

2008年ハリケーン・アイクによる高波の追算

HINDCAST OF WAVES GENERATED BY HURRICANE IKE

間瀬 肇¹・Tracey H. Tom²・安田誠宏³・森 信人⁴

Hajime MASE, Tracey H. TOM, Tomohiro YASUDA and Nobuhito MORI

¹ 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

² (株) サーフレジェンド システム管理マネージャー (〒251-0047 藤沢市辻堂西海岸3-1-1)

³ 正会員 博(工) 京都大学助教 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

⁴ 正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

Hurricane Ike was the third most destructive hurricane to land in the United States. Ike made its final landfall in Galveston, Texas, United States as a Category 2 hurricane. This paper evaluated wave predictions using two different meteorological 10m wind data (Global Forecast System and Rapid Update Cycle) and the third generation wave model, SWAN. SWAN hindcast runs were performed using three different energy transfer models and white capping models. Hindcast results were compared with observational data from 9 NDBC (National Data Buoy Center) stations to verify performance of the wave prediction system. In navigable semicircle of the IKE the significant wave heights were well reproduced. In dangerous semicircle there are differences in timing when the highest wave height appears at the highest wind speed in the prediction; however, the highest wave height and wind speed do not correspond each other in the observation.

Key Words : Hurricane Ike, wave prediction, global forecast system (GFS), rapid update cycle (RUC), simulating waves nearshore (SWAN)

1. はじめに

ハリケーン・アイクは、2008年9月にアフリカ西海岸で発生し、9月7日にカテゴリー3の強さでキューバ東部に上陸し、8日にキューバ西部に再上陸した。2回のキューバ上陸により、カテゴリー1まで勢力を落としたが、メキシコ湾に出てから再発達し、9月13日にはテキサス州のガルベストーンに上陸した。上陸時の気圧は952hPa、風速は45m/sのカテゴリー2であったが、他のハリケーンと比べて強風域が広がったため、このハリケーンは広い範囲に影響を及ぼした。

2005年8月のハリケーン・カトリーナに続き、アメリカ合衆国の主要な油田地帯のメキシコ湾沿岸を襲うことになったが、地球温暖化(海水温上昇・水蒸気量増加)の影響で、こうした巨大ハリケーン(サイクロン, 台風)の発生する確率が高まっている。

本研究は、波浪予報・追算システムを用いて、ハリケーン・アイクによってもたらされた高波を解析する。ここでは、2種類の気象データと3種類の波浪エネルギーモデルを用いて波浪追算を行い、メキシコ湾に設置されているブイで観測されたデータと比較検討し、波浪予報・追算システムの検証を行う。

2. GFS-WRF-SWAN 波浪推算システムによる高波追算

(1) 波浪推算システム

ハリケーン・アイクによる高波の追算に当たっては、間瀬ら¹⁾が構築したGFS-WRF-SWAN波浪推算システムを利用した。このシステムは、Global Forecast System (GFS)²⁾、Weather Research and Forecasting (WRF)³⁾、Simulating WAaves Nearshore (SWAN)⁴⁾を連携・統合した波浪の予報と追算を行うシステムである。GFSの代わりにNCEP-FNL (Final Analysis)⁵⁾、NARR (North American Regional Reanalysis)⁶⁾、RUC (Rapid Updated Cycle)⁷⁾といった気象データを利用しても良い。ここでは、ハリケーン・カトリーナを解析した著者ら⁸⁾と同様な高波追算を行うが、以下に示す気象データを用いる。

(2) 用いた気象データ

GFS²⁾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、高さ方向に64に区切った格子を用いて気象予報を行う。GFSデータは、ある総観時刻から2時間45分間の気象観測結果に

表-2 誤差基準を上回る総数

Cal. Model	Global Forecast System			Rapid Update Cycle		
	Komen et al.	Janssen	Westhuysen	Komen et al.	Janssen	Westhuysen
42001	1	0	0	2	1	1
42002	5	3	3	3	1	0
42019	4	1	1	4	1	1
42020	6	3	3	6	1	1
42035	4	3	3	2	4	1
42036	3	1	1	6	2	3
42039	2	0	0	6	3	3
42040	2	0	1	5	2	2
42055	2	1	1	3	4	2

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i)^2}} \quad (4)$$

ここで、 O_i と P_i はそれぞれ n 個の観測値と予測値、 O_{mean} と P_{mean} は観測値と予測値の平均値、 σ_O と σ_P は観測値と予測値の標準偏差である。

