

Freak Waveの発生と気象条件の関係について

Freak Waves and Weather Conditions

森 信人¹

Nobuhito MORI

The kurtosis of the surface elevation, Benjamin-Feir Index (BFI) and directional spread are measures of nonlinear four-wave interactions and freak waves. The dependence of kurtosis, BFI and directional spread under typhoon conditions are examined by numerical simulations and field data. The Value BFI is significantly large in the fourth quadrant of the typhoon while the directional spread is small. The potentially possible area of freak wave occurrence is the fourth quadrant of the typhoon rather than the other quadrants. These parameters of freak waves under the typhoon condition are verified by the field data.

1. 序論

ここ数年に進んだFreak waveの予測に関する研究により、波列中の最大波高を求める体系が築かれつつある。何種類かの方法が提案されているが、大まかな方針は類似している。まず、波浪スペクトルからBenjamin-Feir Index (BFI) や水面変位の4次モーメントを推定し、これらをパラメータとして含む関数を用いて波高分布や最大波高分布 H_{max} を推定するものである。例えば、Mori and Janssen (2006) では、周波数スペクトル幅 δ_ω と波形勾配 ε からBFIを求め、

$$BFI = \frac{\sqrt{2}\varepsilon}{\delta_\omega} \dots\dots\dots (1)$$

このBFIを用いてkurtosis μ_4 を推定し、

$$\mu_4 - 3 = \kappa_{40} = \frac{\pi}{\sqrt{3}} BFI^2 \dots\dots\dots (2)$$

Freak waveの出現頻度を以下の式を用いて推定している。

$$P(H_{max} \geq 2.0) = 1 - \exp[-e^{-8} N(1 + 8\kappa_{40})] \dots\dots (3)$$

ここで κ_{40} は水面変位の4次のキュムラント、 N は波列中の波の数である。式(1)～(3)に従うと、周波数スペクトルが狭く($\delta_\omega \rightarrow$ 小)、波形勾配が大きい($\varepsilon \rightarrow$ 大)場合に、Freak waveの出現頻度が指数関数的に増加する。

BFI- μ_4 - H_{max} の関係は、幾つかの水槽実験や数値計算により検証されており、定量的にはある程度の誤差を持つものの、定性的には現象を良く記述出来ることが明らかにされている(例えばMoriら, 2007)。定常場においては、初期条件として波形勾配やスペクトルが与えられ、その後の波浪の変化が議論される。このような枠組みでは、与えられた波浪情報から最大波やFreak waveの出現頻度を推定するが、実際の気象・海象条件は非定常であ

り、どのような気象・海象条件において、Freak waveの出現頻度が高まるような波浪場が形成されるのかは議論されて来なかった。

本研究では、非定常な気象現象である台風をターゲットに、Freak waveの出現条件を議論するものである。

2. 思考実験

数値計算による実験の前に、現地観測データをもとにした経験式を用いて簡単な考察を行う。前節で述べたように、波浪スペクトルからFreak waveの出現頻度や最大波高を求めるスキームでは、方向分布関数の幅を無視している。実際の海洋では、方向分散の影響が大きく、これを無視することはできない。Moriら(2010)では、方向関数 $D(\theta)$ の方向分散角 $\sigma_\theta = \int \theta^2 D(\theta) d\theta$ を求め、方向分散の影響を以下の式で取り込むことを提案している。

$$\kappa_{40} = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \times BFI_{eff}^2 \dots\dots\dots (4)$$

BFI_{eff} は方向分散を考慮した有効BFIである。

$$BFI_{eff}^2 = \frac{BFI^2}{1 + \alpha R} \dots\dots\dots (5)$$

ここで $R = \delta_\theta^2 / 2\delta_\omega^2$ は、周波数分散と方向分散の比であり、 α は経験定数である。これらの関係は、Freak waveの高頻度の出現には、1) 大きな波形勾配、2) 狭い周波数スペクトル幅、3) 狭い方向分散角の必要性を示唆している。これらの物理量の関係について少し考えてみる。

Baileyら(2001)は、波浪スペクトルの局所飽和性を仮定し、Tobaの3/2乗則から代表波形勾配と波齢の関係を求めている。

$$k_s H_s = 2\sqrt{2}\pi^{3/2} B \left(\frac{c_p}{u_*} \right)^{3/2} \left[1 + C \left(\frac{c_p}{u_*} \right)^{-1} \right]^{2/3} \dots\dots (6)$$

