

現地観測に基づくインドネシア 東ジャワ海域における波浪特性の解明

CHARACTERISTICS OF THE WAVE CONDITION BASED ON THE FIELD OBSERVATION AT EAST JAVA COASTAL AREA IN INDONESIA

鷺尾朝昭¹・吉岡健¹

Tomoaki WASHIO, Takeshi YOSHIOKA

¹正会員 修(工) 電源開発(株) (〒104-8165 東京都中央区銀座6-15-1)

The planned East Java Sea Water Pumped Storage Power Project is located near the Watangan Mountain in Wuluhan County Jember Province of East Java State in Indonesia. As outlet structure is directly exposed to the Indian Ocean in this project, we should make clear characteristics of the wave condition which is needed for design and construction in order to estimate the feasibility.

However the wave data is not observed at this coastal area, we started field observation from Feb. 2008 at this area. As the result of the observation, it turns out that the area has severe wave condition such as long-period waves by strong oceanic swell. And the data proved the wave direction is southwest stably throughout the year.

Key Words : East Java, seawater pumped storage power, field observation, long-period waves

1. はじめに

インドネシア,特にジャワ・バリ系統では,経済発展に伴う電力需要が確実に増加しており,その高い電力ピーク需要への対応が急務となっている.このため電源開発(株)は,(独)日本貿易振興機構からの委託を受け,世界で唯一わが国に実績のある海水揚水発電を提案し,その基本調査を実施した.ここで海水揚水発電とは,下部調整池が海であるため容量に制限がなく,急峻な地形と広大な台地を組み合わせることで落差(発電能力)と上部調整池の容量(発電規模)を確保することができる発電形式である.ジャワ島東部の東ジャワ州ジェンベル県ウルハン郡ワタンガン山近傍(図-1参照)の計画地点は,有効落差約400m,発電規模約800MWが実現可能であり,経済的に優れた地点として選定した.

当該計画地点の放水口はインド洋に面しており,波浪の影響を直接受けることから,放水口の構造設計や消波工の検討,海上作業の稼働率算定などに必要な波浪特性(波高,周期,波向,出現頻度,潮位など)を適切に把握することがプロジェクトの実現可能性を大きく左右するものと考えられた.また,計画地点の南西部沖合約5km地点に,東西約15km,南北約5kmのバルン島が存在しており,当該計画地点における波浪特性への影響が予測された.しかしながら,当該海域における波浪観測の実績が皆無であったことから,同海域における波浪特性の解明を

目的として,放水口計画地点に観測機器を設置し,2008年2月から現地観測を実施した.



図-1 計画地点

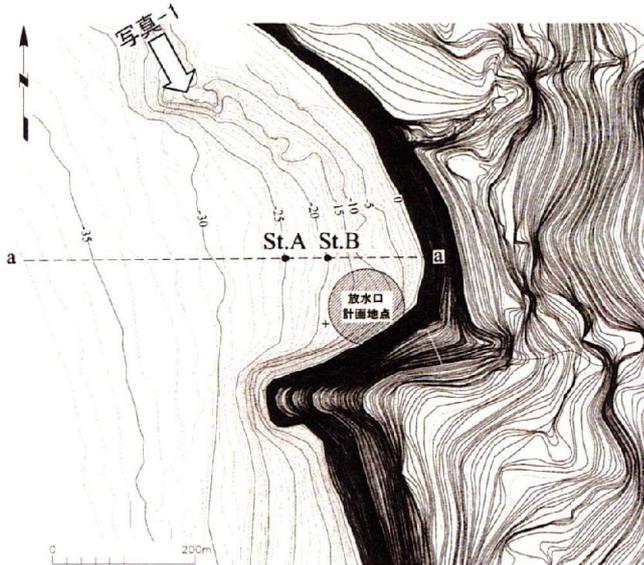


図-2 観測位置



写真-1 放水口計画地点

2. 観測内容

波浪観測は放水口計画地点の前面2箇所（St.A：計画水深 25m, St.B：計画水深 20m）において行った。観測位置および放水口計画地点をそれぞれ図-2、写真-1 に示す。併せて、図-2 中の a-a 断面における測定機器の設置位置を図-3 に示す。図中に示されている海底地形線は、2007 年後期に実施した深浅測量結果に基づくものであり、放水口計画地点周辺では急激に深くなっていることが特徴である。

