

## 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\*・畑田 佳男\*・大福 学\*  
野中 浩一\*・高見 文人\*\*

Masataka YAMAGUCHI\*, Yoshio HATADA\*, Manabu OHFUKU\*,  
Hirokazu NONAKA\* and Fumihito TAKAMI\*\*

Wind and wave characteristics in Lake Erie, which is one of 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, which means predominance of wind waves during this period in Lake Erie. Wave hindcast using BRTM(Backward Ray Tracing Model) is conducted under the same bathymetry and wind input conditions as Lalbeharry et al.(2000), which were kindly provided by Dr. R. Lalbeharry, Canadian Meteorological Service. Intercomparison among BRTM-based wave data, WAM-based wave height data given by Dr. R. Lalbeharry 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, buoy stations, wave hindcast, backward ray tracing model, WAM, Toba's 3/2 power law

## 1. 緒 言

海洋や沿岸の開発・利用・保全にあたっては、対象海域における波浪の適確な推定が重要な課題であることから、世界各国でスペクトル法に基づく各種の波浪推算モデルが開発され、実用化されている。これらの波浪推算モデルは、風波の発達に支配的な役割を果たすとされる成分波間の非線形相互作用項をどのようにモデルへ取り込むかによって、第1世代、第2世代、第3世代のモデルに分類されている。

山口ら<sup>[1] - [3]</sup>はこれまで第1世代と第2世代に属する各種の波浪推算モデルを開発し、霞ヶ浦、琵琶湖から日本海、北西太平洋に至る種々のスケールをもつ水域における観測波浪資料との比較に基づいて、それらの適用性を検証してきた。なかでも1点法に基づく浅海波浪推算モデル(1点浅海モデル)は、成分波間の非線形相互作用を全く考慮せず、砕波に伴うエネルギー減衰を平衡スペクトルによって評価する経験的色彩の濃い第1世代モデルであるが、高地形解像度格子網のもとでの効率的かつ精度の高い波浪推算を可能にすることが明らかにされている。一方、非線形相互作用項を直接的に

\* 愛媛大学工学部環境建設工学科

\* Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ehime University

\*\* 愛媛大学工学部環境建設工学科卒業生

\*\* Graduate of Civil and Environmental Engineering Course, Faculty of Engineering, Ehime University

原稿受理 平成 15 年 10 月 6 日

近似計算することによって、スペクトルに制約を加えることなしに風波の発達を再現できる第3世代モデルのうち、WAM<sup>[4], [5]</sup>やSWAN<sup>[6]</sup>は、そのソースプログラムが公開されていることから、これらのモデルを用いた各種の研究、とくにモデルの精度の検証を目的とした事例研究が世界各国で活発に行われている。その1例がカナダ気象サービスのLalbeharry et al.<sup>[7]</sup>によって報告されたErie湖における検証事例である。

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、①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、②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、しかもブイによる観測風・波浪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明確にするために適した水域と云える。また、Erie湖の水平スケールは日本周辺海域で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。

幸いにも、今回カナダ気象サービスのDr. Lalbeharryから、Erie湖における波浪推算とその比較検討に必要な水深格子網資料および推算風・波浪資料の提供を受けることができたので、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22日から11月22日に至る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 et al.<sup>[7]</sup>と同じ水深格子網および推算風条件のもとでの1点浅海モデル<sup>[2]</sup>による波浪推算を3ブイ地点で行い、観測波浪資料およびWAMによる推算資料<sup>[7]</sup>との相互比較に基づいて、それぞれのモデルの精度および推算結果の特性を検討する。

なお、畑田ら<sup>[8]</sup>はECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts; ヨーロッパ中規模気象予報センター) より提供を受けた表面風解析値資料を入力条件とした1点浅海モデルによる推算波浪資料と、ECMWFから提供を受けた、ほぼ同じ風資料を入力条件としたWAMによる推算波浪資料と衛星などによる観測波浪資料のデータ同化に基づいて得られた波浪解析値資料 (ECMWF-WAM資料) の相互比較を、日本周辺の複数の波浪観測地点で行っており、1点浅海モデルによる推算資料は外洋波浪に対してECMWF-WAM資料と同程度の精度を、また、沿岸波浪に対して地形解像度が低い条件のもとに求められたECMWF-WAM資料より高い精度をもつことを示している。

## 2. Erie湖における観測風・波浪資料の検討

### 2.1 風・波浪観測の状況

Fig. 1 はアメリカ合衆国とカナダの国境沿いに位置する、いわゆる五大湖の地図を示す。Erie湖はそのうちの1つであり、東西方向約400km、南北方向約100kmの横長な湖域をもつ。面積は約 $2.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ である。Fig. 2 はLalbeharry et al.<sup>[7]</sup>によってErie湖に設けられた格子間隔 $0.05^\circ$ の水深格子網と等深線、および風・波浪観測用ブイの位置を表す。Erie湖の水深は全般的に小さく、北緯 $42^\circ$ 、西経 $80^\circ$ 付近の最深部でも58mにすぎない。周囲を平地に囲まれたErie湖には、淡水がヒューロン湖から北西端にあるデトロイト市付近に流入し、東端からナイアガラの滝を経てオンタリオ湖へ流出するけれども、Erie湖は事実上閉鎖水域とみなされる。