ここで、 H_s および k_s は、有義波高および有義波数、 c_p は代表波速、 u_* は摩擦速度、 B, C は係数である。

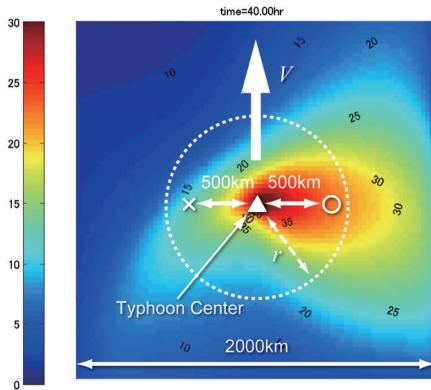


図-1 台風モデルのパラメータ（移動速度 V 、台風半径 r ）、解析対象領域および解析代表点の関係

一方、方向分散 S は、観測結果によると波齢と周波数 f を代表周波数 f_m で無次元化した

$$S = a \left(\frac{U_{10}}{c} \right)^b \left(\frac{f}{f_m} \right)^c + d \quad \dots\dots\dots (7)$$

として表され（ a, b, c, d は係数）、観測データに基づき $b = -0.5 \sim -2.5$ が提案されている。ここで、 S は光易型方向分布関数の分布幅パラメータであり、方向分布関数 D をガウス分布 $1/(\sqrt{2\pi}\sigma_\theta)e^{-(\theta-\theta_0/\sigma_\theta)^2/2}$ と仮定すると、式（5）中の σ_θ と $\sigma_\theta \simeq \sqrt{2/(1+S)}$ なる関係を持つ。

u_* と U_{10} の違いを無視すると、式（6）により、代表波形勾配は波齢が若いと単調増加、ある程度大きな波齢（ $c_p/u_* \gg 5$ ）では、 $k_s A_s$ は $(c_p/u_*)^{-2/3}$ に比例して単調減少する。一方、方向分散は、波齢に対して単調減少（ S が増加）の関係にある。発達した風波を仮定して周波数分散幅を無視すると、方向分散角は波齢の増加に応じて単調減少し、波形勾配は波齢の増加に応じて一旦上昇し、その後減少する。波形勾配は、方向分散の増加より早く減少するため、Freak waveの発達は徐々に抑えられることになる。

以上のことから、Freak waveの出現頻度は、波形勾配が最大となる波齢である風波の発達中期で最も大きくなることが予想される。

3. 数値計算による検討

(1) 計算モデルの概要

前節の検討をもとに、海上風を経験的台風モデルの1つである光田・藤井モデル（以下SGWと略記）で与え、スペクトル型波浪モデルSWANを用いて台風通過時の波浪の発達減衰過程に関する数値実験を行った。計算条件として計算領域を2000km×2000km、解像度25 km、風および碎波のソース項についてはKomenの式を用い、非線形相互作用項 S_{nl} はDIAおよびMDIAを用いて両者の違いをチェックした。DIAおよびMDIAの両者の違いはそ

れほど顕著ではなく、以下では主にDIAを用いた結果について述べる。 S_{nl} については、厳密解を用いた計算も数例実施したが、これについては別の機会に紹介する。

SGWの中心気圧を環境場より-60hPa、移動速度 $V=30 \sim 50$ km/h、最大旋衡風速半径 $r=50 \sim 100$ kmと変化させて与え、パラメータサーベイを行った（図-1）。数値実験では、1）台風通過に伴う波浪統計量の空間的な分布と2）固定点における波浪統計量の時間変化に着目して解析を行う。空間分布については、台風特性を時間的に変化させていないため、定常に達した時の空間分布を用いて評価する。時系列変化の解析対象とした固定点は、図-1に示すように台風中心通過位置△とこれより東西500kmに位置する○および×の地点である。

(2) 台風条件下におけるFreak waveの出現特性

図-2に示すのは、 $V=50$ km/h、 $r=50$ kmの条件下で、台風が中心が計算領域中心を通過したときのBFI、 H_s および σ_θ の空間分布（中央縦1列上から）と方向スペクトルの時間変化（両側の縦2列、波向きは東が0で反時計回り正）である。空間分布については、図の上が北であり、台風は南から北に向かって一定速度で直進させた。方向スペクトルは図-1に示したように計算領域の中心と東へ500kmの位置における結果であり、上から台風最接近の半日前、最接近時、半日後の計算結果である。

