衛星海面高度計データを用いたインドネシア領海内の波浪データ収集

正員 作 野 裕 司*
津 島 邦 之***

飯 島 庸 右**
木 戸 地 俊****

Wave data collection using satellite altimeter data in Indonesian domestic sea

by Yuji Sakuno, Member
Kuniyuki Tsushima

Yosuke Iijima
Shun Kidoji

Summary

The wave data collection method and the wave characteristic in Indonesian domestic seas using the satellite altimeter data in this research were discussed. For the estimation of long-term probability distribution of wave height and wave period, $P(H,T)$, the satellite TOPEX/POSEIDON wave height data for five years from 1997 to 2000 and the JWA (Japan Weather Association) wave hind-casting data in 2000 were used. As a result, the characteristics of long-term $P(H,T)$ distributions in the four small sea divisions of Indonesian domestic seas were cleared. It was confirmed that the satellite altimeter data was very effective tool for the wave data collection in the seas.

1. 結 言

インドネシアは多島国家であり、海上交通が重要な交通手段となっている。しかし、同国において船舶の安全性を確保するための法規の制定が遅れているばかりでなく、インドネシア領海内の海象データの整備並びに運航している船舶の実態も把握できていない状態にある。このために、多くの海難事故が発生し多大な人命を失っている¹⁾。

このような背景から、インドネシアにおける海難事故防止の目的の一つとして、「インドネシア領海内における波浪データの収集」は非常に重要な研究テーマとなっている。実際、同国領海内における海象データは極めて少ないが、同国の現状から考えると巨額な費用と観測技術が必要な海象データのインフラ整備及び継続的な波浪データ取得のための蓄積体勢作りは非常に難しい。

一方、近年では衛星海面高度計を使って、世界各地の波高分布を観測する態勢²⁾³⁾は整ってきた。海面高度計による波高データの空間分解能は 10~100km 程度、観測精度は 0.5m

程度であり、1985 年に打ち上げられた GEOSAT データ⁴⁾から現在（例えば Jason1/ALT）までの波高データは、NASA 等からインターネットを通じて準リアルタイムで無料配布されている。このような衛星波高データは波浪の観測設備が不十分であるインドネシア領海内における長期の波浪統計情報を得る手段として、大変貴重であると考えられる。

以上のような背景から、本研究ではインドネシア領海内において船舶の安全航行や船舶設計等に役立たせる目的で、衛星マイクロ波高度計から得られる波高データを使って「インドネシア領海内の波高・波周期の同時確率分布推定」の研究を行った。この研究では特に衛星海面高度計から得られる波高データの推定精度を検証するとともに、衛星データからは得られない波周期の情報を波浪推算データから導き、最終的には現在船舶の設計等で多く用いられている世界規模の海象データベース、GWS (Global Wave Statistic)⁵⁾で得ることができないインドネシア領海内の「波高・波周期の同時確率分布」の推定を試みた。

2. 方法

2.1 インドネシア海域の概要

インドネシアは東西 5100km、南北 1900km に及ぶ赤道直下

* 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻

** トヨタテクニカルディベロップメント株式会社

*** いすゞ自動車株式会社

**** 株式会社ニッソーサービス

の群島国家である。同国は Fig. 1 に示すように約 13000 個もの島から成り、北は南シナ海、セレベス海、太平洋に、南及び西はインド洋にそれぞれ面している。周辺海域の水深はジャワ島の北部は約 100m～300m と浅く、ジャワ島東部のフロレス島とボルネオ島の東部スラウェシ島との間のフロレス海は水深約 200m～2000m、さらにジャワ島南部のインド洋は水深 3000m 以上と非常に深い。また、西からマレー半島とスマトラ島の間に位置する「マラッカ海峡」、ボルネオ島-スラウェシ島間の「マカッサル海峡」、バリ島とロンボク島間の「ロンボク海峡」は大型船の航路にあつて、かつ最も海難事故の多い水域である。