バイアスについては波高 0.5m 以上および周期 1.0s 以上、相関係数は絶対値が 0.7 以下、2 乗平均平方根は波高 1m 以上および周期 2s 以上、勾配については 20% 以上の一致度が良くないケース数を波高と周期に関してカウントし、その結果を表-2 にまとめた。この表から、総カウント数が少ない（一致度が良い）のは、気象データとして GFS、エネルギーモデルとして Janssen¹¹⁾、あるいは、Westhuysen et al.¹⁵⁾ を用いた場合である。Westhuysen et al. モデル¹⁵⁾ では、GFS²⁾ でも RUC⁷⁾ でもどちらの気象データを用いても一致度は良いこともわかった。

5. まとめ

本研究は、著者らが開発している波浪予報・追算システムを用いて、ハリケーン・アイクによって生じた高波追算を行った。ここでは、2 種類の気象データと 3 種類の波浪エネルギーモデルを用いた。その結果、以下のことがわかった。

有義波高に関して、可航半円側では、ピーク値をよく再現することができた。ただし、ピークに至るまでの波高を過小評価する結果も見られた。その時刻ごろには、風速が大きくなっておらず、波高のみが大きくなっていった。危険半円の地点における風速と波高のピーク出現時刻がほぼ一致する計算結果は、風速がピークになる前に有義波高がピークになった観測結果とは異なる結果であった。一般に波浪推算においては、うねりと風波が混在した場の推算が難しいことが指摘されているが、これを改善することを図った Westhuysen et al. モデル¹⁵⁾ を用いても、明らかな改善結果は得られなかった。

追算値と観測値との誤差解析から、追算値の精度が良いのは、気象データとして GFS²⁾、エネルギーモデルとして Janssen¹¹⁾、あるいは、Westhuysen et al. モデル¹⁵⁾ を用いた場合であった。また、Westhuysen et al. モデルでは、GFS および RUC のどちらの気象データを用いても一致度は良かった。

参考文献

- 1) 間瀬 肇・木村雄一郎・Tracey H. Tom・小川和幸：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.
- 2) GFS: A medium range synoptic forecasting system developed and processed, NCEP, <http://www.emc.ncep.noaa.gov/modelinfo>.
- 3) WRF: A mesoscale numerical weather prediction model, NCAR, <http://wrf-model.org/>.
- 4) 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>.
- 5) FNL: Final operational global analysis data, NCEP, <http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/>.
- 6) NARR: North American Regional Reanalysis, NCEP, <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/rrean/>.
- 7) RUC: Rapid Update Cycle, <http://ruc.fsl.noaa.gov/>.
- 8) Tracey H. Tom・間瀬 肇・勝井伸悟・安田誠宏・小川和幸：ハリケーン・カトリーナによる高波の解析，海岸工学論文集，第 53 巻，pp.421-425, 2006.
- 9) Nation Data Buoy Center: NOAA, <http://www.ndbc.noaa.gov/>.
- 10) Komen, G.J., K. Hasselmann and S. Hasselmann: On the existence of a fully developed wind-sea spectrum, Jour. Phys. Oceanography, Vol.14, pp.1271-1285, 1984.
- 11) Janssen, P.A.E.M.: Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting, Jour. Phys. Oceanography, Vol.21, pp.1631-1642, 1991.
- 12) Herbach, H. and P.A.E.M. Janssen: Improvement of the short-term behaviour in the wave ocean model (WAM), Jour. Atmos. Oceanic Techn., Vol.16, pp.8840-892, 1999.
- 13) Ris, R.C.: Spectral modelling of wind waves in coastal area, Dept. of Civil Eng., Delft University of Tech., Rept. No. 97-4, 160p, 1997.
- 14) Lalbeharry, R., A. Behrens, H. Guenther and L. Wilson: 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, 2004.
- 15) van der Westhuysen A.J., M. Zijlema and J.A. Battjes: Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water, Coastal Eng., Vol.54, pp.151-170,2007.