観測諸元を表-1 に示す。観測機器には、遠隔地における確実なデータ取得および方向スペクトルの把握を目的として、超音波式流速計型波向計（CWD）を採用した。また、2008 年 2 月 28 日～同年 3 月 19 日の約 1 ヶ月間は、通常の間欠観測ではなく連続観測を実施した。なお、次章に示す間欠観測結果においては、連続データから間欠データを抽出して扱っている。

3. 観測結果

(1) 波浪データの処理方法

波浪データの前処理は佐々木ほか¹⁾により、①異常に大きな値の欠測処理、②トレンド除去（1 次式）、③標準偏差の計算、④異常に大きな値の欠測処理（標準偏差の 6 倍以上）、⑤標準偏差の再計算とピークツーピーク周期の平均値の計算、⑥1 階微分による欠測処理、⑦時間内挿、⑧各種パラメータによる異常値判断を行った。

続いて、水圧データから表面水位への変換を橋本ら²⁾が提案した周波数応答関数を用いた FFT 法により行った。得られた表面波の時刻歴からゼロアップクロス法により個々の波を定義した上で、20 分を 1 単位とした代表波および平均波向、平均分散角等を

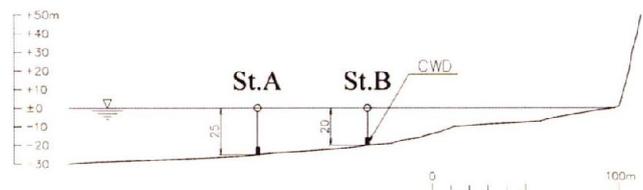


図-3 測定機器設置位置（a-a断面）

表-1 観測諸元

項目	内容	
測定機器	超音波式流速計型波向計（CWD）	
測定項目	直交水平2成分流速，水圧変動，水温	
観測点	St.A・・・計画水深 25m St.B・・・計画水深 20m	
観測方法	連続観測	間欠観測
	サンプリング間隔0.5s	毎偶正時20分観測 生データ1単位： サンプリング間隔0.5s ×20分間 =2,400データ
観測期間	2008年2月18日～ 2008年3月19日	2008年3月20日～ 2008年11月19日 (継続観測中)

検討し、併せて連続観測データに基づき、180 分を 1 単位とした長周期波の検討を行った。なお、処理対象データ数は 2 の累乗になるよう 1 単位の始めと終わりの 10%程度を除外して解析を行うこととした。