Fig.1 Study area

2.2 小海域の設定法

本研究で対象となる水域は Fig. 2 に示す地図のうち、南緯 10 度～北緯 10 度、東経 100 度～東経 130 度で囲まれる範囲である。このうち、周辺海域はすでに GWS の小海域 (61, 62, 63, 70, 71, 77, 78, 79 の各番) に区分され、「波高・波周期の同時確率分布データ」が存在する。そこで本研究では、「重要な航路であり、かつ GWS の波浪データが存在しない」Fig.2 中の I (セレベス海：赤道～北緯 10 度、東経 115 度～東経 130 度)、II (ジャワ海：南緯 7.5 度～赤道、東経 105 度～東経 115 度)、III (フロレス海：南緯 7.5 度～赤道、東経 115 度～東経 130 度)、IV (インド洋：南緯 10 度～南緯 7.5 度、東経 100 度～東経 115 度) の小海域における「波高・波周期の同時確率分布推定」を試みた。

Fig.2 Subdivision area (I, II, III, IV) for our study in Indonesian domestic sea. Other numbers (61, 62, 63, 70, 71, 77, 78, 79) area shows subdivisions of GWS⁵⁾

2.3 波高・波周期の同時確率分布推定法

世界規模の波浪統計資料である GWS⁵⁾では、長期の波高と波周期の同時確率分布は次のような式で定義されている。

$$P(H, T) = P(H)P(T|H) \quad (1)$$

ここで、 $P(H)$ は波高の確率分布で、 $P(T|H)$ は各波高に対する波周期の条件付確率である。このうち $P(H)$ は衛星マイクロ波高度計による観測で比較的容易に計算することができる。計算された頻度分布はさらに対数正規分布、ワイブル分布及びグンベル分布等でモデル化される⁷⁾場合が多い。本研究では比較的モデルのパラメータ設定が容易な対数正規分布(式形状は後述する式(2)と同様である)を仮定して、モデル化を試みる。

一方、衛星搭載マイクロ波高度計では、波周期に関する情報が得られないため、 $P(T|H)$ の推定は難しい。このような場合、一般的にある波高区間において、波周期の条件確率が対数正規分布に従うと仮定して、次式のように $P(T|H)$ が求められている⁶⁾⁷⁾⁸⁾。

$$P(T|H) = \frac{1}{T\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln(T) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

ここで、 T は波周期、 μ と σ はそれぞれ「波高に対する波周期」の幾何平均(波周期の自然対数の平均)と幾何標準偏差(波周期の自然対数の標準偏差)である。つまり、統計的に十分な数の波高と波周期のデータセットがあれば、波高から波周期の条件付確率を式(2)であらかじめ計算しておくことができる。しかし、問題は各波高に対する波周期データが統計的に十分なデータ数を得ることが難しいという点である。特に高波高時のデータは出現頻度がもともと少ないこともあり、データが少ない場合が多い。そこで、波周期データが少なくとも、式(2)の μ と σ を得ることができる次式のような近似式が考案されている⁶⁾⁷⁾⁸⁾。

$$\mu = a_1 + a_2 \ln(H) \quad (3)$$

$$\sigma = b_1 \exp(b_2 H) \quad (4)$$

ここで、 H は波高、 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 はそれぞれ海域ごとに異

なる係数である。従って調べたい海域の式(3), (4)における係数を別の波高と波周期のデータセットを使ってあらかじめ決定しておけば, 任意の区間の波高データから μ と σ を計算することができ, これを式(2)に代入すれば, $P(T/H)$ を推定することができる。本研究ではこのような方法で, 波高と波周期の同時確率分布 $P(H, T)$ を推定する。

3. データ

3.1 衛星波高データ

今回使用した衛星データは, TOPEX/POSEIDON (以下 T/P と略す) の波高データである。T/P は, 1992 年 8 月～2006 年 1 月まで約 14 年間の運用で, 数ある衛星海面高度計の中で最長の観測期間を有している。この衛星の軌道は地球を北から南 (昼間), あるいは南から北 (夜間) へ回る極軌道を採用している。観測高度は約 1334km で, 地球を約 112 分で一周し, 観測周期は 10 日 (10 日ではほぼ全球をカバーする) である。また, 軌道間隔は約 200km, 軌道上における波高取得間隔は約 7km である (Fig. 2 参照)。