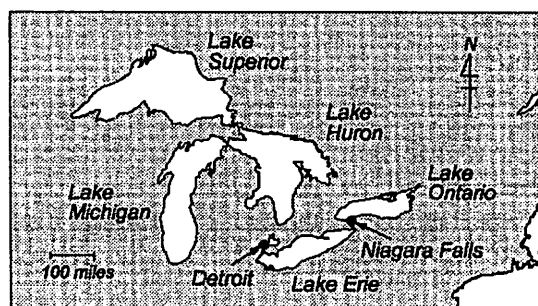
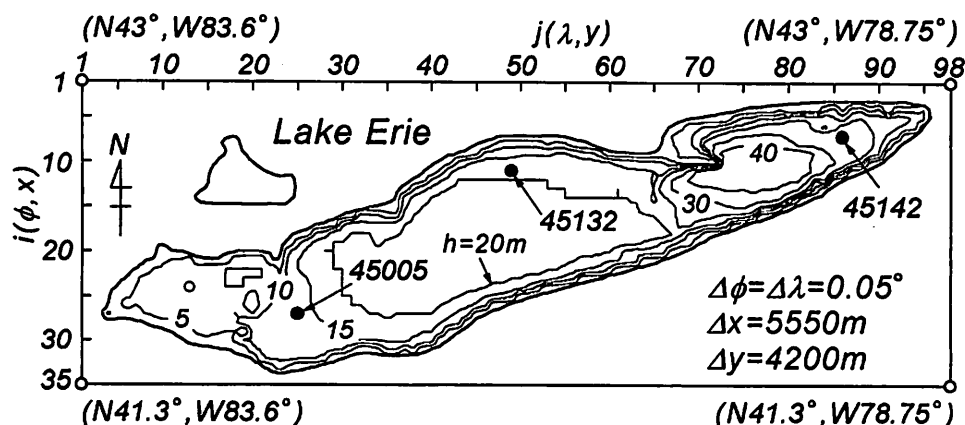


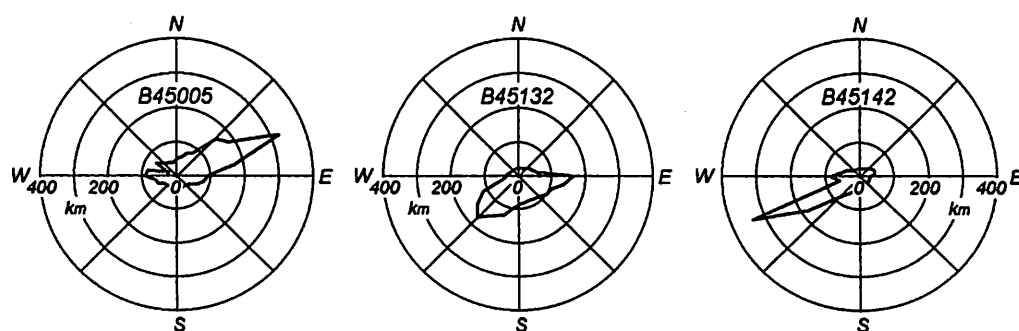
Fig. 1 Sketch of the Great Lakes.

Fig. 2 に位置を示すように、Erie湖には、風・波浪観測用ブイがアメリカ側で1基、カナダ側で2基設置されている。ブイID45005（アメリカ）の位置は北緯41.6975°，西経82.3902°，水深は14.6m，ブイID45132（カナダ）の位置は北緯42.5208°，西経81.1912°，水深は22.0m，ブイID45142（カナダ）の位置は北緯42.7048°，西経79.3381°，水深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。各ブイは順に「N/A」，「Port Stanley」，「Pt. Colborne」と名付けられているが，ここではブイID番号で呼ぶことにする。



**Fig. 2 Grid on Lake Erie and contourlines of water depth.**

Fig. 3 は各ブイ位置における方向別対岸距離を示す。ブイ45005とブイ45142では、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。



**Fig. 3 Direction-separated distance from buoy station to shore.**

## 2.2 観測風・波浪資料およびその特性

観測風・波浪資料は、ブイ45005に対してNational Data Buoy Center (<http://www.ndbc.noaa.gov/>) により、またブイ45132およびブイ45142に対して[http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/meds/Databases/WAVE/WAVE\\_e.htm](http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/meds/Databases/WAVE/WAVE_e.htm)により、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、周期であり、期間はブイ45005とブイ45132で2000年10月22日～11月22日、ブイ45142で2000年10月22日～11月19日のそれぞれ約1ヶ月となっている。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。

以上のように、Erie湖における5 m高度風速、波高、周期の各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Toba<sup>[9]</sup>の3/2乗則の関係を検討する。Tobaは種々の実験・観測データを整理することによって、無次元波高 $\tilde{H}_s(=gH_s/u_*^2)$ と無次元周期 $\tilde{T}_s(=gT_s/u_*)$ の間に、つぎの3/2乗則が成立することを見出している。

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

ここに、 $H_s$ は(有義)波高、 $T_s$ は(有義波)周期、 $g$ は重力加速度、 $u_*$ は $C_b^{1/2}U_{10}$ で表される摩擦速度、 $C_b$ 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 $C_b$ は Mitsuyasu・Kusaba<sup>[10]</sup>の経験式、

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

により表されるものとする。

Fig. 4は1時間間隔の観測資料に基づく結果とTobaの3/2乗則の関係を3基のブイについて示す。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