(2) 間欠観測結果

a) St.A における年間の波浪特性

図-4 に St.A(沖側)における年間の有義波高 $H_{1/3}$ と有義波周期 $T_{1/3}$ の時系列を、図-5 には日最大有

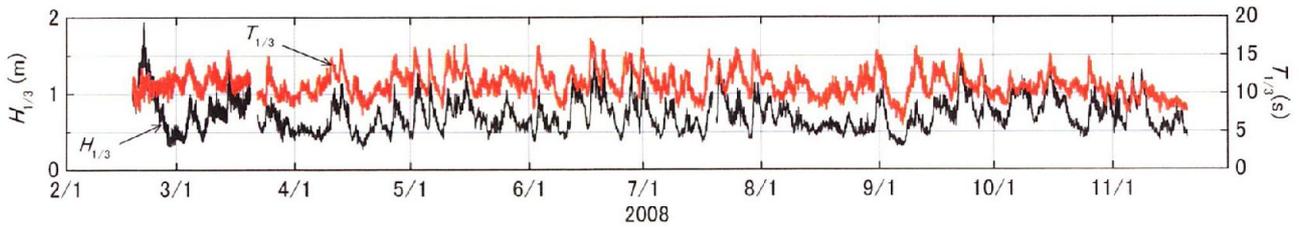


図-4 St.Aにおける $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ の時系列

義波高とその時の有義波周期の関係を示す。これらより2月を除く年間の波高レベルは1.0~1.5m程度とさほど高くないが、周期は8~18s程度となり非常に長いことがわかる。また年間を通じてほぼ同一の傾向を示しており、季節毎の明瞭な特性は見られない。図-6はわが国の全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS, 国土交通省港湾局, (独)港湾空港技術研究所)のうち、長周期波浪の影響が大きい太平洋側の釜石港と比較的影響の小さい日本海側の酒田港について公表中最新である2007年データ³⁾に基づき、図-5と同様の処理を行ったものである。図-5と図-6より、本地点の長周期波浪が国内の港湾と比較して卓越していることが分かる。要因として、本海域がインド洋から南極海にかけて開放されていることによる、外洋からのうねりの伝播が考えられる。また、長周期波浪による船舶動揺が海上作業の稼働率を低下させる懸念がある。

b) St.Aにおける周期と波向の関係

図-7にSt.Aにおける有義波周期 $T_{1/3}$ と平均波向 θ_m の関係を示す。平均波向は、水面変動 η および2成分流速変動 u, v を用い、共分散法に基づく式(1)により算出した。

$$\theta_m = \tan^{-1} \left(\frac{-\overline{\eta v}}{-\overline{\eta u}} \right) \quad (1)$$

これを見ると、波向は年間を通じてSW方向を示しており安定している。SW方向が卓越する要因として、図-1に示したバルン島による遮蔽効果が考えられる。また、ばらつきはあるものの周期が長くなるほど波向が西側に変化する傾向が見受けられる。

図-8に、同じく共分散法に基づき式(2)より算出した平均分散角 θ_k と平均波向 θ_m の関係を示す。これより、平均波向が一方に卓越し、かつ平均分散角も小さいことがわかり、このことから方向集中度は相当高いものと考えられる。

$$\theta_k = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{\overline{\eta^2} \sqrt{\overline{\eta v^2 u^2} + 2\overline{\eta u \cdot \eta v \cdot uv} + \overline{\eta u^2 v^2}}}{\overline{\eta u^2} + \overline{\eta v^2}} \right) \quad (2)$$

参考として、20分1単位データを用い、拡張最尤法(EMLM法)⁴⁾により算出した方向スペクトルの一例を図-9に示す。詳細な検討は今後の課題であるが、SW方向のスペクトルが卓越しており、一方向波浪系であると考えられる。

