

Erie 湖における推算波浪資料の相互比較

INTERCOMPARISON OF WAVE DATA HINDCAST IN LAKE ERIE

山口正隆¹・畑田佳男²・大福 学³・野中浩一⁴

Masataka YAMAGUCHI, Yoshio HATADA, Manabu OHFUKU and Hirokazu NONAKA

¹正会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

²正会員 博(工学) 愛媛大学講師 工学部環境建設工学科

³愛媛大学技術専門職員 工学部環境建設工学科

⁴正会員 博(工学) 愛媛大学契約職員 工学部環境建設工学科

Wind and wave characteristics in Lake Erie, the Great Lakes are investigated based on the analysis of measurement data at 3 buoy stations over one month from October 22 to November 22, 2000. Relation between dimensionless wave height and wave period data is approximated by Toba's 3/2 power law with a slightly smaller coefficient. Wave hindcast using BRTM(Backward Ray Tracing Model) is conducted under the same bathymetry and wind input conditions as those used by Lalbeharry et al. Intercomparison among BRTM-based wave data, WAM-based wave height data and measurement wave data shows that BRTM yields as close an agreement with measurement data as does WAM and that error statistics may suggest a slightly higher estimating ability of BRTM over WAM.

Key Words : Lake Erie , wave hindcast , backward ray tracing model , WAM , Toba's 3/2 power law

1. 緒言

アメリカ合衆国とカナダの間に位置する5大湖の1つであるErie湖は、波浪推算モデルの検証という観点からみれば、閉鎖水域であるので、対岸距離が明確に定義できるうえに、風域外から伝播するうねりもほとんど存在しない、周囲が平坦であるため、湖上風に及ぼす陸地地形の影響が少ないので、高い精度の湖上風の推定が比較的容易である、という特徴をもち、しかもブイによる風・波浪観測資料がインターネット上で公開されている。したがって、Erie湖は外洋を主な対象として開発されてきた波浪推算モデルの精度をより明確にするために適した水域と言える。また、Erie湖の水平スケールは準閉鎖海域である日本海より小さく瀬戸内海より大きいので、種々のスケールをもつ水域で波浪推算モデルの精度を検証するという観点からも、Erie湖は適している。

そこで本研究では、Erie湖に設置された3基のブイによる2000年10月から11月に至る1ヶ月間の観測風・波浪資料の解析に基づいて風・波浪の特性を調べるとともに、同期間を対象として、Lalbeharryほか¹⁾と同じ水深格子網および推算風条件のもとで第1世代の1点浅海モデル²⁾による波浪推算を3ブイ地点で行い、観測資料および第3世代のWAM³⁾による推算資料¹⁾との相互比較⁴⁾に基づいて、各モデルの精度および推算結果の特性を検討する。

2. Erie湖における観測風・波浪資料の検討

(1) 風・波浪観測の状況

図-1は五大湖の位置、およびLalbeharryほか¹⁾によってErie湖に設けられた格子間隔0.05°の格子網と等深線、風・波浪観測用の3基のブイの位置を表す。Erie湖の水深は全般的に小さく、最深部でも58mにすぎない。また、ブイの設置水深はブイ45005で14.6m、ブイ45132で22.0m、ブイ45142で27.0mであり、風速計の高度はいずれも海面上5mとなっている。

図-2は各ブイにおける方向別対岸距離を示す。Erie湖が横長な湖域をもつことから、対岸距離は20kmから300kmまで変化する。しかし、100kmを越える方向の範囲はせいぜい45°とかなり狭い。このため、吹送距離は風向に依存して大きく異なる。

(2) 観測風・波浪資料とその特性

各ブイにおける観測風・波浪資料は、インターネット上で公開されているデータセットから採録した。観測資料の種類は1時間ごとの風速、風向、波高および周期、また期間は2000年10月22日~11月22日の約1ヶ月である。ブイ45005では平均周期を1.2倍、ブイ45132とブイ45142ではピーク周期を0.91倍することにより、有義波周期に変換する。