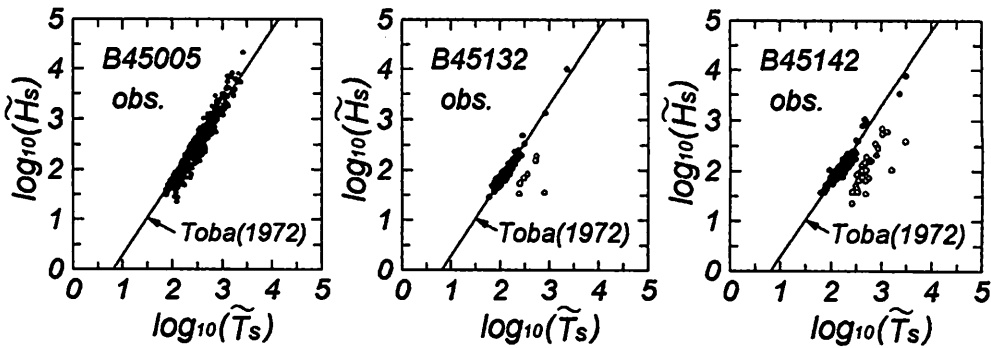


Fig. 4 Relation between dimensionless wave height and wave period based on measured data.

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、吹送距離の長いブイ45132やブイ45142ではうねり性波浪の影響が多少現われると推測される。Table 1は観測資料に基づく結果を、

$$\tilde{H}_s = a \tilde{T}_s^n \quad (3)$$

で近似した場合、およびべき数 $n$ をTobaによる1.5に固定した場合にそれぞれ最小2乗法で求めた係数の一覧を表す。計算にあたっては、データが集中する個所から大きく離れた資料を除外している。ブイの位置が西側から東側に向かうほど、式(3)の係数 $a$ は増加し、 $n$ は減少する。また、 $n$ を1.5に固定した場合の $a$ は0.055~0.059とほぼ一定の値をとり、Tobaによる係数0.062の89~95%となっている。

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、多少小さい係数値をもつものの、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云える。

Table 1 Coefficients of Toba's 3/2 power law based on measured data.

buoy	$h(\text{m})$	$a$	$n$	$a$	$n$
45005	14.6	0.047	1.53	0.055	1.5
45132	22.0	0.078	1.44	0.059	1.5
45142	27.0	0.120	1.35	0.058	1.5

$$\tilde{H}_s = a \tilde{T}_s^n, \text{ Toba(1972)} : \tilde{H}_s = 0.062 \tilde{T}_s^{1.5}$$

### 3. Erie湖における推算風・波浪資料の精度の検討

#### 3.1 推算風・波浪資料および波浪推算条件

カナダ気象サービスのDr. Lalbeharryから提供を受けた推算風資料は、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 $0.05^\circ$ 間隔格子網に補間して作成されている。期間は前述のように、2000年10月22日から11月22日の約1ヶ月である。

同様に、Dr. Lalbharryから提供を受けた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時間間隔有義波高資料である。本研究では、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<sup>[7]</sup>として、対象領域は北緯 $41.30^\circ \sim 43.00^\circ$ 、西経 $83.60^\circ \sim 78.75^\circ$ の範囲、格子座標系は球面座標、格子間隔は緯度方向に $\Delta\phi = 0.05^\circ$ 、経度方向に $\Delta\lambda = 0.05^\circ$ 、周波数データは $f_{i+1}/f_i = 1.1$ 、 $f_1 = 0.05\text{Hz}$ で個数は25個（最大周波数 $f_{25} = 0.4925\text{Hz}$ ）、方向データの個数は24（ $15^\circ$ 間隔）、格子数は東西方向98、南北方向35（水深点は1172点）、計算時間間隔は4分となっている。

一方、1点浅海モデルは直交座標格子網を対象として構築されているので、 $0.05^\circ$ 間隔の球面座標格子網を直交座標格子網に変換する必要がある。まず南北方向の格子間隔 $\Delta x$ は5556.7mとなる。一方、東西方向の格子間隔 $\Delta y$ は地球が回転楕円体であること、また緯度が高くなるほど断面が小さくなることから、地点ごとに異なってくる。すなわち、Erie湖南側境界の北緯 $41.3^\circ$ および北側境界の北緯 $43^\circ$ の緯線に沿う $0.05^\circ$ あたりの長さはそれぞれ4176mおよび4065mになる。波浪推算では、直交格子網は北→南方向をx軸として $\Delta x = 5550\text{m}$ 、西→東方向をy軸として $\Delta y = 4200\text{m}$ とする。座標原点は北西端にある。Erie湖の地形は、地図を参照して、半島や小島がより適切に表現されるように若干変更している。周波数データはLalbharry et al. <sup>[7]</sup>と同様に $f_{i+1}/f_i = 1.1$ 、 $f_1 = 0.05\text{Hz}$ として順次得られる値のうち、 $0.073\text{Hz}$ から $0.959\text{Hz}$ までの28個、方向データとその個数は $0 \sim 360^\circ$ を $10^\circ$ 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直交格子網上に2次元4点補間して得た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。なお、計算で用いた水深格子网上的各ブイ地点に対する水深はブイの実水深より最大3m小さい。

### 3.2 推算風・波浪資料の特性

#### (1) 風・波浪時系列

推算資料と観測資料の比較に先立ち、Fig. 5はErie湖で対象期間中に卓越する西寄りの強風時における風速の等値線および風速・風向のベクトル図を例示したものである。この時点では、風向SWをもつ強風が湖全体で吹送し、北東端に向けて収束する傾向にある。また、風速は湖の中心付近で大きく、地形の影響を受ける湖岸や平地部で小さい。湖上で風速が相対的に大きい特性は東寄りの風の場合にも見出される。