表-1 追算値と観測値の誤差

Significant Wave Height								Mean Period							
Cal. Model		Global Forecast System			Rapid Update Cycle			Cal. Model		Global Forecast System			Rapid Update Cycle		
Buoy #		Kom	Jan	Wes	Kom	Jan	Wes	Buoy #		Kom	Jan	Wes	Kom	Jan	Wes
42001 ()	Bias	-0.26	0.18	-0.31	-0.25	0.18	-0.31	42001 ()	Bias	-1.07	0.89	0.38	-1.19	0.23	-0.18
	Corr coeff	0.95	0.93	0.95	0.86	0.81	0.83		Corr coeff	0.93	0.84	0.87	0.81	0.77	0.81
	RMSE	0.86	0.97	0.87	1.31	1.67	1.46		RMSE	1.24	1.21	1.09	1.47	1.03	1.09
	Sym slope	1.02	0.95	1.04	1.03	0.94	1.03		Sym slope	1.15	0.89	0.94	1.18	0.97	1.01
42002 (L)	Bias	-0.88	-0.58	-0.99	-0.35	-0.19	-0.47	42002 (L)	Bias	-1.47	0.17	-0.08	-1.51	0.15	-0.01
	Corr coeff	0.83	0.76	0.78	0.83	0.82	0.82		Corr coeff	0.73	0.67	0.75	0.63	0.67	0.74
	RMSE	1.19	1.17	1.34	0.91	0.86	0.96		RMSE	1.86	1.62	1.67	1.89	1.17	1.18
	Sym slope	1.23	1.12	1.27	1.06	1.03	1.10		Sym slope	1.23	0.96	0.98	1.26	0.98	0.99
42019 (L)	Bias	-0.28	-0.10	-0.39	0.07	0.24	0.10	42019 (L)	Bias	-2.11	-0.84	-0.97	-1.80	-0.37	-0.37
	Corr coeff	0.89	0.88	0.90	0.88	0.89	0.90		Corr coeff	0.43	0.46	0.49	0.10	0.11	0.45
	RMSE	0.69	0.67	0.71	0.73	0.71	0.65		RMSE	2.40	1.55	1.73	2.16	1.21	1.14
	Sym slope	1.07	1.02	1.11	0.95	0.92	0.95		Sym slope	1.38	1.11	1.13	1.32	1.06	1.05
42020 (L)	Bias	-0.98	-0.72	-0.90	-0.70	-0.48	-0.53	42020 (L)	Bias	-2.51	-0.53	-0.79	-2.55	-0.78	-0.42
	Corr coeff	0.86	0.81	0.82	0.90	0.91	0.93		Corr coeff	0.71	0.74	0.80	0.61	0.63	0.72
	RMSE	1.22	1.10	1.21	0.93	0.77	0.75		RMSE	2.93	1.97	1.94	2.98	1.72	1.49
	Sym slope	1.41	1.27	1.35	1.26	1.19	1.19		Sym slope	1.40	1.03	1.06	1.46	1.12	1.05
42035 ()	Bias	-0.54	-0.33	-0.38	-0.49	-0.50	-0.22	42035 ()	Bias	0.00	0.77	0.81	-1.13	-0.12	0.61
	Corr coeff	0.86	0.84	0.84	0.93	0.88	0.89		Corr coeff	0.12	-0.49	-0.55	0.81	0.65	0.69
	RMSE	1.11	1.09	1.09	0.80	1.08	0.79		RMSE	0.84	1.32	1.32	1.34	0.63	0.86
	Sym slope	1.33	1.23	1.26	1.24	1.31	1.14		Sym slope	1.01	0.91	0.91	1.17	1.02	0.93
42036 (R)	Bias	-0.36	0.08	-0.11	-0.77	-0.62	-0.74	42036 (R)	Bias	-1.35	0.97	0.99	-2.17	-0.91	-0.98
	Corr coeff	0.96	0.90	0.93	0.94	0.95	0.94		Corr coeff	0.24	-0.09	-0.07	0.17	0.15	0.14
	RMSE	0.50	0.50	0.44	0.89	0.74	0.88		RMSE	1.51	1.61	1.48	2.33	1.25	1.54
	Sym slope	1.09	0.97	1.02	1.25	1.19	1.23		Sym slope	1.24	0.87	0.87	1.44	1.15	1.15
42039 (R)	Bias	-0.47	-0.06	-0.41	-1.12	-0.92	-1.09	42039 (R)	Bias	-1.68	0.06	0.10	-2.29	-0.97	-0.99
	Corr coeff	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97		Corr coeff	0.86	0.79	0.86	0.88	0.86	0.85
	RMSE	0.65	0.52	0.64	1.23	1.05	1.20		RMSE	1.77	0.69	0.79	2.35	1.11	1.27
	Sym slope	1.10	0.99	1.08	1.33	1.26	1.30		Sym slope	1.28	0.99	0.98	1.42	1.14	1.14
42040 (R)	Bias	-0.56	-0.06	-0.54	-0.86	-0.61	-0.80	42040 (R)	Bias	-1.27	0.57	0.42	-1.75	-0.36	-0.34
	Corr coeff	0.96	0.94	0.95	0.93	0.93	0.94		Corr coeff	0.91	0.84	0.91	0.87	0.87	0.92
	RMSE	0.88	0.83	0.91	1.17	1.01	1.08		RMSE	1.42	1.09	0.96	1.89	0.80	0.72
	Sym slope	1.09	0.99	1.08	1.21	1.14	1.18		Sym slope	1.19	0.93	0.94	1.30	1.06	1.04
42055 (L)	Bias	0.06	0.25	-0.02	0.45	0.56	0.42	42055 (L)	Bias	-1.22	0.38	-0.04	-1.02	1.02	0.63
	Corr coeff	0.24	0.28	0.44	0.24	0.37	0.44		Corr coeff	0.86	0.83	0.84	0.88	0.86	0.86
	RMSE	0.55	0.63	0.53	0.80	0.82	0.77		RMSE	1.55	1.50	1.40	1.25	1.49	1.28
	Sym slope	0.95	0.87	0.98	0.79	0.76	0.79		Sym slope	1.18	0.92	0.97	1.17	0.87	0.91