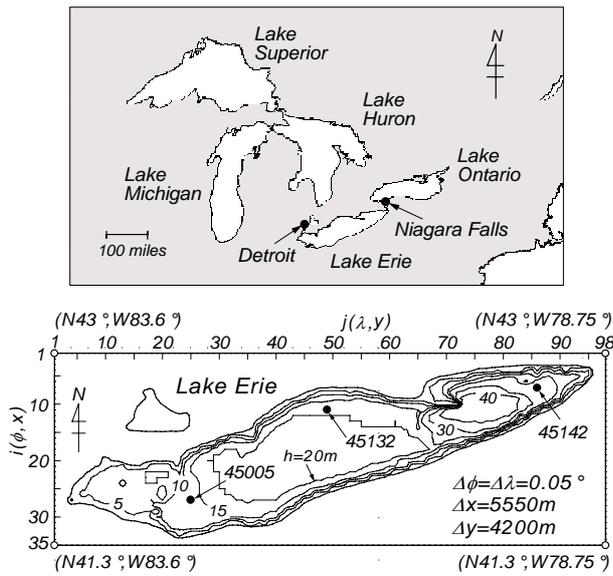


図-1 五大湖の位置，Erie湖の格子網およびブイの位置

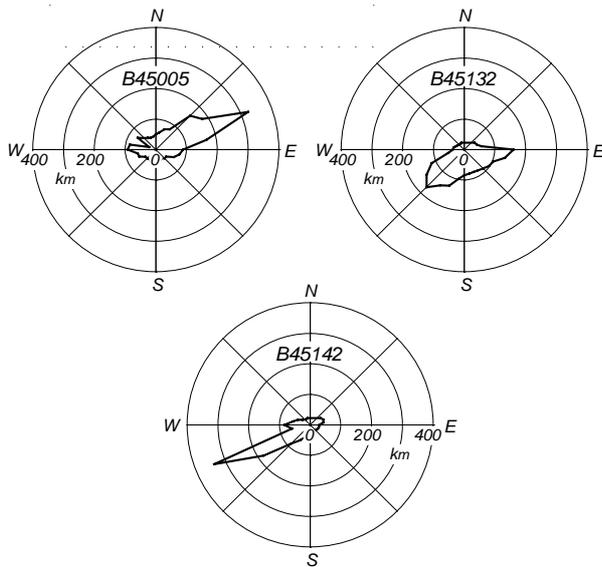


図-2 方向別対岸距離

以上のように，Erie湖における5m高度風速，波高，周期の観測資料が得られており，しかも波浪は風波と考えられるので，これらの資料とToba⁵⁾の3/2乗則

$$\tilde{H}_s = 0.062\tilde{T}_s^{3/2} \quad (1)$$

の関係を検討する．ここに， $\tilde{H}_s = gH_s/u_*^2$ ， $\tilde{T}_s = gT_s/u_*$ ， H_s は(有義)波高， T_s は(有義波)周期， g は重力加速度， u_* は $C_D^{1/2}U_{10}$ で表される摩擦速度， C_D は水面の抵抗係数， U_{10} は10m高度風速である．水面の抵抗係数 C_D はMitsuyasu・Kusaba⁶⁾の経験式において8m/s以下の場合を定数とした次式

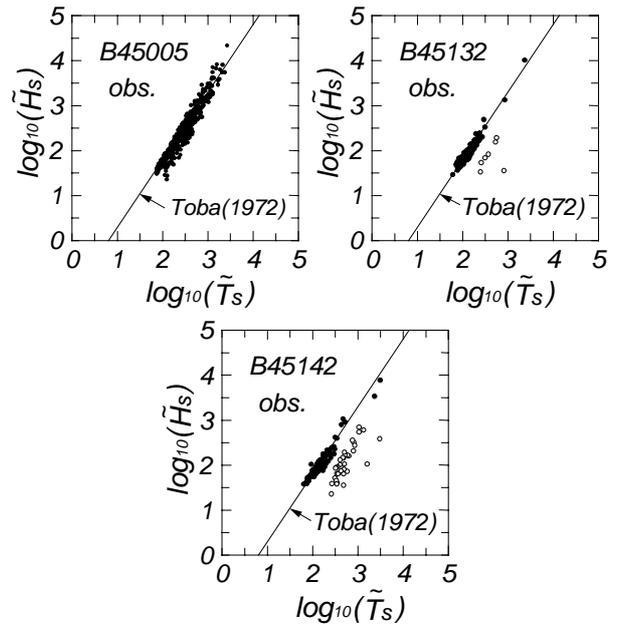


図-3 無次元波高と無次元周期の関係(観測資料)

$$C_D = \begin{cases} 1.085 \times 10^{-3} & ; U_{10} < 8 \text{ m/s} \\ (0.581 + 0.063U_{10}) \times 10^{-3} & ; U_{10} \geq 8 \text{ m/s} \end{cases} \quad (2)$$