入手したデータの期間は, 1997 年 5 月から 2002 年 8 月までの 5 年間分である。このデータは NASA/JPL (ジェット推進研究所) が処理し, PO.DAAC (The Physical Oceanography Distributed Active Archive Center) のインターネットサイト上で無料配布されていたテキストデータである (現在, このテキストデータは非公開となっているが, 同データは別のバイナリーフォーマットで同サイトに格納されている)。すでに地上局においてエラーデータ等の除去処理などが施されており, 緯度 (単位: 10^{-6} 度), 経度 (単位: 10^{-6} 度), 有義波高 (単位: cm) 等の情報が含まれている。T/P の波高の公称精度は「 ± 0.5 m 又は 10% の大きい方」である。

Fig.3 TOPEX/POSEIDON Grand Tracks for the sea area (10S–10N, 90E–150E)

3.2 実波高データ

使用する T/P 衛星データの波高推定精度の検証のため, 実測波高データを用いた。本来, 本研究の対象海域であるイン

ドネシア海域における実測波高データで推定精度を検証すべきであるが, インドネシア海域の実測波高データの入手が極めて難しいため, 今回は別のサイトにおける実測波高データを使って T/P 衛星データの波高推定精度の検証を行った。今回使用した実測波高データは, アメリカ大気庁の海洋データセンター (NODC: National Oceanographic Data Center) の沿岸ブイデータ (以下 NOAA ブイデータと略す) 及び日本沿岸の全国港湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS) データである。このうち, NOAA ブイデータは世界に 70 基以上の定点ブイがあり, 今回は前述した T/P 衛星データと同じ期間 1997 年から 2001 年までの 5 年分の 428 データを比較した。対象海域は高波高地帯, 内湾, 外洋の代表地としてそれぞれアラスカ沖, メキシコ湾, ハワイ沖の 3 海域を選択した (Table 1, Fig. 4)。衛星波高データと実測ブイデータの比較方法としては, まずブイ観測地点周辺の衛星波高データを緯度・経度 1° 格子 (約 110km 四方) で収集する。NOAA ブイ波高データは 1 時間おきの観測であることから, 収集した衛星波高データの計測時刻前後 1 時間のブイ波高データを選び両者を比較する。

一方, NOWPHAS データは全国 50 数地点で 2 時間毎の有義波緒元を観測している。今回, 検証海域として欠測データが少なく, 海域的な偏りが無い場所として浜田, 輪島, 鹿島, 名瀬の 4 海域を選んだ (Table 2)。衛星波高データとの比較の方法は前述した NOAA ブイデータの場合と同様とし, 1997 年から 2001 年までの 5 年分の 467 データを比較した。

Table 1 Summary of NOAA buoy data, 1997-2001

Name	Hawaii	Araska	Mexico Bay
Number of data	188	162	78
Ave. SWH	2.47m	2.93m	0.98m
Max. SWH	6.0m	8.0m	3.3m

Fig.4 Observation points of NOAA wave buoy

Table 2 Summary of NOWPHAS data, 1997-2001

Name	Hamada	Wajima	Kashima	Naze
Positions	34°54'19"	37°25'51"	35°53'55"	28°27'07"
	132°02'11"	136°25'51"	140°44'37"	129°31'11"
Number of data	128	126	121	92
Ave. SWH	1.1m	1.2 m	1.9 m	1.4 m
Max.SWH	4.1 m	3.6 m	5.0 m	3.2 m

3.3 波浪推算データ

波高と波周期の関係を調べるために使用したデータは、Fig.5 と Table 3 に示されたインドネシア周辺4海域 (Fig.5 中 a, b, c, d 地点) における全球波浪推算データである。また a, b, c, d の各地点はそれぞれ小海域 I, II, III, IV の代表値とした。データの期間は2000年1年間である。本来ならば衛星波高と同様かそれ以上のデータセットが必要であるが、本データが高額 (1年間で6万円) であるため今回は予算の関係上1年間のみのデータによる解析となった。この推算データは、ECMWF (ヨーロッパ中期天気予報センター) の海上風客観解析値を入力値とし、日本気象協会 (JWA) が開発した波浪推算モデル JWA3G を用いて計算したものである。格子間隔は250km, 時間間隔は6時間 (1日4データ, 1年で約1460データ格納) で、有義波高 (SWH) 及び有義波周期 (SWP) 等のデータセットが格納されている。本データの SWH 及び SWP の推定精度 (RMS 誤差) は、提供機関によると3680サンプルに対して、約0.6m, 約1.6sec 程度である。

Fig.5 Positions of JWA Hind-casting data (a, b, c, d). Black circles are positions of the data used in this study.