c) St.A—St.B間における波の変形

図-10にSt.A, St.Bにおける有義波高 $H_{1/3}$ と平

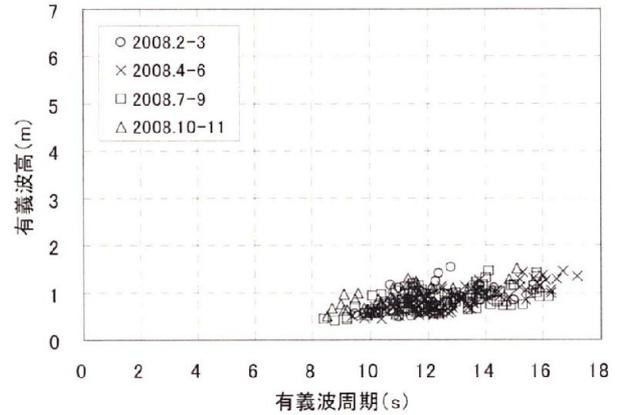
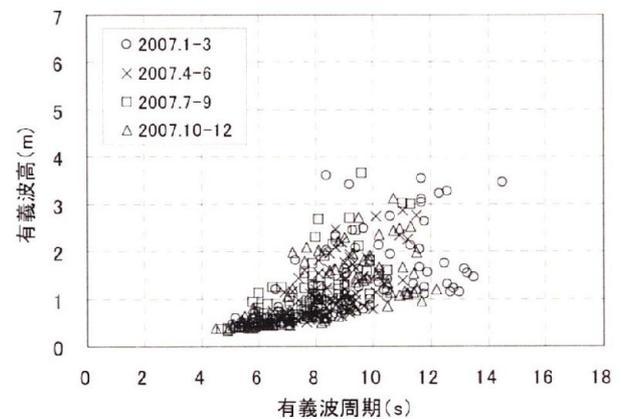
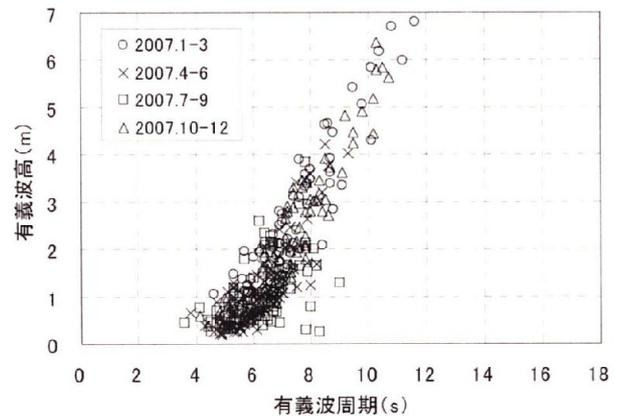


図-5 St.Aにおける日最大の $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ の関係



a) 釜石港



b) 酒田港

図-6 日最大の $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ の関係 (NOWPHAS, 2007年)

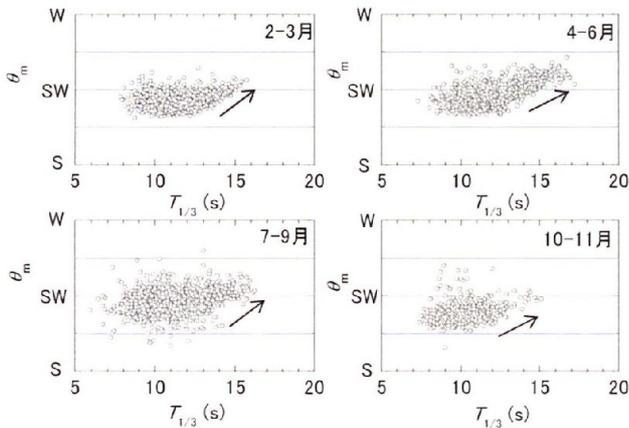


図-7 St. Aにおける $T_{1/3}$ と θ_m の関係

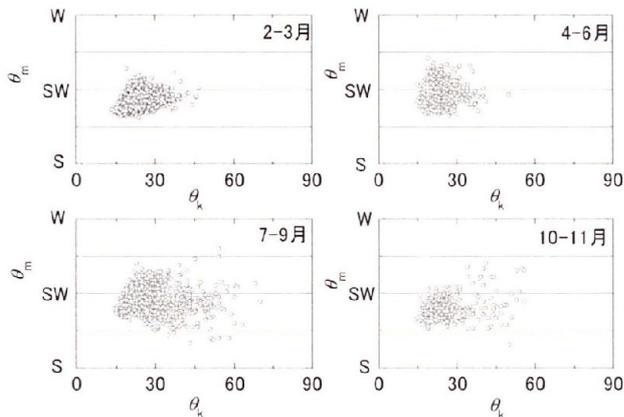


図-8 St. Aにおける θ_k と θ_m の関係

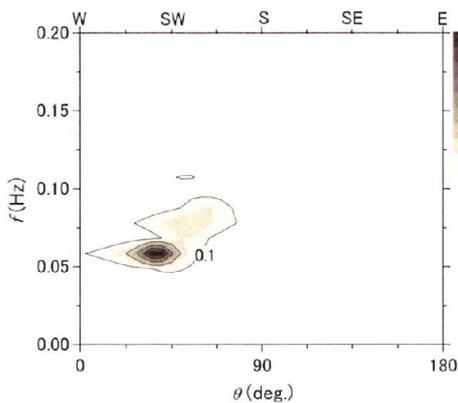


図-9 方向スペクトルの一例
(2008年2月20日12時: St. A)