図-2の H_s の空間分布からわかるように、SGWで風速分布を与えたため、波高分布は東西で非対称であり、最も波高が大きいのは台風中心であるが、これより東側でも波高の大きな領域が広がっている。図には示さないが、これは風速分布と類似しており、SGWによる空間特性である。式（1）～（3）で示したようにFreak waveの出現頻度を増加させるパラメータであるBFIは、 H_s と全く異なる空間分布を持つ。BFIは台風中心位置でピークを持ち、これと同等の値が台風中心位置から南東方向（第4象限）に向かって集中して分布している。BFIは、台風の第4象限において0.6を上回る大きな値を持つ一方で、中心から南西の第3象限では0.3以下と非常に小さくなっている。第3象限では、周波数スペクトル幅は広いものの、波高が小さくまた周期もそれほど短くないために、波形勾配は第4象限の半分以下であり、このため、かなり小さい値のBFIが第3象限全体に分布している。また、第1および第2象限におけるBFIは、一部小さな値の海域があるものの全般的に0.5～0.6程度の値が平均的に分布している。一方、式（5）で示したようにFreak waveの出現頻度を抑制する方向分散角は、第2、第3象限において大きく、中心位置背後の真南と西側の一部で大きな値を示している。平均分散角が大きい場合、BFIが大きくてもFreak waveの出現頻度は低下するが、図よりこの方向分散の影響が大きく現れるのは主に第3象限であることが