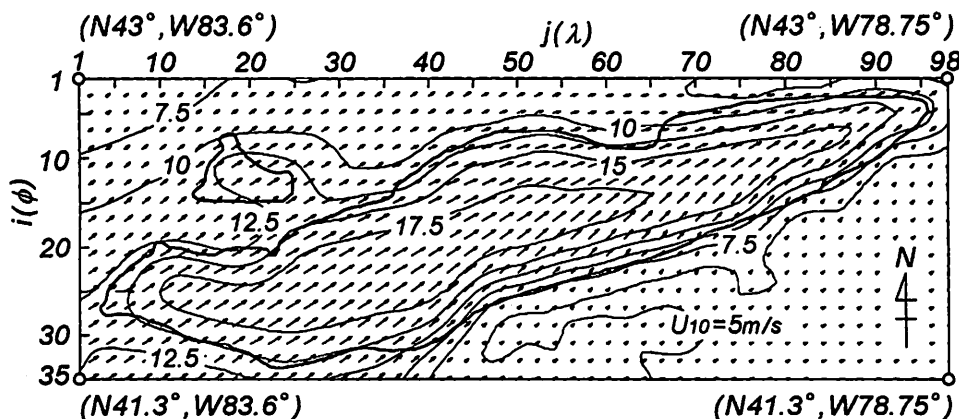


Fig. 5 Example of wind distribution hindcast over Lake Erie.

Fig. 6 (1)および(2)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 $\theta_w$ および波高 $H_s$ 、周期

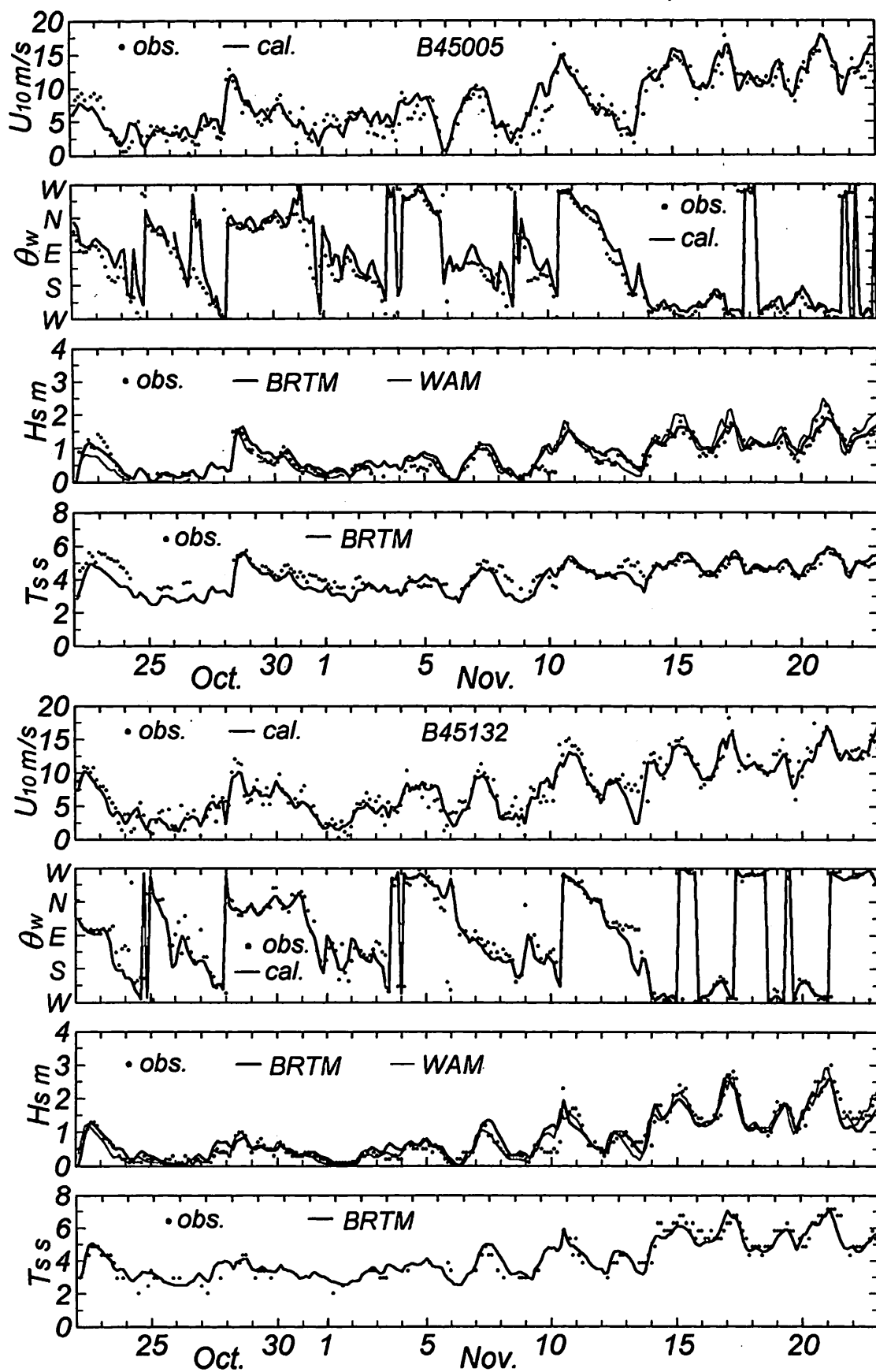


Fig. 6 (1) Comparison between hindcast and measured data for time series of winds and waves.