42019 といった可航半円側では、ピーク値がよく再現されている。ただし、42002 地点ではピークに至る9月11日ごろの波高は過小評価となっている。9月11日ごろの風速の時系列を見ると、風速が大きくなっている傾向はなく、波高のみが大きくなっている。うねりの影響ではないかと思われるが、42002 地点より海岸に近い42019 地点においてはそれほど大きなうねりが現れていないので、11日ごろ波高の増加の原因は明らかでない。危険半円にある42040 地点では、有義波高のピーク出現の時刻がずれている。この地点では風速がピークに達する前から有義波高が大きくなっている。周期をみると9月11頃からピーク（約10s）に達してその後一定となっている。これは、うねりに風波が重なったためではないかと思われるが、これについては、詳細には検討していない。

地点42002 および42019 の周期に関して、波高がピークになる前に周期のピークが現われている。地点42040 においても、よく見るとそのような傾向が見られる。一方、追算結果においては、周期のピークはほぼ波高のピークと一致している。こうした差はうねりの影響でないかと考えられる。これを検討するためには、観測点42040 の沖を含めた多数の周辺のブイ・データから波スペクトルの時間・空間変化を調べなければならない。

一般に、波浪推算においては、うねりと風波が混在した場の推算が難しいことがわかっており、ハリケーン・アイクの波浪推算においても、このような

うねりの影響が再現できなかったためではないかと思われる。この様な欠点を修正するための Westhuysen et al. モデル¹⁵⁾を用いても、結果は図-3 から図-5 の (a) 図において実線で示したように改善はされなかった。

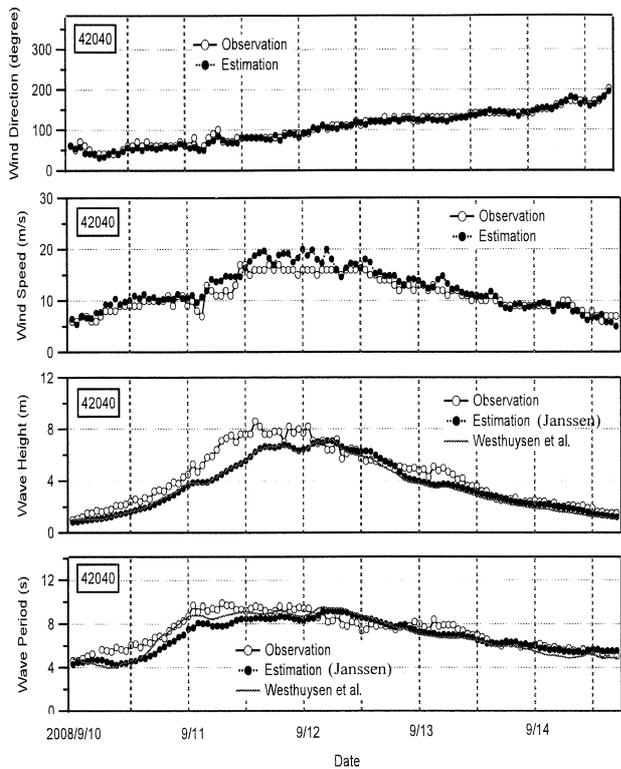
図-3 ~ 図-5 の (b) 図および (c) 図は、それぞれ有義波高と周期に関して、追算値と観測値を比較したものである。時系列も同時に参照して、どの時刻で差が生じているかを判断できる。これらの図から、有義波高に関しては全体的に一致の程度は良いことがわかる。周期に関しては、追算値が観測値に比べて平均的に小さいことがわかるが、加えて、ばらつきが大きいこととが見て取れる。