Table 3 Summary of wave hindcasting data

No.	Name of sea area	Lat.	Lon.	Depth(m)
a	Celebes Sea	2.5N	120.0E	4790
b	Java Sea	5.0S	107.5E	150
c	Flores Sea	5.0S	125.0E	4470
d	Indian Ocean	7.5S	105.0E	2760

4. 結果及び考察

4.1 衛星波高の推定精度評価

研究に用いた T/P 衛星データの波高推定精度を検証するため、衛星波高データと実測波高データを比較した。Fig.6 は衛星波高データと実測波高データの関係 (Fig.6(a), (b)) はそれぞれ NOAA データ, NOWPHAS データを使った場合を示す。いずれもバイアスはほぼ0であり、RMSE はそれぞれ

0.20m, 0.25mであった。T/P 波高データの公称精度は前述したように0.5mであり、T/P データは NOAA プイにより精度検証されて⁹⁾製品化されているため、この結果は当然とも言えるが、今回使用した T/P 波高データを筆者らのデータ処理方法を使い、任意の地点で検証しても、公称精度を十分満足する結果が得られることが確かめられた。

Fig.6 Relationship between the SWH from TOPEX/POSEIDON and the SWH from NOAA buoy and NOWPHAS data

4.2 衛星波高の確率分布特性

Table 4 及び Table 5 に T/P 衛星データから抽出したインドネシアの小海域 I~IV (Fig.2) における5年間の波高の確率分布データとその統計値をそれぞれ示す。また、Table 6 及び Fig.7 は、波高の確率分布を対数正規分布としてモデル化する場合のパラメータ値 (波高の対数値の平均と標準偏差) と、対数正規分布モデルによる波高確率分布と衛星波高分布の形状 (ヒストグラムと線グラフ) 比較をそれぞれ表す。

これらの図表から、インドネシア海域の波高分布の特徴として、 $1.0\text{m} \pm 0.5\text{m}$ 程度の波高を最頻値とする小海域 I, II, III のような比較的穏やかな海域と $2.2\text{m} \pm 0.6\text{m}$ 程度の波高を

最頻値とする小海域 IV のようなやや荒れた海域に大別できた。また、いずれの海域においても、衛星データから求めた波高確率分布は対数正規分布モデルでの再現性が極めてよいことがかった (Fig.7)。

Table 4 Probability distribution of significant wave height [P (H)] from TOPEX/POSEIDON data, 1997 - 2001

SWH (m)	I	II	III	IV
0-0.49	0.116	0.091	0.125	0.000
0.50-0.99	0.560	0.450	0.538	0.004
1.00-1.49	0.228	0.232	0.232	0.069
1.50-1.99	0.074	0.144	0.087	0.278
2.00-2.49	0.015	0.050	0.013	0.338
2.50-2.99	0.005	0.018	0.003	0.195
3.00-3.49	0.002	0.008	0.001	0.082
3.50-3.99	0.000	0.003	0.000	0.026

Table 5 Statistical summary of significant wave height [P (H)] from TOPEX/POSEIDON data, 1997 - 2001

Statistical parameters		Subdivision			
		I	II	III	IV
H (m)	Mean	1.07	0.87	0.87	2.21
	SD	0.61	0.43	0.43	0.6
N		125461	59276	90069	48459

Table 6 Summary for log-normal model parameters of [P (H)]

Parameters	Subdivision			
	I	II	III	IV
μ	-0.21	-0.05	-0.21	0.77
σ	0.56	0.58	0.54	0.27

Fig.7 Histograms of significant wave height [P (H)] using TOPEX/POSEIDON data from 1997 to 2001

4.3 波周期確率分布モデルのパラメータ設定

Fig. 8 は、波浪推算データから得られた各小海域における波高と波周期の関係を示している。また、Fig. 9 は Fig. 8 の縦軸の有義波周期を対数化してその平均値 (μ) と標準偏差 (σ) をプロットしたものである。それぞれの関係は前述したように式 (3)、式 (4) の近似式で表されることが知られている。各小海域における近似結果をまとめると、Table 7 のような値となる。Table 7 から、海域 I、海域 II で相関係数が約 0.8 以上の高い値を示しているが、海域 III、海域 IV においては波高と波周期の μ と σ の相関が悪い。これは、各波高に対する周期データの少ないことや、周りに島が点在しているために推算データの計算精度が悪い等の原因が考えられる。これらを解決するためには、長期の実測による波高／波周期データセットを蓄積し、その関係を調べるなどの研究が必要である。しかし、今回はこれ以上のデータセットを得ることは非常に難しいこと、とくに相関の悪い III 及び IV 海域の σ の値は Fig. 9 からわかるようにほぼ一定値とみなせ、近似曲線のパラメータ値をそのまま使用してもほとんど値に変化が見られないことから、以後の解析では Table 7 の値をそのまま使用した。