により表されるものとする．

図-3は観測資料に基づく無次元波高と無次元周期の関係およびTobaの3/2乗則を示す．観測資料に基づく結果はブイ45005では，3/2乗則とほぼ一致するが，ブイ45132，ブイ45142の順に3/2乗則より外れる資料が増えている．外れた資料は減衰期の波浪に相当する．Erie湖では高波高の発生をもたらす西風時に，ブイ45005からブイ45142に向けて対岸距離が増大するため，吹送距離が短いブイ45005では風波が卓越するのに対し，吹送距離が長いブイ45132やブイ45142ではうねり性波浪(印)の影響が多少現われると推測される．いずれにしても，Erie湖における観測資料に基づく無次元波高と無次元周期の関係は，多少小さい係数(0.055~0.059)をもつものの，Tobaの3/2乗則によって近似されるので，観測資料の大部分は風波によって占められていると言える．

3. 推算風・波浪資料の精度の検討

(1) 推算風・波浪資料および波浪推算条件

推算風資料は，カナダ気象センター(CMC)による地形解像度24kmの3時間間隔10m高度風資料を，WAM用の0.05°間隔格子網に補間して作成されている．期間は2000年10月22日から11月22日の約1ヶ月である．

同様に，WAM(浅海波・深海波)による推算波浪資料は推算風資料と同じ期間の3ブイ地点における3時間

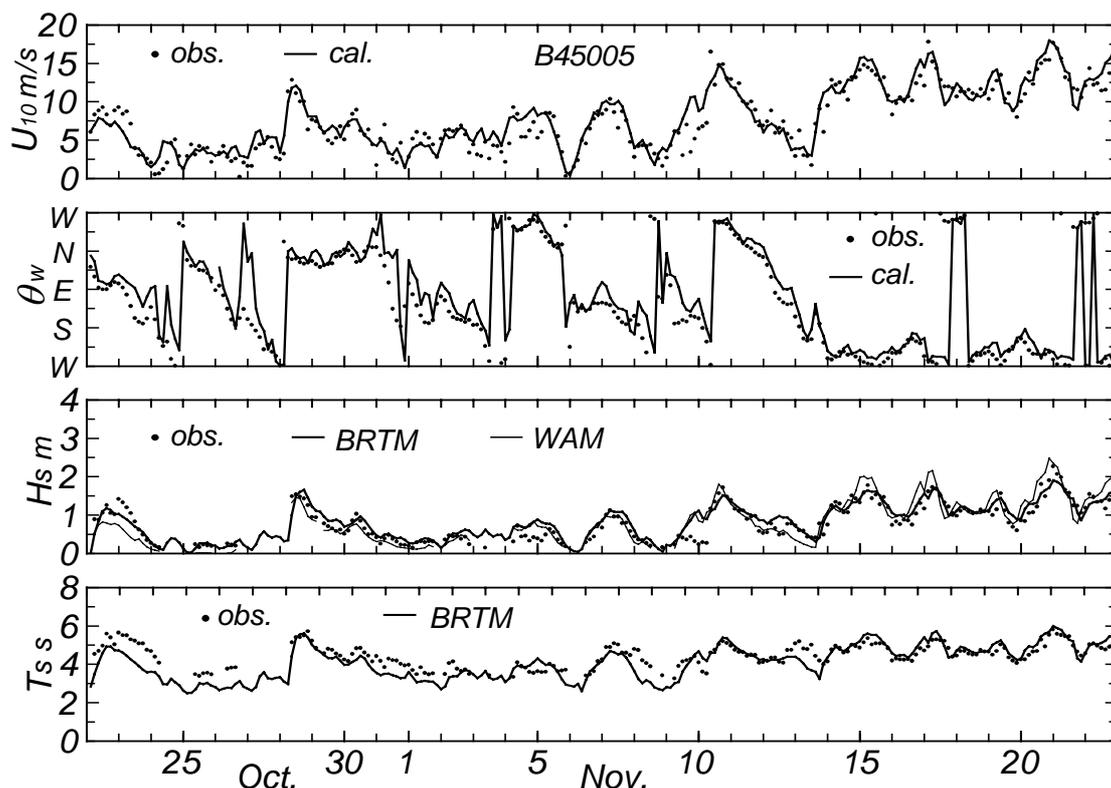


図-4 推算資料と観測資料による風速，風向および波高，周期の時系列

間隔の有義波高資料である．ここでは，観測資料とのより高い相関を与える浅海モデルとしてのWAMによる結果を用いる．WAMによる計算条件¹⁾として，対象領域は北緯41.30°～43.00°，西経83.60°～78.75°の範囲，格子座標系は球面座標，格子間隔は緯度・経度方向に

= 0.05°，周波数データは0.05～0.4925Hz間の

25個，方向データは24個(15°間隔)，格子数は東西方向98，南北方向35，計算時間間隔は4分とされている．