本研究で比較した9地点について、バイアス、相関係数、2乗平均ルート、勾配の値を表-1 に整理した。それぞれのパラメータは、以下のように表わされる。

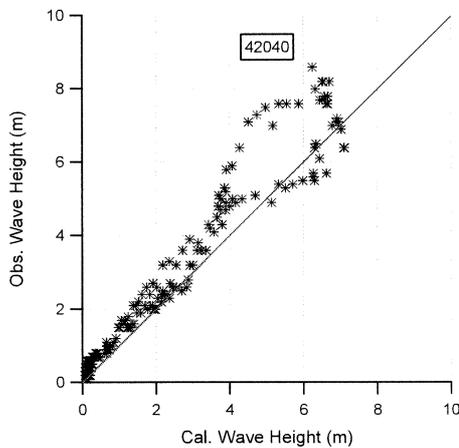
$$bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((P_i - O_i)) \quad (1)$$

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - O_{mean})(P_i - P_{mean})}{\sigma_P \sigma_O} \quad (2)$$

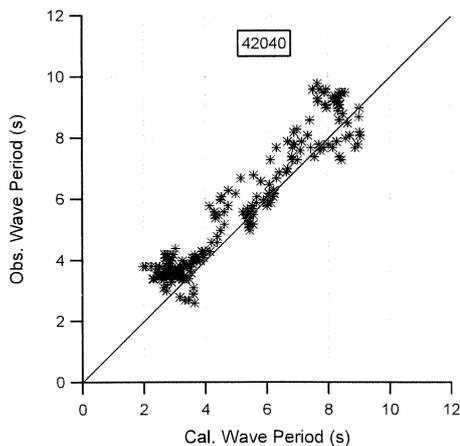
$$RMSE = \frac{\sigma_P \sigma_O}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}} \quad (3)$$



(a) 風向, 風速, 波高および周期の時系列



(b) 波高の推算値と観測値の比較



(c) 周期の推算値と観測値の比較

図-5 観測ブイ 42040 における推算値と観測値の比較

方法を提案した. この修正を行うと, オリジナルの SWAN に比べて, 追算結果は観測結果と整合性が良くなることが示されている.

最近では, van der Westhuysen et al.¹⁵⁾ が白波砕波によるエネルギー散逸項および風からのエネルギー伝達項を検討し, その定式化を行った. 有限 Fetch での風波の発生・発達の場合, SWAN のデフォルトの設定に比べて予測精度が良くなることを示した. 特に, 周期の過小評価やスペクトル形の裾部の再現性を改善することができた. また, 水深の影響が現れる領域での風波に対して, デフォルト設定の結果に比べて, エネルギーは大きく, ピーク周波数を小さく予測するようになり, これは実測結果との対応が良くなる結果となった. 風波とうねりが混在する場においては, うねりを過剰に減衰させ, 風波成分を過大に評価する欠点が改善されたとしている. 非常に浅い水深の湖においては, デフォルト設定の推算結果に比べて, ピーク周期や平均周期を長めに予測する等, デフォルト設定による推算結果に比べて良い結果が得られたと報告されている.

本研究においては, SWAN を用いる際に, ソース項として Komen et al. モデル¹⁰⁾, Lalbeharry et al.¹⁴⁾ の修正による Janssen モデル¹¹⁾ および van der Westhuysen et al. モデル¹⁵⁾ の3種類を用いた.

