

ハリケーン・カトリーナによる高波の解析

Tracey H. Tom¹・間瀬 肇²・勝井 伸悟³・安田 誠宏⁴・小川 和幸⁵

3種類の気象データ (NARR, GFS, FNL), 3種類の風から波へのエネルギー伝達モデル (Komen ら, Janssen, Lalbeharry ら) および計算対象周波数領域を2種類としてハリケーン・カトリーナによる高波追算を行い、観測結果と比較し波浪追算精度を検討した結果、1) 空間・時間分解能がよい NARR を用いても推算結果は観測結果をうまく再現できない、2) GFS と FNL は同程度の結果が得られる、3) エネルギー伝達モデルは Komen らが全般的に良く、Janssen では観測結果に比べて小さくなる、4) 最も大きな有義波高が観測された地点で最も再現性が良かったのは、Lalbeharry らのモデルを用いた場合であることがわかった。

1. はじめに

ハリケーン・カトリーナは、2005年8月23日にバハマ南東で発生した熱帯低気圧が小アンティル諸島方面から西進してきた10番目の熱帯低気圧と合体し、12番目の熱帯低気圧となってハリケーンに発達し、8月25日にフロリダ半島に上陸した。その後メキシコ湾に抜け、8月29日ルイジアナ州に再上陸して北上した (後出の図-2にカトリーナのコースを示す)。

ハリケーン・カトリーナによる被害は、カリブ海沿岸や米南部を中心に生じたが、特に再上陸後のルイジアナ州での被害が大きかった。海に面するニューオーリンズでは、市の陸上面積の約8割が浸水した。

カトリーナによる高潮の解析結果は、既に幾つか発表されている (LSU Hurricane Center, 2005; 山下, 2005; 高山ら, 2005)。しかし、高波解析の結果はまだ発表されていないようである。高潮・高波を前もって精度良く予測 (予報) することは、避難情報として重要である。

本研究では、3種類の気象データ、3種類の風から波へのエネルギー伝達モデルおよび計算対象周波数領域を2通りに変えてハリケーン・カトリーナによる高波の解析計算を行い、メキシコ湾での観測結果との比較を通して、波浪推算精度を検討するものである。

2. 波浪追算方法

(1) 波浪推算システムの概要

カトリーナの高波追算に当たっては、間瀬ら (2005) が構築した GFS-WRF-SWAN 波浪予測システムを用いた。このシステムは、Global Forecast System (GFS), Weather

Research Forecast (WRF), Simulating WAves Nearshore (SWAN) からなる。

GFS は、米国環境予測センター (NCEP) の全球気象予報モデルである。このモデルは、全球を緯度方向に 768、経度方向に 384、高さ方向 64 に区切った格子を用いて気象予報計算を行う。その予報値が 3 時間間隔、経度・緯度方向に 1 度間隔で、1 日 4 回 384 時間先まで web 上にアップロードされる。WRF は、米国大気研究センター (NCAR) によって開発された局地気象予測モデルである。WRF は、GFS の 1 度間隔のデータを取り込んで、メソスケールの気象予測計算を行うことができる。本研究では広領域を対象とする計算を行うので、WRF は用いない。SWAN はデルフト工科大学で開発された第 3 世代の沿岸波浪推算モデルである。SWAN の設定については、章を改めて説明する。

(2) 用いた気象データ

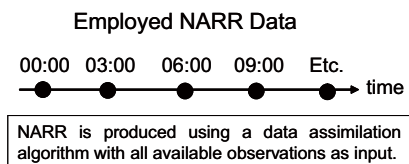
図-1 に、GFS を含む用いた 3 種類の気象データの概略を示した。

図-1 (a) の NARR (North American Regional Reanalysis) は、北アメリカを対象とした再解析データであり、空間メッシュは 32 km、時間間隔は 3 時間である。図中の●印で示した 3 時間おきの気象データを波浪追算に用いた。