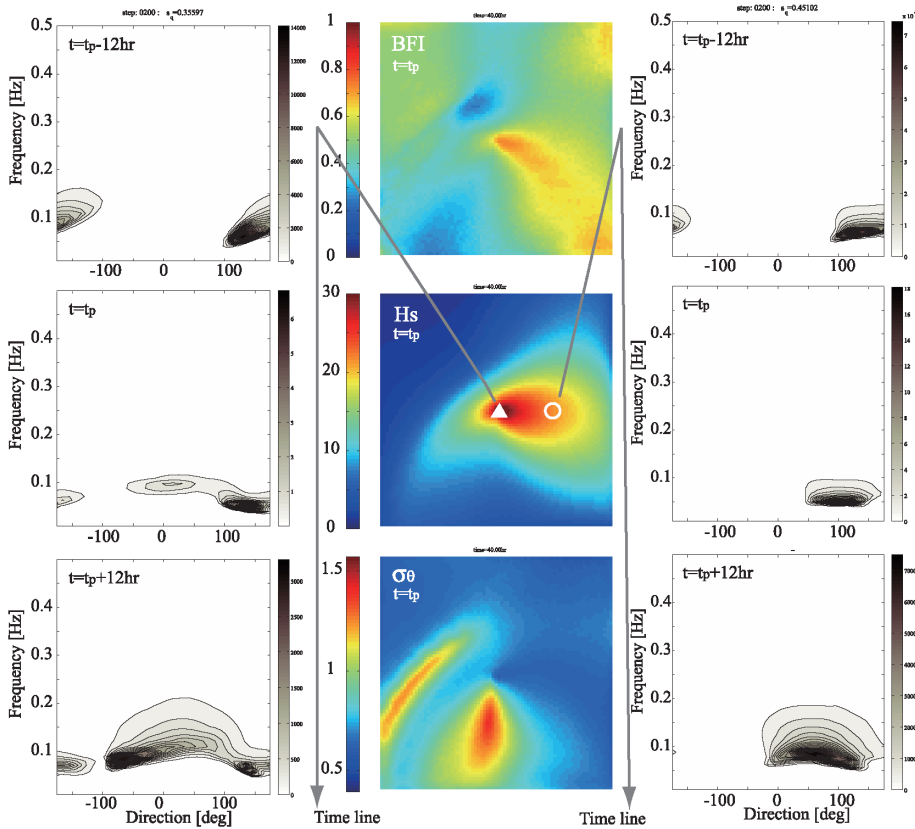


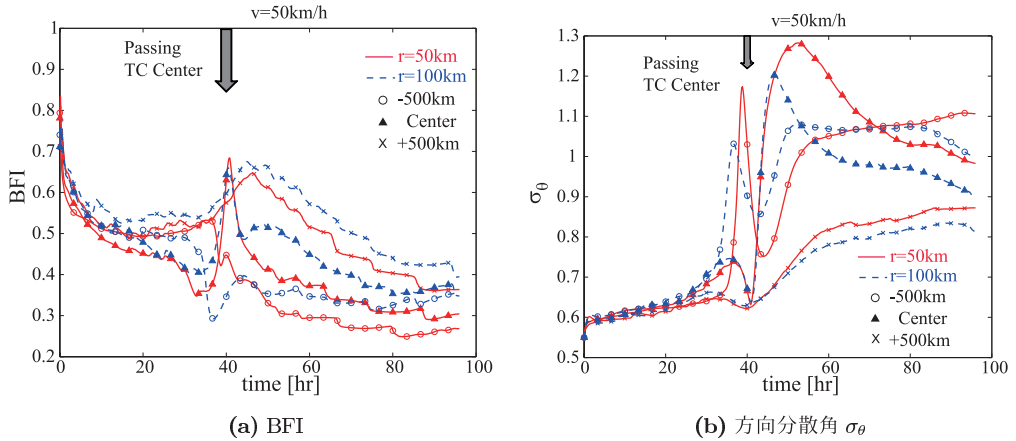
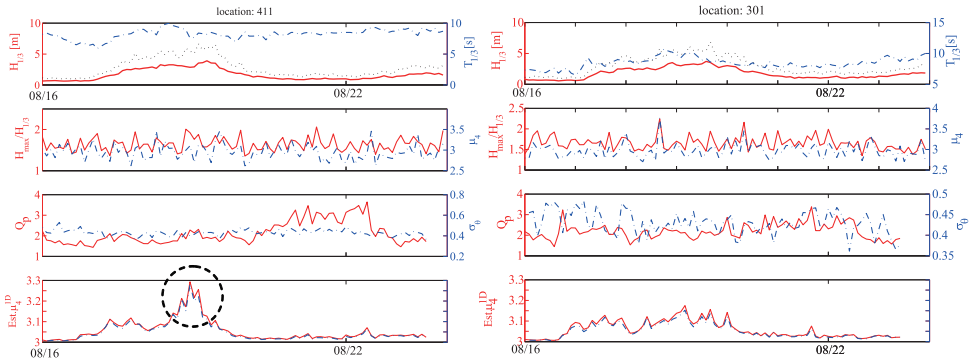
図-2 台風中心が計算領域中心を通過したときのBFI, H_s および σ_0 の空間分布(中央3列上から)と方向スペクトルの時間変化(左側:中心位置, 右側:中心位置+500km東; $V=50\text{km/h}$, $r=50\text{km}$)

わかる。

図-2の両側に示した台風中心位置(左1列)および台風東側の地点(右1列)における方向スペクトルの時間変化を見ると, 台風中心が通過する地点では, 台風通過半日前(空間分布の前方600kmに相当)において非常に集中した単一方向分布を持ち, 中心通過時にはエネルギーの集中度が増し, 通過半日後にはこれに第2象限で生じた別の風波が加わり2方向の分布を持つ。一方, 台風東側の方向スペクトルは, 台風通過の前後において単一方向分布を示し, 台風の通過に伴い徐々に方向を変えつつ方向分布もやや広がっていく。図は示さないが, 台風西側地点における方向スペクトルは時間的に大きく変化し, 方向分散角の空間分布に示したように, 最接近時に一時的に方向分散角が小さくなり, その後急激に方向分布幅が広がる傾向があった。これらの台風の各象限における方向スペクトルの傾向は, Young (2006) の観測結果と定性的に一致するものである。

上記の関係を定量的に把握するため, 図-3に台風中心位置とその東西両側500kmの地点におけるBFIおよび方向分散角 σ_0 の時間変化を示す。計算条件は, $V=50\text{km/h}$