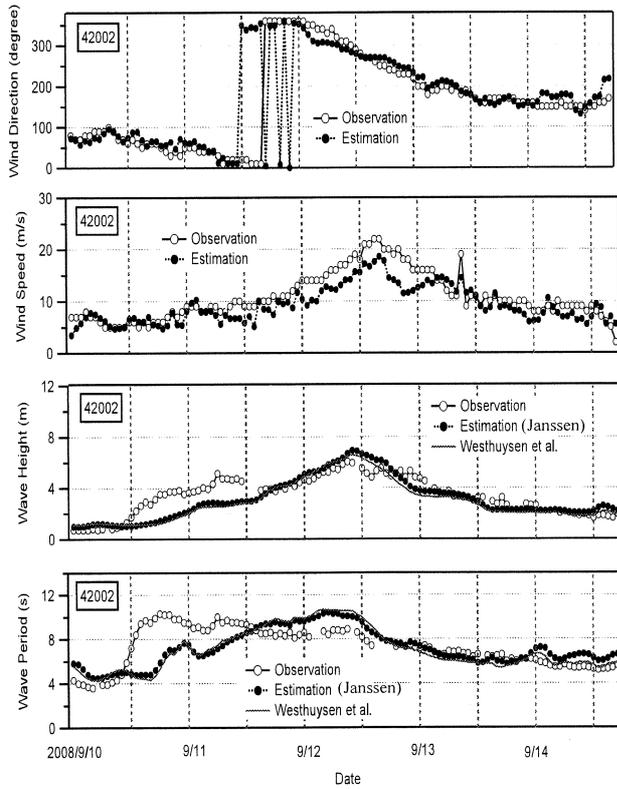
用いた海底地形データは1分間隔である. メキシコ湾は大規模な遠浅地形であるため, 1分の海底地形で十分と思われる. SWAN の計算には1.5分の格子間隔を用い, 計算時間間隔は20分とした.

3. 波浪追算結果と観測値の比較・検討

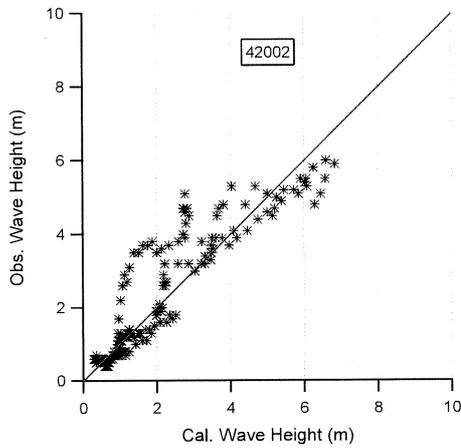
図-3~図-5のそれぞれの(a)図には, 上から風向, 風速, 有義波高, 周期の順に時系列を示した. 追算は9月6日0:00から14日18:00まで行ったが, 初めの部分は図に示していない. 波高および周期に関して, 図中の●印が Lalbeharry et al.¹⁴⁾ の修正を行った Janssen モデル¹¹⁾ を用いた追算値, 風向と風速については解析値, ○印が観測値である. 2008年9月13日7:00 GMT における波浪の平面分布は図-2に示してある. これらの図において, 追算に用いた気象データは RUC である. なお, 波高と周期の時系列の図においては, van der Westhuysen et al. モデル¹⁵⁾ を用いた結果を実線で示してあるが, Janssen モデルの結果とほとんど同じである.

風向に関しては, 3地点において RUC 解析値は観測値とよく一致しているが, 風速については, そのピークの周辺で両者に若干の差が見られる. 風速ピーク時の解析値は観測値より, 地点によって若干大きくなっていたり, 小さくなっていたりして, 系統的な相違は見られない.