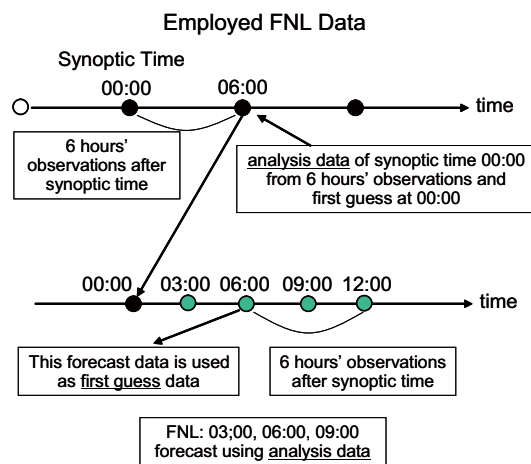
図-1 (b) の GFS データは、ある総観時刻 (Synoptic Time 0:00, 06:00, 12:00, 18:00 GMT) から 2 時間 45 分間の気象観測結果により作成された初期条件を用いて 384 時間先まで予報された、空間メッシュ 1 度、時間間隔 3 時間の数値予報データである。図中の●印で示した計算開始時刻の初期条件は観測結果に基づいた気象解析データであり、これを波浪追算に用いた。

FNL (Final Analysis) は、ある総観時刻 (0:00, 06:00, 12:00, 18:00 GMT) から 6 時間の観測結果と 1 つ前の予報サイクルから得られる次サイクルの計算開始時刻における予報結果 (first guess) を用いて初期条件が作成され、予報計算が行われる。この 6 時間おきの初期データ

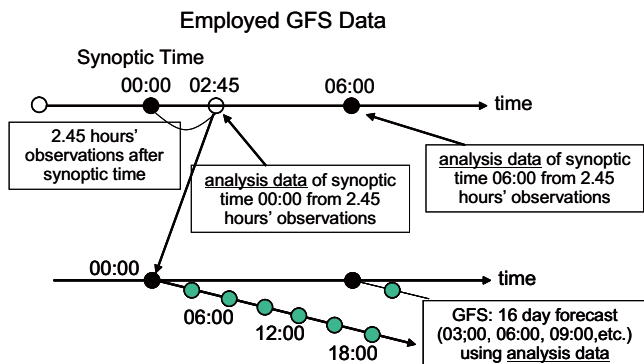
1 (株) サーフレジェンド システム管理マネージャー
2 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所
3 京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻
4 正会員 博(工) 京都大学助手 防災研究所
5 (株) サーフレジェンド 気象予報士