で $r=50, 100\text{km}$ である。 H_s の最大値が現れる台風最接近時間は, どの条件・地点も $t=40\text{hr}$ である。図-3(a)に示すのはBFIの時間変化であり, BFIは台風中心が通過する地点(Δ)では, 台風が通過するときに急激に大きくなる。一方, 台風中心より西側500kmの地点($\circ$)では中心位置の半分以下の値であり, 東側500kmの地点($\times$)では台風通過後に最大になり, その後も長時間大きな値が継続する。これは図-2で示したBFIの空間分布において第4象限で大きなBFIを持つ領域が存在すること等価であり, この海域でFreak waveの出現頻度が増加する傾向があることを示唆している。さらに, 図-3(b)に示すように, Freak wave出現を抑制する方向分散角は, 台風通過以前はどの地点においても小さな値であり, 台風最接近以降において特に台風西側で変動が大きく1を超える。台風東側では方向分散角の値は比較的安定しており, 最接近時に0.8以下と危険側の値を持つ。これらの変化は図-2で示した方向スペクトルからも理解でき, 台風中心や西側の地点では, 台風通過直後に方向分布が2方向もしくは急激に広がり(図-2左下), これがBFIの低下や方向分散角の急激な変化をもたらしている。

図-3 台風通過に伴うBFIおよび方向分散角 σ_θ の時間変化 ($V=50\text{km/h}$, $r=50\text{km}$)図-4 2004年台風16号通過時の波浪統計量の時間変化
(左: 細島 (台風中心付近), 右: 潮岬 (台風東側))

さらに、台風特性と多方向場において重要となる S_{nl} を変化させ、これらの傾向についての鋭敏性をチェックした。移動速度や台風半径等の台風特性による違いは、おもに時間スケールと空間的な影響範囲に現れ、定性的な傾向そのものについては大きな影響はないことを確認した。

4. 現地観測データの解析

(1) 現地観測の概要

前節までの議論を元に、台風接近時の観測波浪データを台風トラックと観測地点の位置関係をもとに整理を行い、解析を行った。解析に用いた観測データは、全国港湾海洋波浪情報網の観測時間波形である。解析対象として太平洋沿岸の宮崎県細島および和歌山県潮岬 (共に設置水深50m) を選定した。細島と潮岬の距離は約400kmである。2004年にこのエリアを通過した台風は合計10個であり、前節の計算条件に類似する細島付近を台風中心が通過した6つの台風を解析対象とした。以下では便宜的に細島を台風中心位置 (厳密には西側地点も含む)、潮岬を台風東側地点と表記する。観測時間間隔は2時間

毎、1回の観測で得られる水位データと方向スペクトルを用い、台風通過時の有義波高のピークを挟んで前後1日のデータを解析対象とした。

(2) 解析結果

図-4に示すのは、解析対象としたデータの一例である。図は左側が細島、右側が潮岬における台風200416号のデータであり、上から $H_{1/3}$, $T_{1/3}$, $H_{max}/H_{1/3}$, μ_4 , Q_p , σ_θ および式(2)で計算される μ_4 である。図から分かるように、有義波高の時間変化に比べて、水面変位から直接計算する $H_{max}/H_{1/3}$ や μ_4 は、統計的に不安定な量であるため非常に変動が大きい。紙面の関係上省くが、波の数 N と μ_4 毎にサンプリングした $H_{max}/H_{1/3}$ の分布を見ると、式(3)と傾向が非常に良く一致した。

このようなデータをもとに、台風通過前後および台風位置 (中心もしくは東側) に注目し、データ解析を行った。なお、東側に相当する潮岬と通過した台風の最接近距離は平均で約320kmであった。図-4に示すのはその一例であり、上からBFI, 方向分散角 σ_θ および観測された $H_{max}/H_{1/3}$ をRayleigh分布に基づく最大波高分布の期待値

で正規化した $H_{max}/H_{1/3}$ の確率密度分布を示す。また、図において台風中心付近に相当する細島をTC-W、潮岬をTC-E、これに続くBPは最接近前、APは最接近後のデータを意味する。

図-5 (a) に示すように、BFIについては台風東側の観測データであるTC-Eが大きく、通過前より通過後の方が大きな値の出現確率が増加している。特に、台風通過後の東側のBFIは、中心位置付近の値に比べると平均値で2倍近い差が見られる。一方、図-5 (b) に示す方向分散角は、台風中心位置に比べて台風東側の方向分散角は大きく、平均値としての差は約30%である。また、方向分散角については台風の通過前後で大きな差は見られなかった。これらの結果は、先の数値実験の結果とおおむね一致しており、台風の東側においてFreak waveの出現頻度を増加させるBFIが大きくなり、台風中心位置よりおよびその西側においてFreak waveの出現頻度を減少させる方向分散角が大きくなるという結果が得られた。最後に、図-5 (c) に示すのは最大波高の出現特性である。台風東側の地点でRayleigh分布の期待値を上回る値がやや多めに観測されてるが、BFIや方向分散角の違いほど明確な差異は見られなかった。この原因としては、多くの観測データから観測点と台風位置を特定し、台風通過前後の短期間のデータのみを対象としたためによるサンプル数の不足 (全52サンプル)、数値実験と異なり観測地点の北側に存在する陸地の影響が考えられる。これらについては、さらなるデータの蓄積と検証が必要であろう。