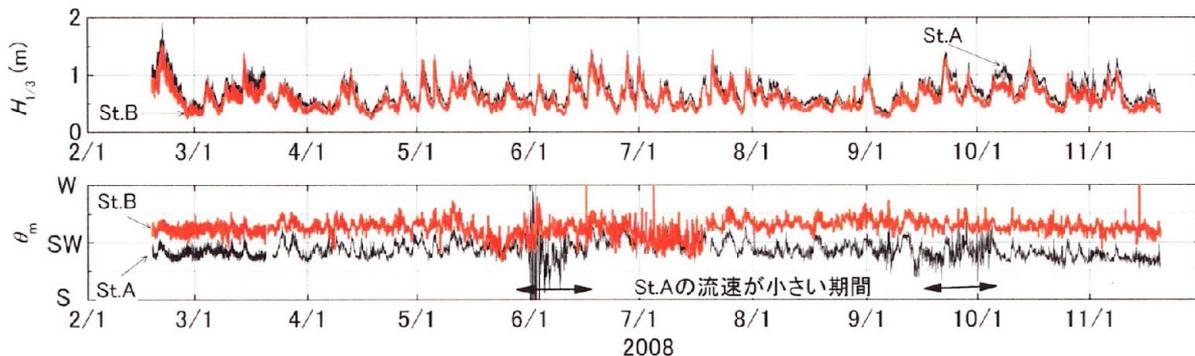


図-10 St. A, St. Bにおける $H_{1/3}$ と θ_m の比較

均波向 θ_m の比較を示す．図中の両矢印で示した期間は，流速値が小さく平均波向の評価精度に問題がある期間である．まず波高を見ると，岸に近い St. B の方が 10%程度低くなっている．図-2，図-3には深浅測量に基づく海底地形線を示しているが，当該海域の海底地形は急勾配となっており，この程度の波高レベルで浅水・碎波変形が生じるとは考えにくい．一方，波向を見ると，St. B の方が 10~20度程度西寄りの傾向を示しており，波の伝播に伴って波向が SW 方向から WSW 方向へ旋回している．

このことから，海底地形による波の屈折および，観測地点の南に位置する岬による波の回折が生じているものと考えられる．波の屈折については，観測地点より沖側の等水深線は南北方向にほぼ平行となっており（図-2 参照），SW 方向からの入射波に対し，St. B では St. A に比べて波向が西寄りになることは，屈折による波向変化と整合している．

そこで，直線状平行等深線海岸における不規則波の屈折係数の算定図⁵⁾，および半無限防波堤による不規則波の回折係数の算定図⁵⁾（図-11，図-12）を用いて，これらの影響度を調べた．まず，St. A および St. B の平均水深を，観測結果に基づき 24m および 18m とし，水深波長比 h/L_0 (L_0 : 沖波波長 = $1.56 T_0^2$) を算出した．沖波の周期は，観測結果に基づき 10s, 16s とした（図-5 参照）．水深の影響を受けない沖側の波向については，St. A での θ_m と同程度か，屈折・回折の影響を除けばさらに南寄りと考えられることから， 50° 程度とした．また，方向集中度 S_{max} は高いと考えられることから（図-8 参照）， $S_{max}=75$ と仮定した．結果を表-2 に示す．まず屈折係数について見ると，St. A と St. B の差は 0.03 程度であり，屈折のみでは実際の波高変化を説明できない．続いて，回折係数を見ると，両者の差は 0.09 程度となっており，屈折に加えて回折を考慮することで現地の波高変化のオーダーに近づくことがわかる．

(3) 連続観測結果

続いて，本海域における波浪の大きな特徴である長周期波について，連続観測結果を用いて詳細に検討する．図-13 に 20 分を 1 単位として算出した，St. A における有義波高 $H_{1/3}$ と有義波周期 $T_{1/3}$ の時系