Fig. 8 Relationship between significant wave height (SWH) and wave period (SWP) from JWA wave hind-casting data, 2000

Table 7 Estimation parameters of wave period model

Subdivisions	$\mu=a_1+a_2\text{Ln}(H)$			$\sigma=b_1e^{b_2H}$		
	a_1	a_2	R	b_1	b_2	R
I	1.783	0.235	0.78	0.156	-0.407	0.89
II	1.419	0.591	0.99	0.666	-1.035	0.97
III	1.635	-0.129	0.59	0.203	0.0002	0.04
IV	2.106	-0.114	0.46	0.017	0.514	0.03

Fig.9 Relationship between "wave height" and "μ and σ of wave period"

4.4 波高と波周期同時確率分布特性

Fig. 10 及び Table 8 は、小海域 I～IV において Fig. 6 で示した衛星 T/P 波高データから導いた対数正規分布に従う「波高の確率」 $P(H)$ と式(2), (3), (4)と Table 7 の係数を使って求めた「波周期の条件付き確率」 $P(H|T)$ の積である「波高と波周期の同時確率分布」 $P(H, T)$ の図及び計算結果のデータである。これらの図の妥当性を検証するために、Fig. 2 に示される GWS の小海域 62 番における GWS の $P(H, T)$ と、今回示された同様の方法で衛星データから推定された $P(H, T)$ を比較した (Fig. 11)。なお、今回使用した小海域 62 番の水域における波浪推算データは緯度 5.0N, 経度 107.5E の 1464 データセットである。Fig. 11 より両データの $P(H, T)$ の範囲 ($H: 0 \sim 4\text{m}$, $T: 2 \sim 7\text{sec}$) 及び最も $P(H, T)$ が大きい波高・波周期の位置 ($H: 1 \sim 1.5\text{m}$, $T: 4 \sim 6\text{sec}$) はほぼ一致しており、本研究で使用したモデルの妥当性が示唆された。

このような結果から、Fig. 10 で示す各海域の $P(H, T)$ も妥当な推定値が得られていると仮定して、各海域における $P(H, T)$ の特徴について述べる。即ち、海域(I)では「波高 0-4m, 波周期, 4-7 sec」程度、海域(II)では「波高 0-4m, 波周期 1-8 sec」程度、海域(III)では「波高 0-4m, 波周期 3-8 sec」,

海域(IV)では「波高 1-4m, 波周期 6-9 sec」程度の範囲の波浪が卓越していると推定された。

5. まとめ

本研究では衛星 TOPEX/POSEIDON の海面高度計データを使って、インドネシア領海内の波浪データ収集の方法及び同領海内の波浪特性について議論した。その結果 GWS に掲載されていない海域における長期の波高と波周期の同時確率分布特性を示すことができた。しかしながら今回は使用した波浪推算データの陸地の影響や短期間のデータセットを使った影響等の議論までには至らなかった。また波周期のモデルパラメータ設定でよい結果が得られなかった海域 (小海域 III, IV) における波周期モデルの改良等の問題点が残った。今後はこれらの問題点解決のための研究を行う予定である。

Fig.10 Joint probability distributions of wave height and wave period from satellite and wave hind-casting data

Fig.11 Comparison between $P(H,T)$ (all directions) from GWS and $P(H,T)$ from this study model using satellite and wave hind-casting data in GWS subdivision area 62.

