一部として実施された。

参 考 文 献

- 金 庚玉・山下隆男(2004)：大気・波浪・海洋結合モデルによる台風 9918 号の高潮・高波の追算，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 236-240.
- 山下隆男(2005)：ハリケーン・カトリナによるニューオーリンズの高潮災害，土木学会誌，pp. 39-43.
- Janssen, P.A.E.M. (1991)：Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting, J. Phys. Oceanogr., 21, pp. 1631-1642.
- Tolman, H.L. (2002)：User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22, MMAB.
- Tolman, H.L., and D.V. Chalikov (1996)：Source terms in a third-generation wind-wave model, J. Phys. Oceanogr., 26, pp. 2497-2518.