一方，直交座標系で構築された1点浅海モデル²⁾による波浪推算では，直交格子網の格子間隔は0.05°間隔の球面座標格子網における北-南方向をx軸としてx=5550m，西-東方向をy軸としてy=4200mとする．座標原点は北西端にとる．周波数データは0.073～0.959Hzの28個，方向データは0～360°を10°ごとに分割した37個，計算時間間隔は30分である．入力条件とする推算風資料は3時間間隔の資料を30分ごとに線形補間して用いる．Erie湖の周囲はほぼすべて陸地であるので，境界条件として陸上部で方向スペクトルの値0を与える．波浪推算の対象地点は上述の3ブイ地点である．

(2) 推算風・波浪資料の特性

図-4は3時間間隔の推算資料と観測資料による風速 U_{10} ，風向 θ_w および波高 H_s ，周期 T_s の時系列を3ブイ地点のうち水深が最も小さいブイ45005について示す．5m高度の観測風速は，式(2)により10m高度風速 U_{10}

に変換している．また，推算波高資料はWAMおよび1点浅海モデルに推算周期資料は1点浅海モデルによる．1点浅海モデルはBRTM(Backward Ray Tracing Model)と標記されている．まず風については，推算風向は観測風向より反時計回りにやや偏るが，推算風速・風向は，細かい変動を除いて，観測結果とかなりよく一致する．波浪については，Erie湖では湖の外から伝播するうねりが存在しないため，いずれの推算波高も風の変化にตอบสนองして増減を繰り返す観測波高に追従する時間変化をとり，両者はよく符合する．また，1点浅海モデルによる推算周期の経時変化も観測周期のそれとよく対応する．要するに，高い精度の推算風時系列資料に対応して，WAMは波高時系列を，1点浅海モデルは波高および周期時系列をかなり適切に再現する．これは他のブイ地点についても言える⁴⁾．

図-5は3ブイ地点における3時間ごとの推算資料と観測資料による風速および風向の相関をそれぞれ表したものである．個々の資料は若干のばらつきを伴い，また，ブイ45005で推算風向が観測風向に比べて反時計回りにやや偏る点を除けば，いずれのブイ地点でも多くの資料が完全相関を表す45°直線のまわりに分布することから，推算風資料の精度はかなり高いことがわかる．

表-1は推算資料および観測資料より求めた平均風速 \bar{U}_{10} と風速標準偏差 U よりなる風速統計量の一覧を示す．添字‘cal’と‘obs’はそれぞれ推算値および観測