(a) NARR



(c) FNL



(b) GFS

図-1 用いた気象データ

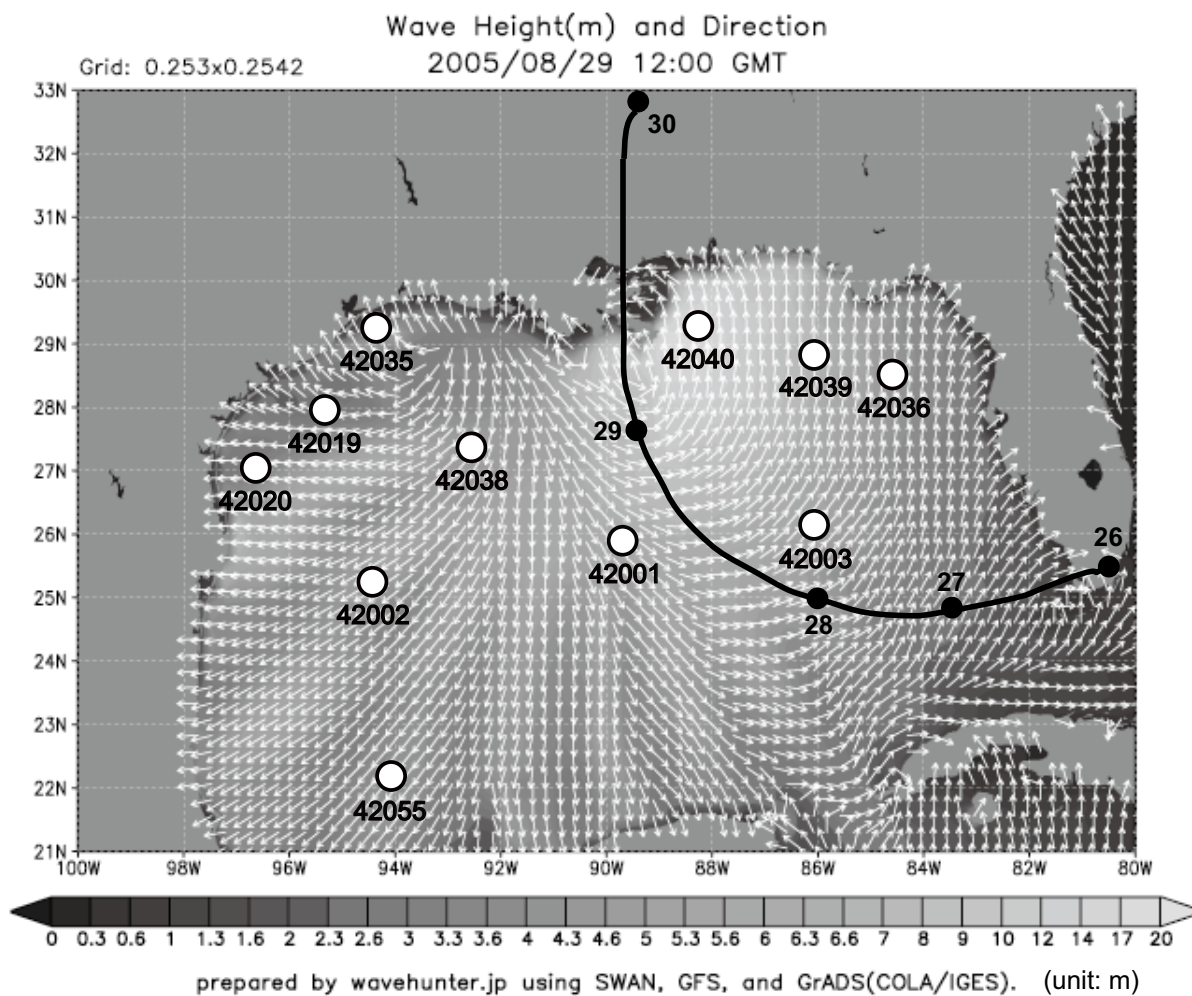


図-2 比較に用いたブイデータの位置

が FNL としてインターネットで公開されている。GFS に比べて観測結果がより多く取り入れられ、またその時刻の予報計算結果も取り入れられた気象データである。図-1(c)の●印で示された時刻の気象解析データを波浪追算に用いた。

(3) 用いた観測データ

メキシコ湾には多くの観測ブイが設置されている (National Data Buoy Center)。波浪追算結果との比較に当たっては、図-2 に示した 11 地点に設置されているブイで計測された風向、風速、波高および周期を用いた。なお、この図にはカトリーナの経路および波浪の平面分布 (濃淡図、ベクトル図) も示してある。

3. SWAN の設定

SWAN には、風から波へのエネルギー伝達および白波によるエネルギー逸散に対して、WAM Cycle-3 あるいは WAM Cycle-4 のどちらかの物理モデルを選べるオプションがある。

WAM Cycle-3 は Komen ら (1984) の定式化を採用しており、Cycle-4 では Janssen (1989) による風と波の干渉を考慮した定式化を採用している。また、WAM には数値的に安定であるように、Hersbach・Janssen (1999) による、以下のリミッターが設けられている。

$$|\Delta N(\sigma, \theta)|_{\max} = (2\pi)^2 * 3.0 * 10^{-7} g u_* \sigma_c \Delta t / (\sigma^3 k) \quad (1)$$

ここで、 N は波作用量、 σ は相対角周波数、 θ は波向、 g は重力加速度、 u_* は摩擦速度、 σ_c は限界相対角周波数、 Δt は計算時間間隔、 k は波数である。WAM Cycle-4.5 は Cycle-4 をアップデートしたもので、Phillips の線形増幅機構 (共鳴理論) が導入されている。

SWAN のソース項は Phillips の線形増幅機構が入っており、リミッターは Ris (1997) による

$$|\Delta N(\sigma, \theta)|_{\max} = 0.1 \alpha_{PM} / (2\sigma k^3 C_g) \quad (2)$$

が用いられている。ここで、 α_{PM} は Phillips の定数、 C_g は群速度である。SWAN は WAM Cycle-4 の物理モデルを取り入れているが、shift growth parameter $z_\alpha = 0.01$ が省かれており、また Hersbach・Janssen (1999) のリミッターの代わりに Ris (1997) のそれが使われているといったように、完全には WAM Cycle-4 と整合性が取れていない。