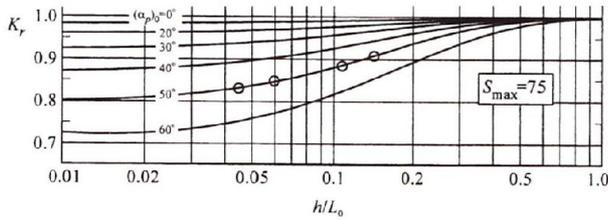


図-11 直線状平行等深線海岸における
不規則波の屈折係数³⁾

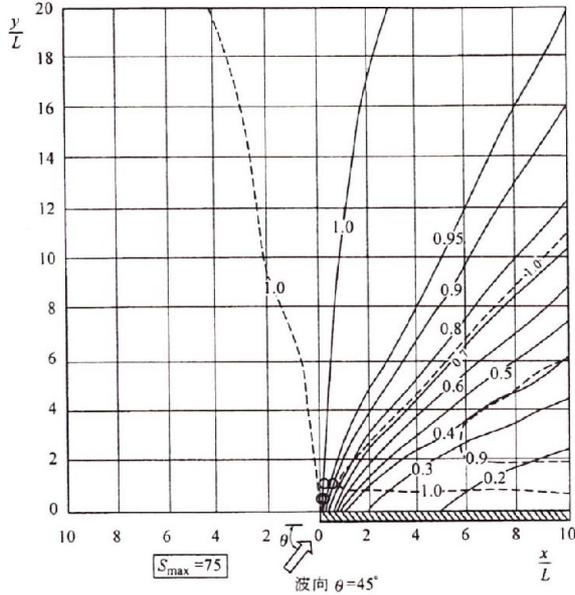


図-12 半無限防波堤による不規則波の回折係数³⁾

表-2 屈折係数 K_r 、回折係数 K_d の読取り結果

	St.A	St.B	St.A	St.B
T_0 (s)	10		16	
L_0 (s)	156		399	
H (m)	24	18	24	18
h/L_0	0.154	0.115	0.060	0.045
x/L_0	0.2	0.5	0.1	0.2
y/L_0	1.1	1.1	0.4	0.4
K_r	0.91	0.88	0.85	0.82
	$\Delta 0.03$		$\Delta 0.03$	
K_d	0.99	0.90	(1.00)*	(0.95)*
	$\Delta 0.09$		$(\Delta 0.05)*$	

※読取困難のため括弧書きとした

列を示す。図に示した連続観測期間の中から、有義波の傾向の異なる3期間を抽出し、周波数スペクトルの形状を調べることにした。対象期間を表-3に示す。なお、長周期波を検討対象とするために、180分を1単位として周波数スペクトル $S(f)$ (f : 周波数)を算出した。

算出結果を図-14に示す。図中の破線および一点鎖線は、式(3)に示す修正プレットシュナイダー・光易型スペクトルおよび、平石他⁶⁾が提案する長周期波の標準スペクトル(近似形、式(4))を表している。図中の α_1 は、短周期成分のスペクトルピーク周波数 f_p と長周期成分のエネルギーを計算するための境界周波数 f_{ba} の比を表している。

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-0.75(T_{1/3} f)^4] \quad (3)$$

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f_{ba})^{-5} \exp[-1.03(T_{1/3} f_{ba})^4] \quad (4)$$

ここに、 $f < f_{ba}$

$$f_{ba} = (1/\alpha_1) f_p$$

$$f_p = 1/(1.05 T_{1/3})$$

これより、St.Aにおける長周期波のスペクトル形状は、境界周波数 f_{ba} より低周波数側で2つのスペクトルピークが見られ、平石他⁶⁾による標準スペクトルに当てはめるとタイプ2に属する。また、静穏時である期間Ⅲでの長周期成分のエネルギーが若干低下しているものの、期間Ⅰ、Ⅱでは $\alpha_1 = 1.5 \sim 1.6$ が概ね適合している。平石他⁶⁾によると、長周期波が発生する那覇港や常陸那珂港の観測事例では、 $\alpha_1 = 1.6 \sim 1.7$ 程度であると報告されており、このことから、当該観測地点の長周期成分のエネルギーは相当高く、有義波高が大きくなる波浪時に長周期成分のエネルギーも大きくなると言える。