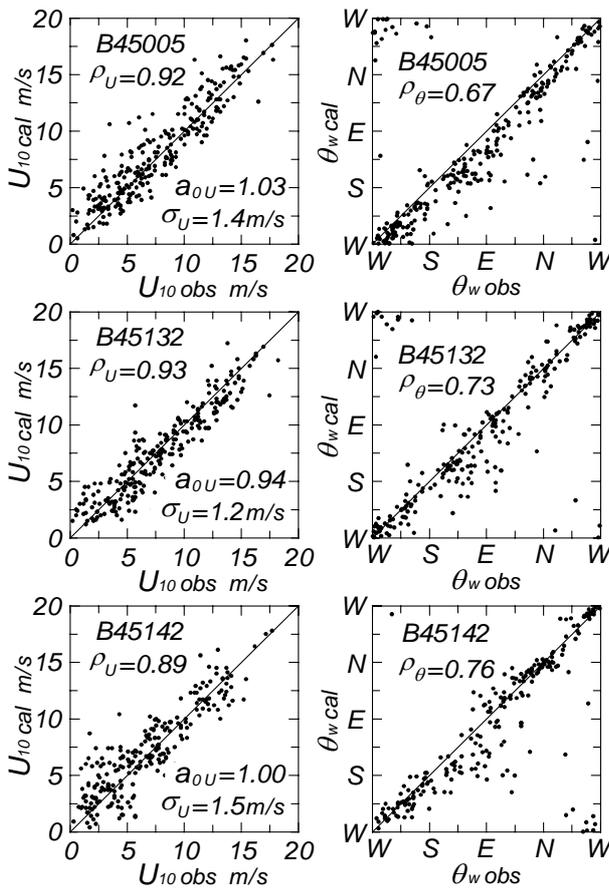


図-5 風速・風向に関する相関

表-1 風速統計量の比較

buoy	$\bar{U}_{10 \text{ obs}}$ m/s	$\bar{U}_{10 \text{ cal}}$ m/s	$U_{\sigma \text{ obs}}$ m/s	$U_{\sigma \text{ cal}}$ m/s
45005	7.6	8.0	4.1	4.1
45132	8.0	7.7	4.1	3.9
45142	6.8	7.2	4.0	3.8

値を表す。風速統計量 \bar{U}_{10} , U_{σ} は相互によく符合する。しかも図-5 の中に示すように、風速誤差統計量のうち、風速資料に対する相関係数 ρ_U は 0.89 ~ 0.93 といずれも高い値を与え、原点を通る回帰直線の勾配値 a_{0U} は 0.94 ~ 1.03 と 1 に近い値をとり、2 乗平均風速誤差 σ_U も 1.2 ~ 1.5m/s とかなり小さいことから、推算風速資料の精度は非常に高いと言える。また、風向資料に対する相関係数 ρ_θ も、いくつかの資料が著しく異なるため風速資料の場合に比べて相関が低くなっていることを考慮しても、かなり大きい。これらのことは、ブイ地点における観測風資料が推算風資料の作成に際してデータ同化されている可能性を示唆するのかもしれない。

図-6 は 10m/s 以上の風向別強風出現率の比較を示す。推算風向と観測風向は非常によく一致し、Erie 湖では対象期間中に W ~ SW の強風が卓越する。しかしブイ 45005

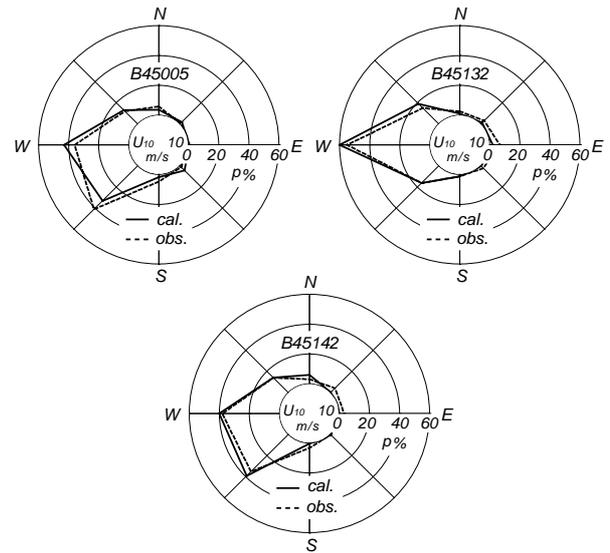


図-6 風向別強風出現率

では、推算風向は観測風向と比べてやや西寄りをとる挙動が見出される。

つぎに、図-7 は WAM および 1 点浅海モデルによる 3 時間間隔の推算波高資料と観測波高資料の相関を示す。WAM による波高はいずれのブイ地点でも観測波高と平均的によく符合するけれども、Erie 湖西側に位置する水深 14.6m のブイ 45005 で低波高部に対して低めの値を、高波高部に対して高めの値を、また、東側に位置する水深 27m のブイ 45142 で高波高部に対して低めの値を与える。1 点浅海モデルによる波高も WAM による結果と同程度あるいはそれ以上に、観測波高とよく符合するが、ブイ 45005 およびブイ 45142 で全般的にやや高めの値を、ブイ 45132 で高波高部に対してやや低めの値を与える。