そこで、Lalbeharry et al (2004) は SWAN に z_α を加えるとともに、リミッターには Hersbach・Janssen (1999) を用いるように修正した。この修正を行うと、オリジナルの SWAN モデルに比べて、追算結果は観測結果と整合性が良くなることを示している。

本研究においては、SWAN を用いる際に、ソース項として Komen ら (1984) モデル、Janssen (1989) モデルお

び Lalbeharry ら (2004) モデルの 3 種類を用いた。また、計算対象とする周波数領域の設定法によっても計算結果が異なることがわかった (間瀬ら, 2006) ので、0.04~1.0 Hz を 35 個の周波数成分を用いた場合と、0.04~0.5 Hz を 25 個の周波数成分を用いた場合の 2 種類を用いた。

用いた海底地形データは 1 分間隔である。メキシコ湾は大規模な遠浅地形であるため、1 分の海底地形で十分と思われる。SWAN の計算には 1.5 分の格子間隔を用い、計算時間間隔は 20 分とした。

4. 波浪追算結果と観測値の比較・検討

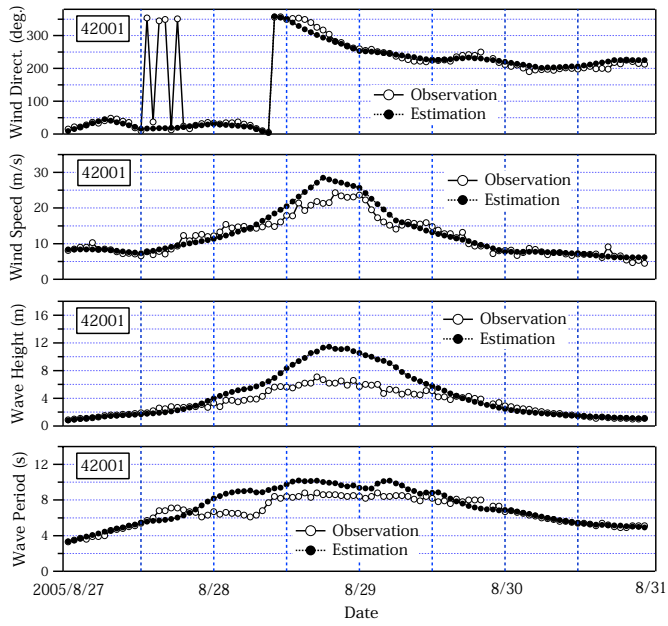
図-3 は 4 地点における追算結果と観測結果を比較したものである。各図は上から風向、風速、有義波高、ピーク周期の順に並んでいる。図中の●印が追算値 (風向および風速については推算値)、○印が観測値である。2005 年 8 月 29 日 12:00 GMT における波浪の平面分布は図-2 に示されている。追算に用いた気象データは GFS である。SWAN の設定は、風から波へのエネルギー伝達に Lalbeharry ら (2004)、計算対象周波数は 0.04~0.5 Hz である。

風向については、若干の差を除いて、良く一致している。風速は地点 42001 および 42040 において、ピーク近傍で推算値のほうが少し大きくなっている。地点 42038 および 42039 では、両者の対応はよい。有義波高に関しては、地点 42001 で追算値がピーク周辺で観測値に比べて 2 倍近く大きくなっている。その他の 3 地点では、かなり良好な対応関係が見られる。ピーク周期に関しては、地点 42038 においてピーク周辺で一致の程度が若干悪くなっているが、全体的に両者の対応は良好である。