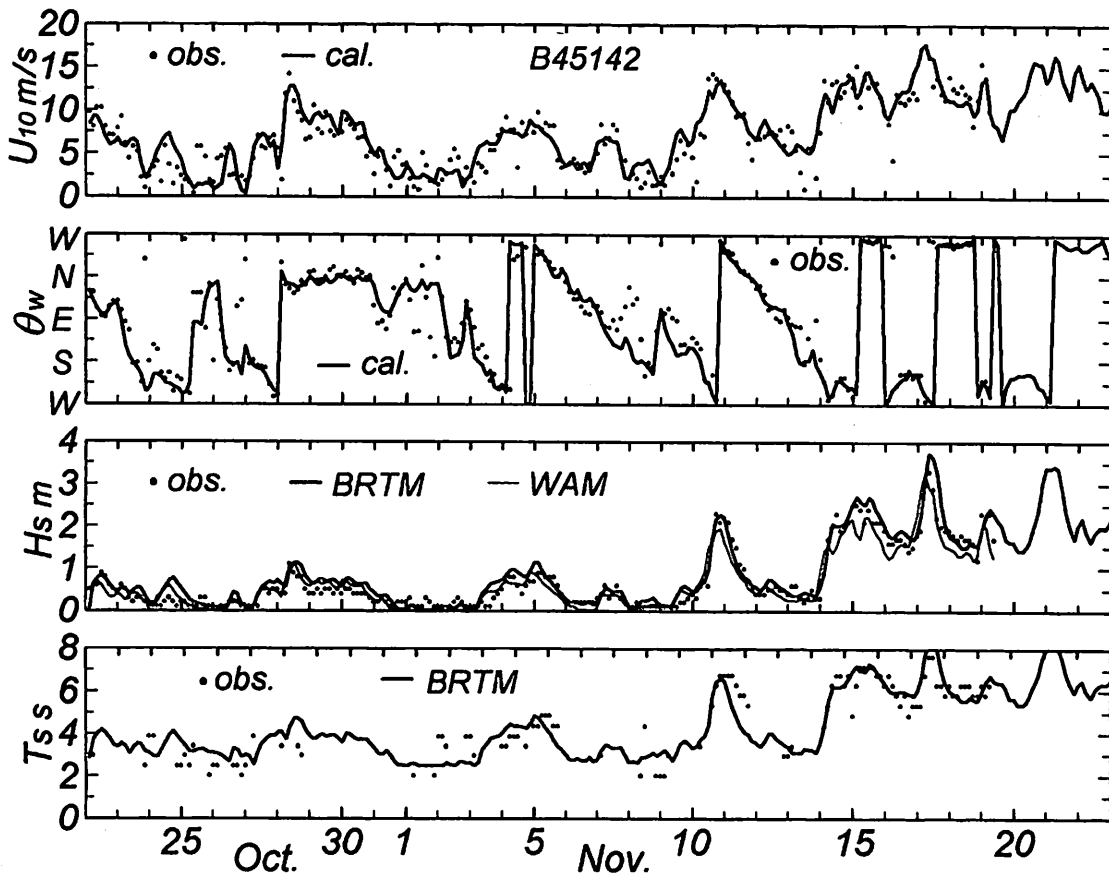


Fig. 6 (2) Comparison between hindcast and measured data for time series of winds and waves.

$T_s$ の時系列を3ブイ地点について示す。5 m高度の観測風速は、式(2)により10 m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、推算風速はブイ45132でピーク時に観測風速よりやや小さい傾向にあり、また推算風向はブイ45005で観測風向より反時計回りにやや偏るが、3ブイ地点ともに推算風速・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。ついで、波高についてみると、いずれの推算波高も、外海から伝播するうねりが存在しないため、風の変化に応答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。

## (2) 風候・波候統計量および誤差統計量

Fig. 7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 $45^\circ$ 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。

Table 2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 $U\sigma$ よりなる風速統計量、および推算資料と観測資料の風速・風向に関する相関係数 $\rho_u$ 、 $\rho_\theta$ 、風速資料の相関図において原点を通る回帰直線の勾配値 $a_{0u}$ および2乗平均風速誤差 $\sigma_u$ よりなる風候誤差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値を表す。風速資料に対する相関係数 $\rho_u$ は0.89~0.93といずれも高い値を与え、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 $\sigma_u$ も1.2~