表-2 は WAM および 1 点浅海モデルによる推算波高資料と観測波高資料から得た波高統計量 (平均波高 \bar{H}_s , 波高標準偏差 H_σ) の一覧を示す。表中の太字は WAM と 1 点浅海モデルに基づく結果のうち、より観測資料に近い値をとる波高統計量を表す。WAM による推算波高資料は、平均波高 \bar{H}_s に対して観測結果に近い値を与えるが、波高標準偏差 H_σ に対してはブイ 45132 を除いてやや大きい差を生じる。図-7 の中に示した波高誤差統計量をみれば、相関係数 ρ_H は 0.85 ~ 0.94, 原点を通る回帰直線の勾配値 a_{0H} は 0.89 ~ 1.03, 2 乗平均波高誤差 σ_H は 0.17 ~ 0.22m をとる。これらの数値は、全体的として WAM による波高資料の精度が高いことを表すが、ブイ 45005 では相関係数 ρ_H がやや小さく資料のばらつきが大きいことや、ブイ 45142 では推算波高が観測波高より小さいことも示唆する。

一方、1 点浅海モデルによる推算波高資料は、平均波高 \bar{H}_s に対して 3 ブイ地点ともに観測結果より大きい値

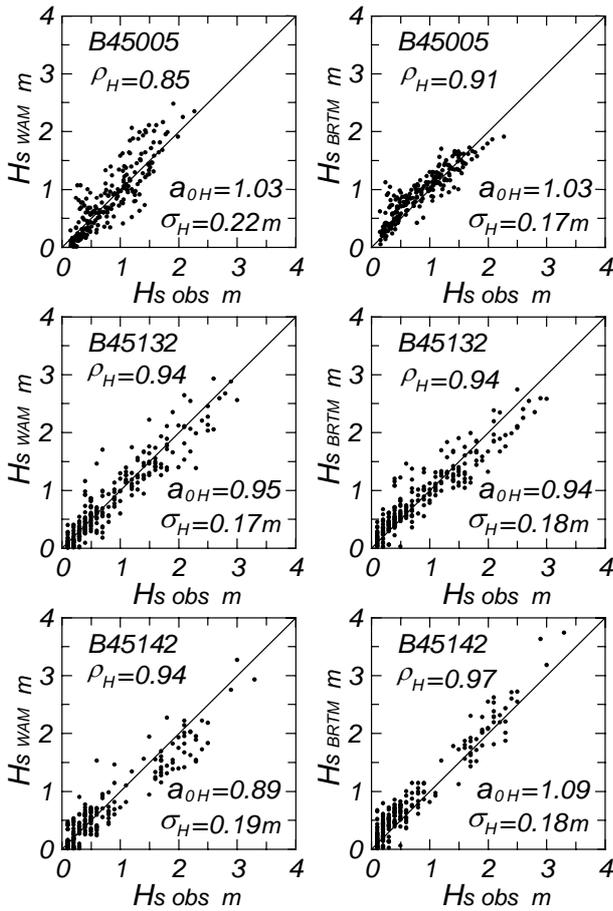


図-7 波高に関する相関

表-2 波高統計量の比較

buoy	\bar{H}_s obs m	\bar{H}_s cal m	H_σ obs m	H_σ cal m
45005	0.84	0.87 0.93	0.48	0.58 0.42
45132	0.85	0.82 0.87	0.69	0.68 0.61
45142	0.72	0.67 0.83	0.74	0.67 0.78

各欄 上段：WAM，下段：BRTM

を与え、ブイ 45142 でやや有意な差を生じるけれども、波高標準偏差 H_σ に対しては 0.04 ~ 0.08m の差を示す程度であり、観測結果に近い値をとる。図-7 の中の波高誤差統計量をみれば、相関係数 ρ_H は 0.91 ~ 0.97、勾配値 a_{0H} は 0.94 ~ 1.09、2 乗平均波高誤差 σ_H は 0.17 ~ 0.18m である。すなわち、推算波高と観測波高の相関はかなり高くばらつきも小さいが、ブイ 45142 における勾配値 a_{0H}