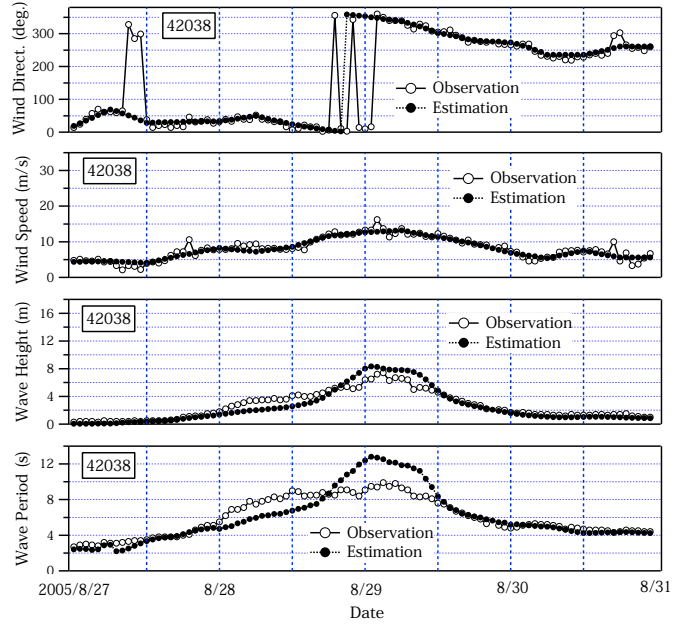
本論文では全比較結果を載せることはできないので、推算値と観測値の比較結果を表-1 の表形式で示す。地点 42001~42055 に対する比較結果が、良い (○印)、概して良い (△印)、概して悪い (▲印)、悪い (●印) で示してある。図-3 に示した 4 地点の結果は、Global Forecast System, Lalbeharry ら (2004)、0~0.5 Hz の欄に、それぞれ「悪い」、「良い」、「良い」、「良い」と示してある。

すべての計算結果を整理すると、以下のことがわかった。

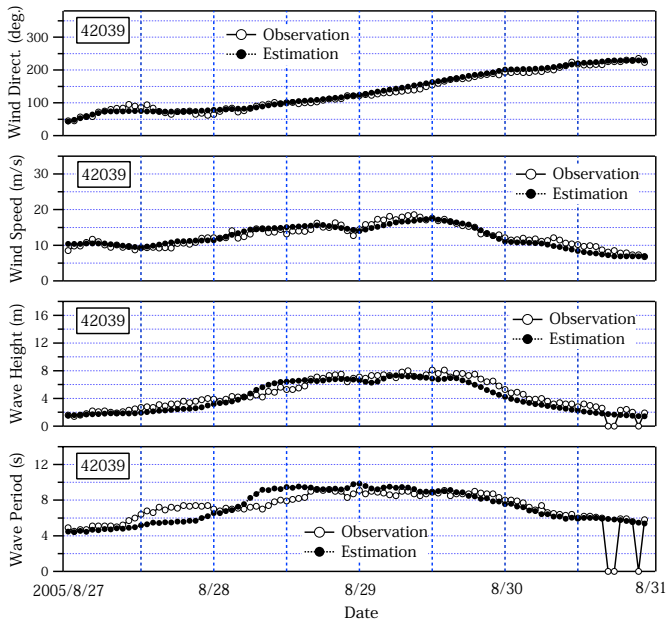
気象データについてみると、空間分解能および時間分解能が最も高い NARR が最も良い追算結果が得られると期待していたが、結果はあまり良くなかった。特に、気象データ NARR、エネルギー伝達モデル Lalbeharry らおよび周波数領域 0.04~1.0 Hz の組み合わせが最も良くなかった。周波数領域を 0.04~0.5 Hz とすれば、地点 42040 を除いて追算結果は良くなる。地点 42040 は図-2 に見られるようにニューオリンズに近い場所で、ピークの有義波高が約 16m と観測されているのに比べ、追