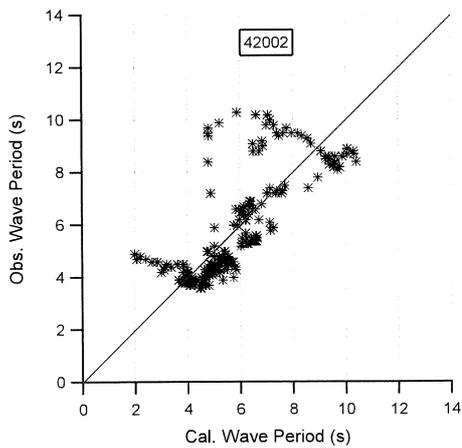
有義波高に関しては, ブイ地点 42002 および



(a) 風向, 風速, 波高および周期の時系列

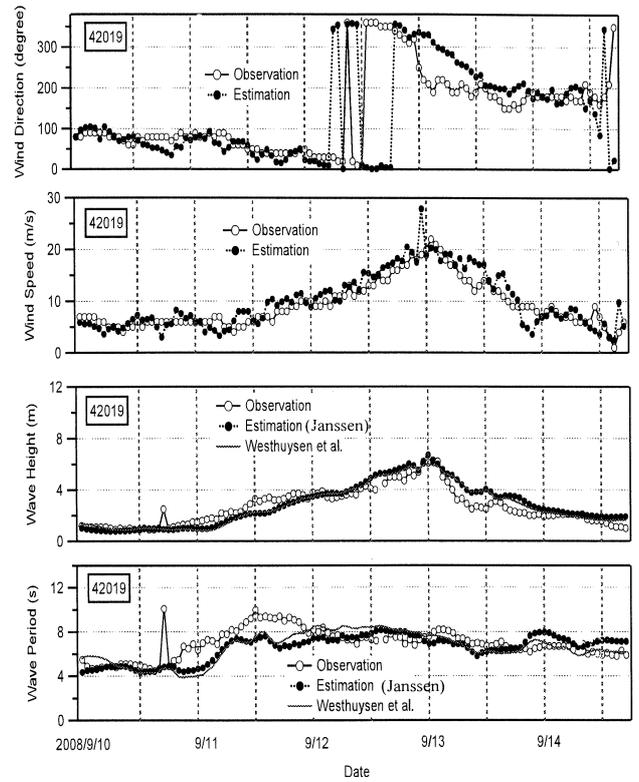


(b) 波高の推算値と観測値の比較

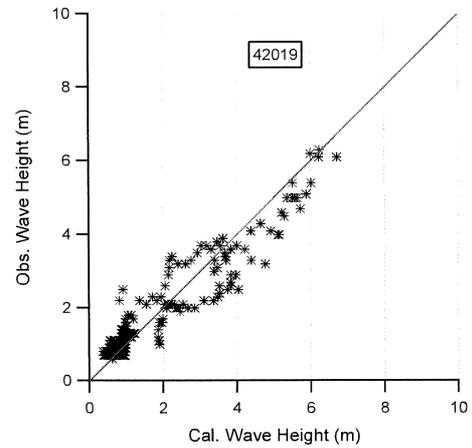


(c) 周期の推算値と観測値の比較

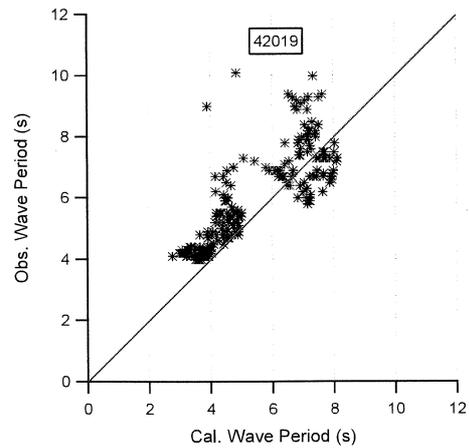
図-3 観測ブイ 42002 における推算値と観測値の比較



(a) 風向, 風速, 波高および周期の時系列



(b) 波高の推算値と観測値の比較



(c) 周期の推算値と観測値の比較

図-4 観測ブイ 42019 における推算値と観測値の比較

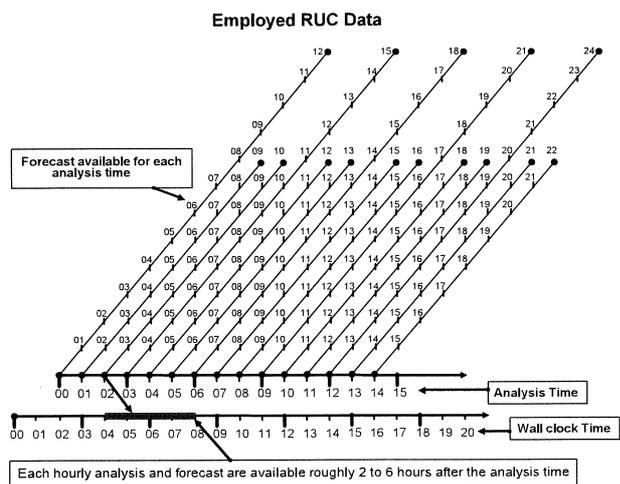


図-1 RUC_252の気象予報サイクル

より作成された初期条件（解析値）を用いた、空間メッシュ 0.5 度の数値予報データである。高波追算には GFS の解析値を用いた。

RUC (Rapid Update Cycle)⁷⁾ は、NOAA/NCEP のオペレーショナル気象予報システムであり、等圧ハイブリッド σ 座標による気象予報モデルおよび初期値の解析・同化システムからなる。米国の航空コミュニティや気象予報コミュニティ等の短期間気象予報を必要とするユーザに情報を提供している。RUC にはいろいろなバージョンがあるが、ここでは RUC_252 を用いた。空間解像度は 20km である。