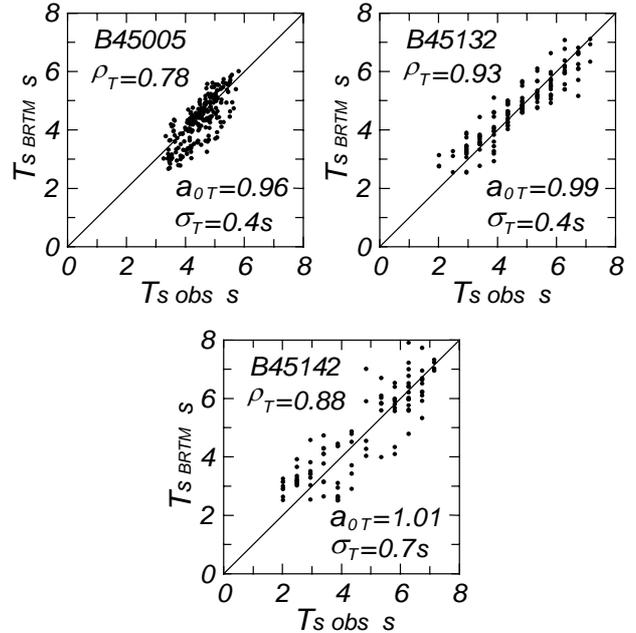


図-8 周期に関する相関

表-3 周期統計量の比較

buoy	\bar{T}_s obs s	\bar{T}_s cal s	T_σ obs s	T_σ cal s
45005	4.5	4.3	0.6	0.8
45132	4.7	4.7	1.3	1.1
45142	4.7	4.4	1.7	1.6

は推算波高が平均的に観測波高よりやや大きいことを表す。

結局 波高に関する両推算資料と観測資料の比較から、WAM は波高統計量のうち平均波高に対して、1 点浅海モデルより観測結果に近い値を与えるが、波高誤差統計量でみれば、1 点浅海モデルが WAM よりやや高い精度をもつと言える。

図-8 は 1 点浅海モデルによる 3 時間間隔の推算周期資料と観測周期資料の相関を、表-3 は周期統計量 (\bar{T}_s, T_σ) の一覧を示す。図中には周期誤差統計量として相関係数 ρ_T 、勾配値 a_{0T} 、2 乗平均周期誤差 σ_T を与えている。これらによると、周期資料の完全相関直線まわりのばらつきが波高の場合に比べて大きいけれども、推算周期と観測周期は比較的良好に対応する。また、ブイ 45005 におけるやや小さい相関係数 ρ_T やブイ 45142 における相対的に大きい 2 乗平均周期誤差 σ_T は両資料間の有意なばらつきを示唆するけれども、全体として 3 ブイ地点における周期統計量および周期誤差統計量は推算周期と観測周期がそれぞれ平均的によく符合することを表す。

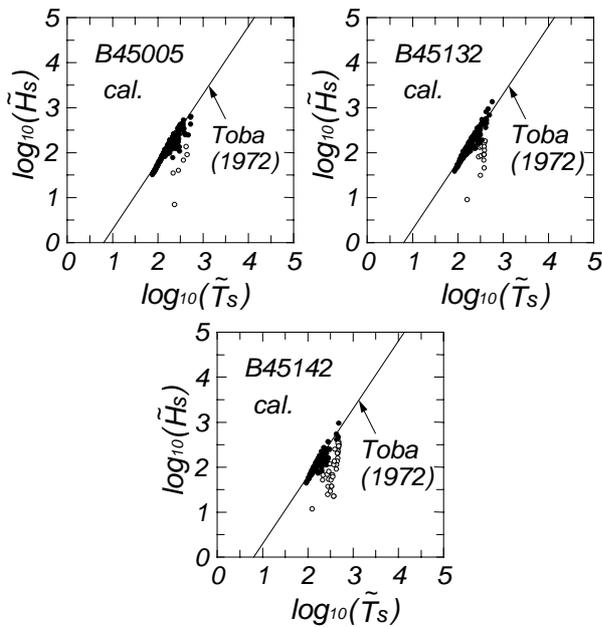


図-9 無次元波高と無次元周期の関係 (推算資料)