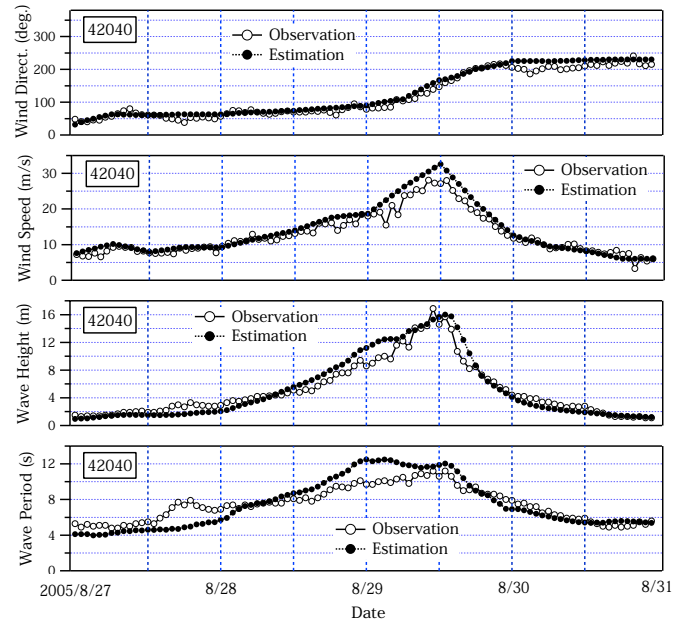
(a) No. 42001



(b) No. 42038



(c) No. 42039



(d) No. 42040

図-3 風向、風速、波高および周期に関する観測結果と推算結果との比較 (気象データは GFS, エネルギー伝達は Lalbeharry ら, 周波数領域は 0.04~0.5 Hz)

表-1 推算結果と観測結果の比較のまとめ

Cal. Model Buoy Locaton	North American Regional Reanalysis				Global Forecast System				Final Analysis				
	Komen et al. (1984)		Lalbeharry et al. (2004)		Komen et al. (1984)		Janssen (1991)		Lalbeharry et al. (2004)		Komen et al. (1984)		Lalbeharry et al.
	0~1.0 Hz	0~0.5 Hz	0~1.0 Hz	0~0.5 Hz	0~1.0 Hz	0~0.5 Hz	0~1.0 Hz	0~0.5 Hz	0~1.0 Hz	0~0.5 Hz	0~1.0 Hz	0~0.5 Hz	0~0.5 Hz
42001 (L)	○	○	○	○	▲	▲	○	○	●	●	△	△	●
42002 (L)	○	○	●	○	△	△	○	○	△	▲	△	△	▲
42003 (R)	▲	○	△	△	○	○	▲	▲	△	△	○	○	○
42019 (L)	○	△	●	○	○	○	△	△	●	○	○	○	○
42020 (L)	○	○	●	○	○	○	○	○	●	○	○	○	○
42035 (L)	○	○	●	○	○	○	○	○	●	○	○	○	○
42036 (R)	○	○	●	○	○	○	△	△	△	○	○	○	○
42038 (L)	○	○	●	○	○	○	△	△	●	○	○	○	○
42039 (R)	△	△	●	○	△	△	●	●	△	○	△	△	○
42040 (R)	●	●	●	●	△	△	●	●	○	○	△	△	○
42055 (L)	○	○	●	○	○	○	○	○	▲	○	○	○	○

○= good; △= relatively good; ▲= relatively bad; ●= bad; (L)= left hand side; (R)= right hand side of Hurricane Katrina's track

算結果は約 10m とかなり小さかった。したがって、表-1 では「悪い」になっている。GFS と FNL を比べてみると、波浪追算結果に対する差異は少ない。気象観測データを多く含む FNL が若干良いようである。

エネルギー伝達モデルに関しては、一般に Komen ら (1984) のモデルが良かった。Janssen (1991) モデルでは、推算結果は観測結果に比べて一般に小さくなる。この傾向は間瀬ら (2001) にも現れていた。特に、観測有義波高が大きい地点 42040 で、推算結果が小さくなった。

計算対象周波数領域に関しては、エネルギー伝達モデルによってその影響が異なることがわかった。Komen ら (1984) のモデルや Janssen (1991) モデルではそのとり方による影響をあまり受けないが、Lalbeharry ら (2004) モデルではその影響が大きい。

最も大きな有義波高が観測された地点において最も良い再現結果が得られたのは、図-3 に示した Lalbeharry

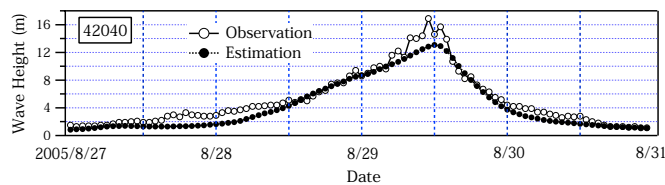


図-4 地点42040における有義波高に関する観測結果と推算結果の比較 (気象データはGFS, エネルギー伝達は Komen らのモデル, 周波数領域は0.04~0.5 Hz)

ら (2004) モデルであったが、全ケースに対して安定した結果が得られたのは Komen ら (1981) であった。ただし、地点 42040 では図-4 のように有義波高のピーク値が少し小さくなる。