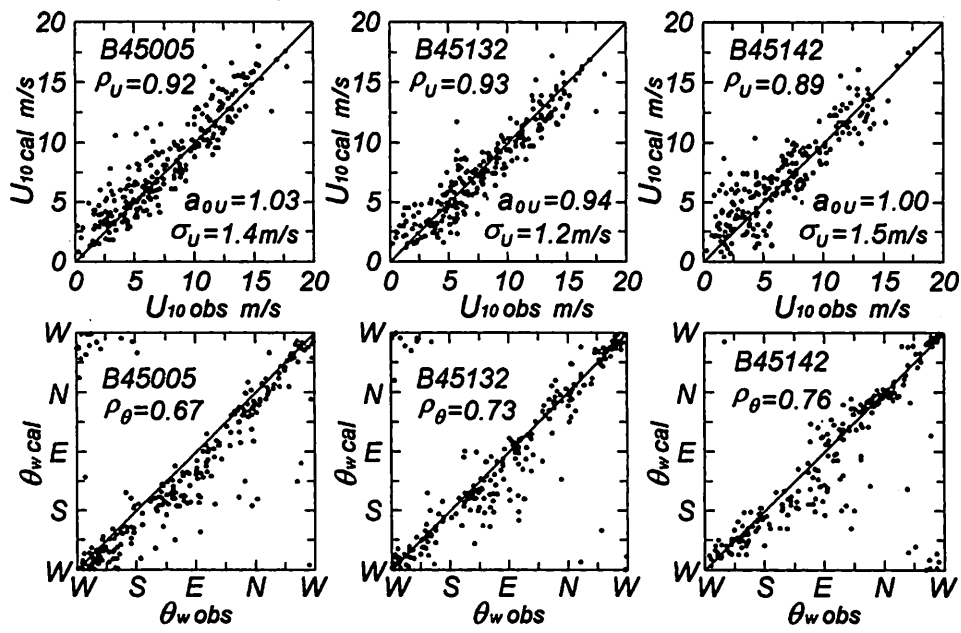


Fig. 7 Comparison between hindcast and measured wind data.

Table 2 Wind speed statistics and error statistics of wind speed and direction.

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	$\rho_U$	$a_{0U}$	$\sigma_U$ m/s	$\rho_\theta$
45005	7.6	8.0	4.1	4.1	0.92	1.03	1.4	0.67
45132	8.0	7.7	4.1	3.9	0.93	0.94	1.2	0.73
45142	6.8	7.2	4.0	3.8	0.89	1.00	1.5	0.76

1.5m/sとかなり小さい。しかも風速統計量 $\bar{U}_{10}$ 、 $U_\sigma$ は相互によく符合することから、推算風速資料の精度は非常に高いと云える。また、風向資料に対する相関係数 $\rho_\theta$ 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。

また、Fig. 8 に示す10m/s以上の風向別強風出現率は、推算風向と観測風向がよく一致し、Erie湖では対象期間中にW～SWの強風が卓越することを表す。しかしブイ45005では、推算風向は観測風向に比べてやや西寄りをとる挙動が見出される。

つぎに、Fig. 9 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

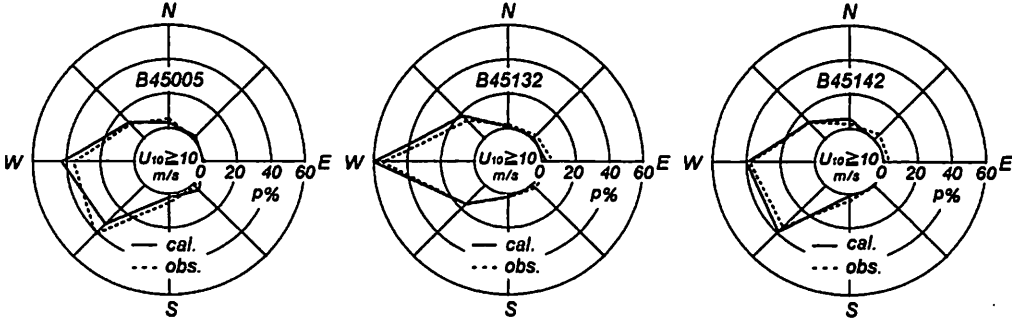


Fig. 8 Direction-separated occurrence rate of strong winds.