表-3 長周期波の検討対象期間

期間名	期間	有義波の期間 平均値(St.A)		備考
		$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	
期間Ⅰ	2/20-2/21	1.34	10.3	$H_{1/3}$ 最大時
期間Ⅱ	3/14-3/15	0.88	13.4	
期間Ⅲ	2/28-3/03	0.54	12.1	静穏時

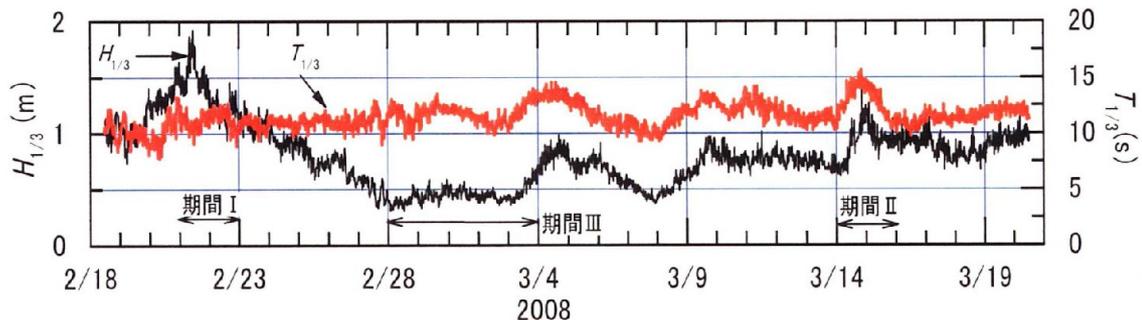


図-13 St.Aにおける有義波高 $H_{1/3}$ と有義波周期 $T_{1/3}$ の時系列(連続観測)

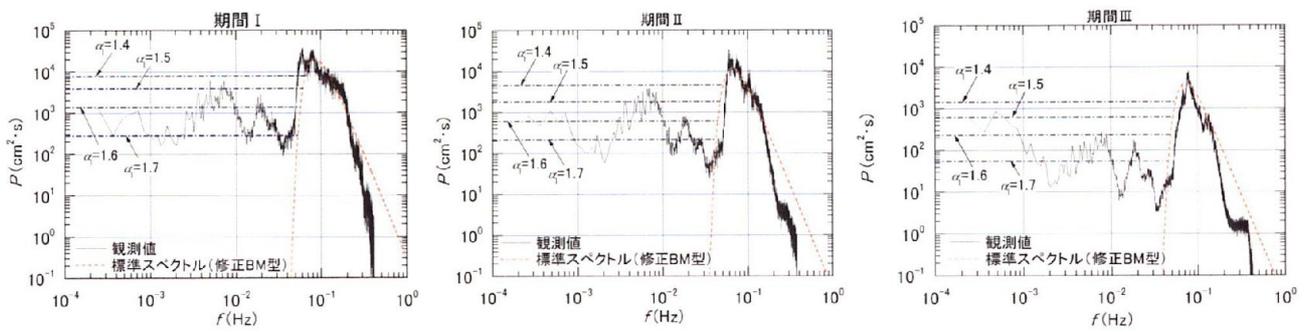


図-14 周波数スペクトルの平均値(St.A)