図-9 は推算風速資料と 1 点浅海モデルによる推算波高・周期資料を用いて得た無次元波高と無次元周期の関係および Toba⁵⁾ の 3/2 乗則との比較を示す。無次元波高資料と無次元周期資料の関係は、うねり性波浪や推算誤差などに起因して平均的傾向からはずれずる資料 (印) を除けば、対数表示でほぼ直線により近似される。係数は 0.055 ~ 0.058 となり、観測資料より得た値とほぼ一致する。なお、図-3 と比べて、とくにブイ 45005 で無次元波高・周期の値が大きい資料を欠いているのは、微小な波の発達を維持するために波浪推算で最低風速としている 2m/s を下回るケースを削除していることによる。

4. 結語

本研究で得られた結果はつぎのように要約される。

観測風・波浪資料はほぼ Toba の 3/2 乗則を満たすことから、観測波浪はおおむね風波よりなると考えられる。係数は 0.055 ~ 0.059 をとり、Toba による値 0.062 より小さい。

推算風は Erie 湖長軸方向に分布して位置する 3 基のブイによる観測風とよく符合することから、Erie 湖全域の推算風資料の精度もかなり高いとみなされる。したがって、今回の推算風資料は波浪推算における入力条件としてきわめて有用である。

WAM による推算波高は観測波高とよく符合する。因みに、相関係数は 0.85 ~ 0.94、勾配値は 0.89 ~ 1.03、2 乗平均波高誤差は 0.17 ~ 0.22m である。より詳細には、推

算波高は Erie 湖西側のブイ 45005 で低波高部に対して低めの値を、高波高部に対して高めの値を、東側のブイ 45142 で高波高部に対して低めの値を与える。

1 点浅海モデルは、WAM と同様に観測波高を高い精度で再現し、周期についてもややばらつきが増大するものの、平均的に高い精度をもつ。因みに、相関係数、勾配値、2 乗平均誤差は波高に対して 0.91 ~ 0.97, 0.94 ~ 1.09, 0.17 ~ 0.18m, 周期に対して 0.78 ~ 0.93, 0.96 ~ 1.01, 0.4 ~ 0.7s である。また、推算資料は Toba の 3/2 乗則をほぼ満足する。係数は 0.055 ~ 0.058 であり、観測資料に基づく結果とほぼ符合する。

1 点浅海モデルの波高に対する精度は WAM と同等かそれ以上である。より詳細には、1 点浅海モデルは平均波高については WAM に比べて観測結果より大きい値を与えるが、波高誤差統計量は 1 点浅海モデルが WAM よりやや高い精度をもつことを示唆する。この結果は日本の周辺海域や沿岸における観測波浪資料との比較に基づいて得られた知見⁷⁾を支持・補強する。

謝辞：Erie 湖における水深データ、推算風資料、WAM による推算波高資料を提供戴いたカナダ気象サービスの Roop Lalbeharry 氏に謝意を表する。

参考文献

- 1) Lalbeharry, R., Luo, W. and L. Wilson : A shallow water intercomparison on wave models on Lake Erie, *Proc. WAVES2001*, Vol.1, pp.550-559, 2001.
- 2) 山口正隆・畑田佳男・宇都宮好博：一地点を対象とした浅海波浪推算モデルとその適用性，土木学会論文集，第 381 号 / -7, pp.151-160, 1987.
- 3) Günther, H., Hasselmann, S. and P.A.E.M. Janssen : The WAM model cycle 4 (revised version), *Deutsches Klima Rechen Zentrum*, Technical Report No.4, 101p., 1992.
- 4) 山口正隆・畑田佳男・大福 学・野中浩一・高見文人：Erie 湖における推算波浪資料の相互比較，工学ジャーナル (愛媛大学)，第 3 巻，pp.143-154, 2004.
- 5) Toba, Y. : Local balance in the air-sea boundary processes 1. On the growth process of wind waves, *Jour. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol.28, pp.109-121, 1972.
- 6) Mitsuyasu, H. and T. Kusaba : Drag coefficient over water surface under the action of strong wind, *Jour. Natural Disas. Sci.*, Vol.6, No.2, pp.43-50, 1984.
- 7) 山口正隆・畑田佳男・大福 学・野中浩一・平塚敬樹：わが国周辺海域および沿岸における 2 種類の長期波浪資料の精度の比較，海岸工学論文集，第 51 巻，pp.168-170, 2004.

(2005.9.30 受付)