5. 結論

Freak waveの出現に関する気象・海象条件について、主に台風を対象として検討を行った。その結果、有義波高の絶対的な大きさを無視すると、Freak waveが出現しやすい条件は、台風中心ごく近傍および東側であり、特にその継続時間を考えると台風の第4象限が危険海域であることが明らかになった。

謝辞：本稿で用いた観測データは、国土交通省港湾局によって観測され、港湾空港技術研究所で処理されたものである。本研究の一部は、科学研究費補助金のサポートによる成果であり、ここに感謝の意を表す。

参 考 文 献

- Bailey, R.J., S.F. Jones and Y. Toba (1991) : The steepness and shape of wind waves, Journal of the Oceanographical Society of Japan, Vol.47, pp.249-264.
- Mori, N. and P.A.E.M. Janssen (2006) : On kurtosis and occurrence probability of freak waves, Journal of Physical Oceanography, 36, 7, pp.1471-1483.
- Mori, N., M. Onorato, P.A.E.M. Janssen, A. R. Osborne, and M. Serio (2007) : Exceedance probability for strongly nonlinear

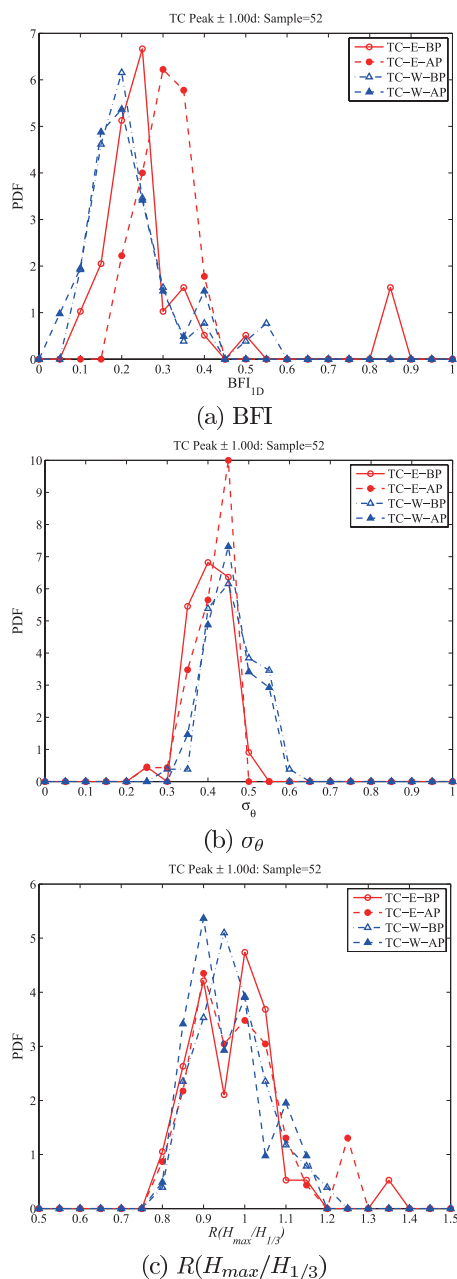


図-5 2004年抽出台風にもとづく波浪統計量の確率密度分布 (丸印：台風東側 (TC-E)，三角印：台風西側 (TC-W)，白抜：台風ピーク通過前 (BP)，塗潰し：台風ピーク通過後 (AP))

long crested waves, JGR, doi:10.1029/2006JC004024.

Mori, N., M. Onorato, P.A.E.M. Janssen (2010) : On the estimation of the kurtosis in directional sea states for freak wave forecasting, Journal of Physical Oceanography, 投稿中.

Young, I.R. (2006) Directional spectra of hurricane wind waves, JGR, Vol.111, doi:10.1029/2006JC003540.