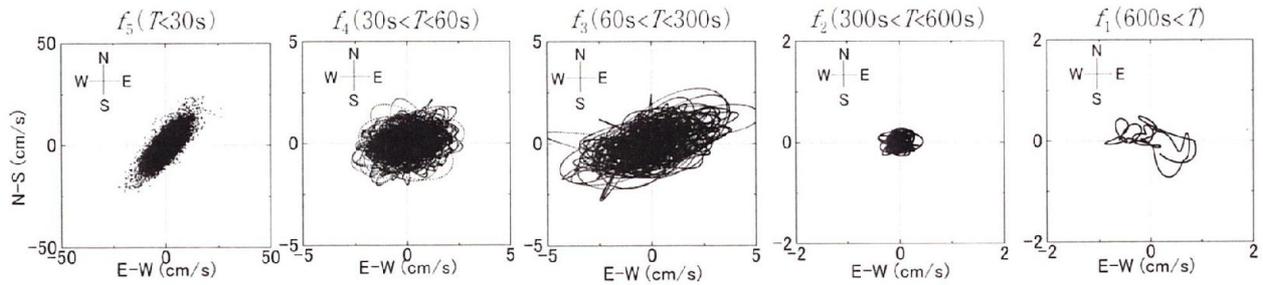


図-15 流速ベクトルの散布図 (2008年2月20日12時: St.A)

最後に、2成分流速変動をFFT法によって周波数帯別に分解し、流速ベクトルの散布図を描いた(図-15)。検討対象期間は、図-9と同じく、比較的高波浪が来襲した2008年2月20日12時(期間I)とした。まず、短周期成分 $f_5(T<30s)$ においてはSW-NW方向の振動が明瞭である。一方、長周期成分 $f_4(30s<T<60s)$ 、 $f_3(60s<T<300s)$ では、卓越方向が若干不鮮明ではあるもののW-E方向の振動に変化していることがわかる。この事実は、図-7で述べた傾向と良く整合している。これ以上の長周期成分になると振動レベルが低くなるが、 $f_2(300s<T<600s)$ よりも $f_1(600s<T)$ の方がE-W方向の振動が大きいたく見受けられる。この要因として、当該海域とバルン島を挟んだ海域を閉鎖空間とした副振動の可能性が考えられる。

4. まとめ

本研究では、インドネシア東ジャワ海域における波浪特性の解明を目的として、2008年2月から波浪観測を実施した。主な結論を以下に示す。

- ① 沖波としては、波高レベルが高くないにも係わらず、有義波周期が8秒以上と極めて長く、年間を通じて安定しており、海上作業の稼働率への影響が懸念される。
- ② 波向も年間を通じてSW方向に安定しており、長周期になるほどW方向に変化する傾向が見られた。
- ③ 浅海波としては、観測地点の南に位置する岬による波の回折と海底地形による波の屈折により、

陸に近づくほど波高が低下し、かつ波向がSW方向からW方向に変化する傾向が見られた。

今後は、詳細な方向スペクトル解析を行い、沖波の周波数スペクトルおよび方向関数を定めるとともに、浅海波の波浪変形計算を実施して、当該海域の常時波浪および異常時波浪条件を高精度に評価し、放水口の設計および施工計画に資する予定である。

謝辞:

本研究を実施するにあたり、観測データの解析について東洋建設(株)鳴尾研究所の藤原隆一氏より多大なるご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 佐々木弘, 合田良美, 小長井孝: 現地観測用波浪データ演算装置の開発について, 港湾技術研究所資料, No.580, pp.1-23, 1992.
- 2) 橋本典明, 永井紀彦, 菅原一晃, 浅井正, 朴慶寿: 波浪の多方向性と弱非線形性を考慮した水圧波から表面波への換算法について, 港湾技術研究所報告, Vol.32, No.1, pp.27-51, 1993.
- 3) 国土交通省港湾局, 全国港湾海洋波浪情報網, <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>
- 4) 磯部雅彦, 近藤浩右, 堀川清司: 方向スペクトルの推定におけるMLMの拡張, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.173-177, 1984.
- 5) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, (社)日本港湾協会, 2007.
- 6) 平石哲也, 河野信二, 玉城重則, 長谷川準三: 港湾構造物の設計に用いる長周期波の標準スペクトルについて, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.246-250, 1997.