Table 8 Calculated probability distribution of wave height and wave period [P(H,T)] from satellite and wave hind-casting data

(I)		SWP (sec)					
		<4	4-5	5-6	6-7	7-8	8<
SWH (m)	0-0.5	0.065	0.137	0.025	0.001	0.000	0.000
	0.5-1.0	0.000	0.065	0.288	0.097	0.007	0.000
	1.0-1.5	0.000	0.000	0.059	0.123	0.018	0.001
	1.5-2.0	0.000	0.000	0.002	0.048	0.021	0.001
	2.0-2.5	0.000	0.000	0.000	0.006	0.017	0.001
	2.5-3.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.001
	3.0-3.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001
	3.5<	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
(II)		SWP (sec)					
		<4	4-5	5-6	6-7	7-8	8<
SWH (m)	0-0.5	0.155	0.006	0.002	0.001	0.000	0.000
	0.5-1.0	0.270	0.081	0.031	0.010	0.003	0.001
	1.0-1.5	0.039	0.109	0.065	0.017	0.003	0.000
	1.5-2.0	0.000	0.007	0.065	0.032	0.003	0.000
	2.0-2.5	0.000	0.000	0.001	0.042	0.008	0.000
	2.5-3.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.030	0.000
	3.0-3.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012
	3.5<	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
(III)		SWP (sec)					
		<4	4-5	5-6	6-7	7-8	8<
SWH (m)	0-0.5	0.003	0.032	0.073	0.069	0.038	0.022
	0.5-1.0	0.030	0.139	0.158	0.084	0.028	0.009
	1.0-1.5	0.025	0.077	0.063	0.026	0.007	0.002
	1.5-2.0	0.013	0.030	0.020	0.007	0.002	0.000
	2.0-2.5	0.006	0.011	0.006	0.002	0.000	0.000
	2.5-3.0	0.003	0.004	0.002	0.001	0.000	0.000
	3.0-3.5	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000
	3.5<	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
(IV)		SWP (sec)					
		<4	4-5	5-6	6-7	7-8	8<
SWH (m)	0-0.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0.5-1.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006
	1.0-1.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021	0.027
	1.5-2.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.324	0.023
	2.0-2.5	0.000	0.000	0.000	0.011	0.307	0.018
	2.5-3.0	0.000	0.000	0.000	0.035	0.122	0.012
	3.0-3.5	0.000	0.000	0.001	0.025	0.035	0.006
	3.5<	0.000	0.000	0.001	0.009	0.009	0.003

謝 辞

本研究は1997年～2006年日本学術振興会拠点大学方式交流事業「海上輸送の総合的研究（研究代表：小瀬邦治 広島大

学教授（研究当時））」の一環として行われた。関係各位に対して、記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Takaki, M. and Samudro (eds.): Final report for collection of wave data and safety of ships operating in Indonesian domestic seas, JSPS program on Marine Transportation Engineering, 2006
- 2) Fu, L., Christensen, E.J., Yamarone Jr., C.A., Lefebvre, M., Menard, Y., Dorrer, M., and Escudier P.: TOPEX/POSEIDON mission overview, Journal of Geophysical Research, 99 (C12), pp.24369-24381, 1994
- 3) Lefevre, J. M., Barckicke, J. M., and Menard, Y.: A significant wave height dependent function for TOPEX/POSEIDON wind speed retrieval, Journal of Geophysical Research, 99 (C12), pp.25035-25049, 1994
- 4) 三河哲也, 篠原吉雄, 柴田彰: GEOSAT レーダー高度計による波浪観測について, 気象庁研究時報, 41(5), pp.171-183, 1989
- 5) British Maritime Technology (Primary contributions; N.Hogben): Global wave statistic, Unwin Brothers Limited, London, 1986
- 6) 万順涛, 新開明二: 海洋の波浪統計データの特性値と船体応答長期予測値の評価, 日本造船学会論文集, 178, pp.289-296, 1995
- 7) 新開明二, 荒木聡, 万順涛, 松尾宏平, 朴鐘憲: 人工衛星リモートセンシングに基づく波浪情報データの利用について, 西部造船会会報, 100, pp.55-63, 2000
- 8) 松尾宏平, 竹本浩也, 新開明二: 衛星 ERS のレーダー波高計による海面の観測に関する研究—衛星波浪情報データベース作成の一試み—, 西部造船会会報, 102, pp.43-53, 2001
- 9) Callahan, P.S., Morris, C.S., and Hsiao, S.V.: Comparison of TOPEX/POSEIDON σ_0 and significant wave height distributions to Geosat, Journal of Geophysical Research, 99 (C12), pp.25015-25024, 1994