図-1 は RUC_252 の予報データの時間流れを示したものである。1 時間毎に予報値が提供されるので、台風の情報に GFS に比べて予報精度が良い。本研究では、毎時刻の解析値を用いた。

(3) 用いた観測データ

メキシコ湾には数多くの観測ブイが設置されている (National Data Buoy Center)⁹⁾。本研究では波浪追算結果との比較にあたって、図-2 に示した 9 地点において観測された風向、風速、波高および周期を用いた。なお、この図にはハリケーン・アイクの経路や波浪の平面分布（濃淡図、ベクトル図）も示してある。

(4) 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 et al.¹⁰⁾ の定式化を採用しており、Cycle-4 では Janssen¹¹⁾ による風と波の干渉を考慮した定式化を採用している。SWAN は WAM Cycle-4 の物理モデルを取り入れているが、shift growth parameter が省かれており、また Hersbach and Janssen¹²⁾ のリミッターの代わりに Ris¹³⁾ のそれが使われているといったように、完全には WAM Cycle-4 と整合性が取れてなかったため、Lalbeharry et al.¹⁴⁾ がその修正

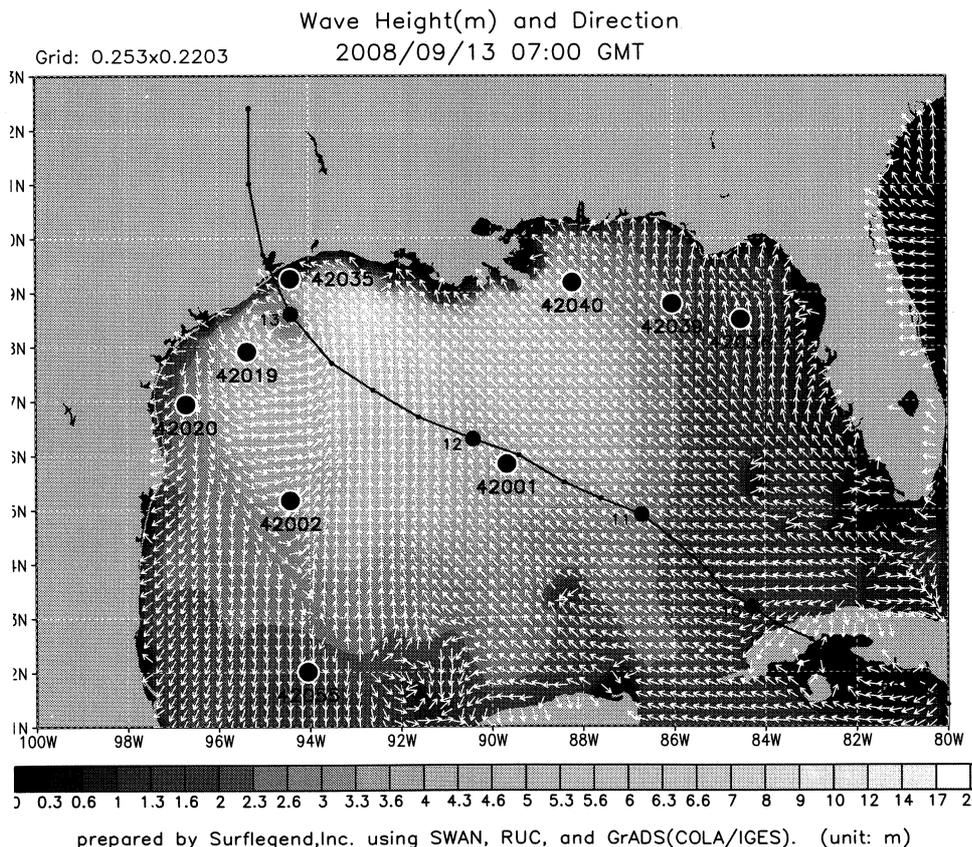


図-2 ハリケーン・アイクの経路と用いた観測ブイの位置図