関ならびに両推算波高資料の相関を示す。WAMによる推算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



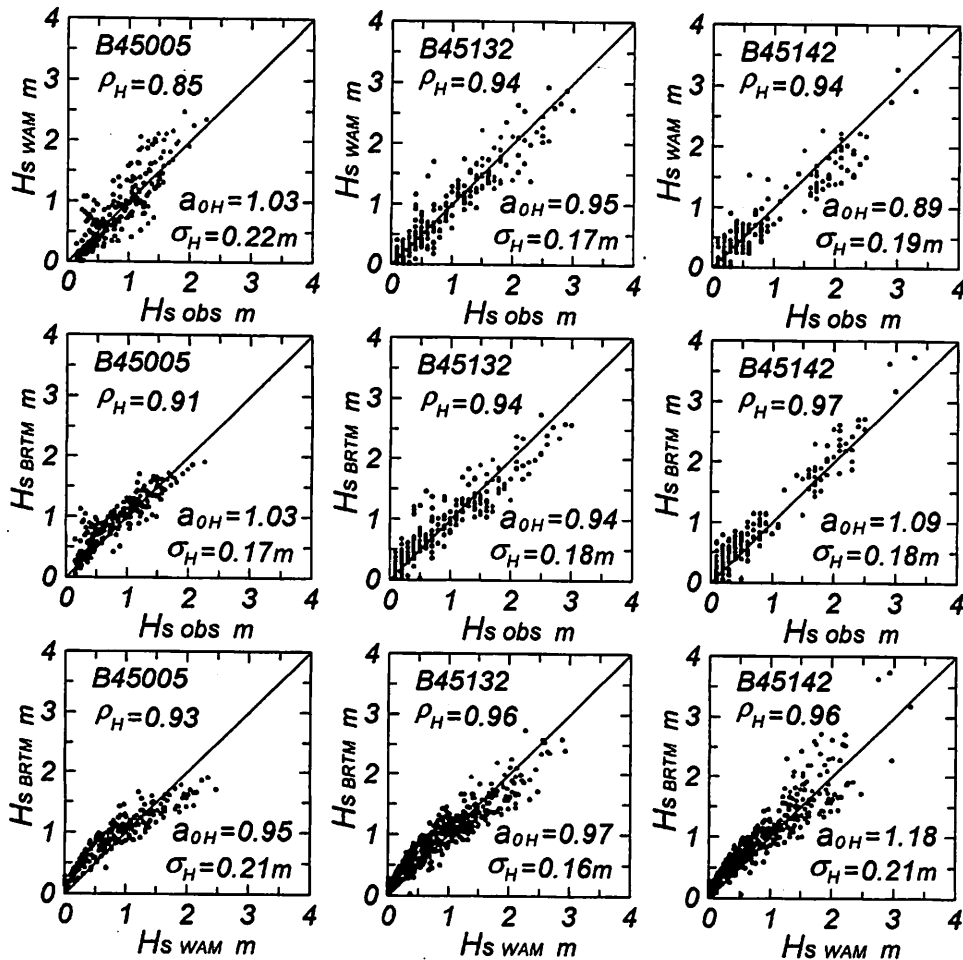


Fig. 9 Comparison between hindcast and measured wave height data and correlation between 2 kinds of hindcast wave height data.

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推算波高も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。さらに、WAMと1点浅海モデルによる推算波高資料は全体的によく合致する。しかし、1点浅海モデルはWAMに比べてブイ45005およびブイ45132では中間の波高部以下で大きく高波高部で小さい値を、ブイ45142では全般的にやや大きい値をとる。

Table 3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 $H_\sigma$ ）および波高誤差統計量（相関係数 $\rho_H$ 、勾配値 $a_{0H}$ 、2乗平均波高誤差 $\sigma_H$ ）の一覧を示す。Table 3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、あるいはより高い精度を意味する波高誤差統計量を表す。さらに、各ブイ地点に対応する欄の第3段は1点浅海モデル（B）およびWAM（W）による推算波高資料間の相関係数、勾配値および2乗平均波高差を示す。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 $H_\sigma$ に対してはブイ45132を除いてやや大きい差を生じる。波高誤差統計量でみれば、相関係数 $\rho_H$ 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 $\sigma_H$ は0.17～0.22mをとる。これらの数値は、全体的に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 $\rho_H$ 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を与え、ブイ45142でやや目立つ差を生じるけれども、波高標準偏差 $H_\sigma$ 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

Table 3 Wave height statistics and error statistics of wave height.

buoy	model	$\bar{H}_s$ obs m	$\bar{H}_s$ cal m	$H_\sigma$ obs m	$H_\sigma$ cal m	$\rho_H$	$a_{0H}$	$\sigma_H$ m
45005	WAM	0.84	0.87	0.48	0.58	0.85	1.03	0.22
	BRTM	0.84	0.93	0.48	0.42	0.91	1.03	0.17
	B-W					0.93	0.95	0.21
45132	WAM	0.85	0.82	0.69	0.68	0.94	0.95	0.17
	BRTM	0.85	0.87	0.69	0.61	0.94	0.94	0.18
	B-W					0.96	0.97	0.16
45142	WAM	0.72	0.67	0.74	0.67	0.94	0.89	0.19
	BRTM	0.72	0.83	0.74	0.78	0.97	1.09	0.18
	B-W					0.96	1.18	0.21

い値をとる。波高誤差統計量でみれば、相関係数  $\rho_H$  は 0.91～0.97、勾配値  $a_{0H}$  は 0.94～1.09、2乗平均波高誤差  $\sigma_H$  は 0.17～0.18m である。すなわち、両者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  $a_{0H}$  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。ついで、両推算波高資料の関係をみると、相関係数  $\rho_H$  は 0.93～0.96、勾配値  $a_{0H}$  は 0.95～1.18、2乗平均波高差  $\sigma_H$  は 0.16～0.21m である。これらの数値は、勾配値  $a_{0H}$  = 1.18 をとるブイ 45142 を除いて、両推算資料の類似性が高いことを示す。結局、両推算波高資料と観測波高資料の比較から、WAM は波高統計量のうち平均波高  $\bar{H}_s$  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云える。

Fig.10 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、Table 4 は周期統計量 ( $\bar{T}_s$ ,  $T_\sigma$ ) および周期誤差統計量 ( $\rho_T$ ,  $a_{0T}$ ,  $\sigma_T$ ) の一覧を示す。周期資料の完全相関直線

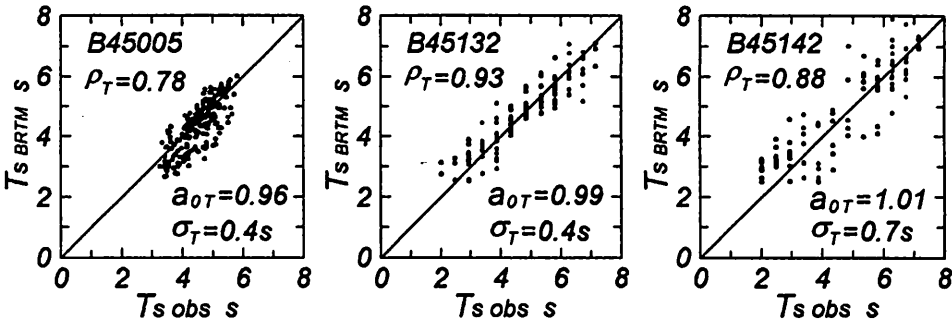


Fig. 10 Comparison between hindcast and measured wave period data.