5. まとめ

3種類の気象データ (NARR, GFS, FNL), 3種類の風から波へのエネルギー伝達モデル (Komen ら, Janssen, Lalbeharry ら), および計算対象周波数領域を2通り (0.04~1.0 Hz, 0.04~0.5 Hz) の組合せによりハリケーン・カトリーナによる高波の解析計算を行い、メキシコ湾での観測結果との比較を通して波浪推算精度を検討した。本研究の主要な結果は以下のとおりである。

- 1) 空間・時間分解能が最も高い NARR を用いても、波浪推算結果は観測結果を十分に再現できなかった。
- 2) GFS と FNL はどちらも同じ程度の波浪追算結果が得られた。したがって、高波災害発生後直ちに追算を行う場合には GFS, その以外の場合には FNL を用いればよい。
- 3) エネルギー伝達モデルに関しては、Komen ら (1984) が全般的に良かった。Janssen (1991) モデルでは推算結果は観測結果に比べて一般に小さくなる。

- 4) Komen らのモデルや Janssen モデルでは計算対象周波数領域のとり方によって影響をあまり受けないが、Lalbeharry らのモデルではその影響が大きい。
- 5) 最も大きな有義波高が観測された地点で最も再現性が良かったのは、Lalbeharry らのモデルであった。

参考文献

- 高山知司・高橋重雄・平石哲也・河合弘泰・小田勝也・村田 進・小谷野喜二 (2005): ハリケーンカトリーナによる米国メキシコ湾岸の高潮・高波災害の現地報告, (財) 沿岸技術研究センター機関紙, 臨時増刊号, pp.9-18.
- 間瀬 肇・平尾博樹・国富将嗣・高山知司 (2001): SWAN を用いた日本沿岸波浪推算システム構築と適用性の検討, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.236-240.
- 間瀬 肇・木村雄一郎・Tracey H. Tom・小川和幸 (2005): GFS-WRF-SWAN 援用波浪推算システムの構築と検証, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.181-185, 2005.
- 間瀬 肇・勝井伸悟・安田誠宏・Tracey H. Tom・小川和幸 (2006): GFS-WRF-SWAN システムによる 3 シーズンの波浪予測とシステムの検証, 海洋開発論文集, 第 22 巻, 印刷中.
- 山下隆男 (2005): ハリケーン・カトリーナによるニューオーリンズの高波災害 (速報), 土木学会誌, Vol.90, No.11, pp.39-43.
- FNL: Global final analysis, NCEP, <http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/>.
- GFS: A medium range synoptic forecasting system developed and processed, NCEP, <http://www.emc.ncep.noaa.gov/modelinfo>.
- Herbach, H. and P.A.E.M. Janssen (1999): Improvement of the short-term behaviour in the wave ocean model (WAM), Jour. Atmos. Oceanic Techn., Vol.16, pp.8840-892.
- Janssen, P.A.E.M. (1991): Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting, Jour. Phys. Oceanography, Vol.21, pp.1631-1642.
- Komen, G.J., K. Hasselmann and S. Hasselmann (1984): On the existence of a fully developed wind-sea spectrum, Jour. Phys. Oceanography, Vol.14, pp.1271-1285.
- Lalbeharry, R., A. Behrens, H. Guenther and L. Wilson (2004): An evaluation of wave model performances with linear and nonlinear dissipation source terms in Lake Erie, Proc. 8th Int. Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Hawaii, USA.
- LSU Hurricane Center (2005): Hurricane Katrina Hindcast, Louisiana State University, <http://hurricane.lsu.edu/floodprediction/katrina32/images/katrina32.JPG>.
- NARR: North American Regional Reanalysis, NCEP, <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/rrean/>.
- Nation Data Buoy Center: NOAA, <http://www.ndbc.noaa.gov/>.
- Ris, R.C. (1997): Spectral modelling of wind waves in coastal area, Dept. of Civil Eng., Delft University of Tech., Rept. No. 97-4, 160p.
- SWAN: A numerical wave model for obtaining realistic estimates of wave parameters in coastal areas, lakes and estuaries from given wind-, bottom-, and current conditions, Delft University of Technology, <http://fluidmechanics.tudelft.nl/swan/default.htm>.
- WRF: A mesoscale numerical weather prediction model, NCAR, <http://wrf-model.org/>.