Table 4 Wave period statistics and error statistics of wave period.

buoy	$\bar{T}_s$ obs s	$\bar{T}_s$ cal s	$T_\sigma$ obs s	$T_\sigma$ cal s	$\rho_T$	$a_{0T}$	$\sigma_T$ s
45005	4.5	4.3	0.6	0.8	0.78	0.96	0.4
45132	4.7	4.7	1.3	1.1	0.93	0.99	0.4
45142	4.7	4.4	1.7	1.6	0.88	1.01	0.7

まわりのばらつきは、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よく対応する。また、ブイ45005におけるやや小さい相関係数 $\rho_T$ やブイ45142における相対的に大きい2乗平均周期誤差 $\sigma_T$ 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。

Fig.11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をToba<sup>[9]</sup>の3/2乗則と比較したものである。各資料の時間間隔は3時間である。また、Table 5は式(3)のべき乗式、および式(3)で $n=1.5$ と固定した式を最小2乗法であてはめた場合

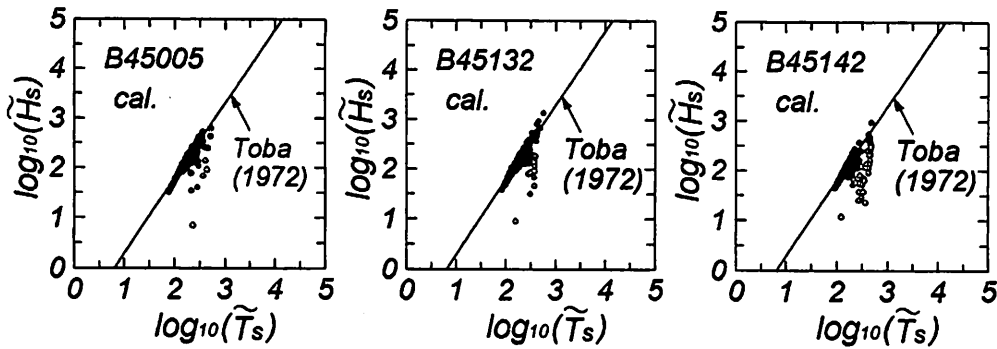


Fig. 11 Relation between dimensionless wave height and wave period based on hindcast data.

の係数の一覧を示す。無次元波高資料と無次元周期資料の関係は、うねり性波浪に起因して平均的傾向からはずれる資料を除けば、対数表示でほぼ直線により近似される。しかし、べき数はいずれのブイでも1.3程度の値をとる。一方、べき数を1.5とすれば、係数 $a$ の値は0.055~0.058となり、Tobaによる0.062と比べて89~94%の大きさをもつ。これは観測資料より得た値とほぼ一致する。なお、Fig. 4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、1点浅海モデルによる波浪推算で用いる最低風速を2 m/sとしているためである。

Table 5 Coefficients of Toba's 3/2 power law based on hindcast data.

buoy	$h(m)$	$a$	$n$	$a$	$n$
45005	14.6	0.079	1.29	0.056	1.5
45132	22.0	0.068	1.21	0.058	1.5
45142	27.0	0.135	1.33	0.055	1.5

$$\tilde{H}_s = a \tilde{T}_s^n, \text{ Toba(1972): } \tilde{H}_s = 0.062 \tilde{T}_s^{1.5}$$

## 4. ま と め

本研究では、5大湖の1つであるErie湖において3基のブイにより取得された観測風・波浪資料の特性を調べるとともに、同一の水深格子網および風条件のもとでの2種類の波浪推算モデル(WAMおよび1点浅海モデル)による推算資料と観測資料の比較に基づいて、各波浪推算モデルの精度を検討した。得られた結果はつぎのように要約される。

①観測風・波浪資料は一部の資料を除き、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ものと考えられる。また、べき数を1.5とする場合の係数は0.055~0.059をとり、Tobaによる値の89~95%になる。

②10m高度推算風資料は3基のブイによる10m高度補正観測風資料とよく符合する。したがって、Erie湖における推算風資料の精度はかなり高いと云える。これは推算風資料が観測風資料のデータ同化に基づいて作成されている可能性を示唆する。波浪推算の精度は用いる風資料の精度に最も強く依存することから、今回の推算風資料は波浪推算モデルの精度を検証するための波浪推算における入力条件として、きわめて有用である。

③WAM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。

④1点浅海モデルは、WAMと同様に観測波高を高い精度で再現するが、ブイ45005やブイ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。周期についてもややばらつきが増大するものの、平均的によい精度をもつ。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。ベキ数を1.5とする場合、係数は0.055~0.058であり、Tobaによる係数の89~94%になる。これらの数値は観測資料に基づく結果とほぼ符合する。

⑤1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。

## 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Dr. Lalbeharryに謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 山口正隆・畑田佳男・細野浩司・日野幹雄：エネルギー平衡方程式に基づく浅海波浪の数値予測モデルについて, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.123-127, 1984.
- 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/II-7, pp.151-160, 1987.
- 3) 山口正隆・畑田佳男・日野幹雄・早川 淳：波の方向性を考慮した新しいハイブリッドパラメータ波浪推算モデルの適用性, 第35回海岸工学講演会論文集, pp.227-231, 1988.
- 4) The WAMDI Group : The WAM model - A third generation ocean wave prediction model, Jour. Phys. Oceanogr., Vol.18, pp.1775-1809, 1988.
- 5) 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.
- 6) Booij, N., Ris, R. and L. H. Holthuijsen : A third-generation wave model for coastal regions, Part1, Model description and validation, Jour. Geophys. Res., Vol.104, No. C4, pp.7649-7666, 1999.
- 7) 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.
- 8) 畑田佳男・山口正隆・大福 学：1点浅海モデルおよびWAMによる長期波浪推算結果の相互比較, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.271-275, 1999.
- 9) 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.
- 10) 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.