

各種海底設置式波浪計による方向スペクトルの 比較実証観測

COMPARISON AND CHARACTERIZATION OF BOTTOM MOUNTED WAVE DIRECTIONAL SYSTEMS

永井紀彦¹・橋本典明²・Atle LOHRMANN³・三井正雄⁴

小梨昭一郎⁵・久高将信⁶

Toshihiko NAGAI, Noriaki HASHIMOTO, Atle LOHRMANN,
Masao MITSUI, Shoichro KONASHI and Masanobu KUDAKA

¹正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所海象情報研究室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所海洋水理研究室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³ Managing Director, NORTEK AS (Industriveien 33, N-1337, Sandvika, NORWAY)

⁴㈱カイジョー(〒205-8607 東京都羽村市柴町3-1-5)

⁵アレック電子㈱(〒651-2242 兵庫県神戸市西区井吹台東町7-2-3)

⁶正会員 ㈱エコー(〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

Three different bottom mounted systems, DWDM, AWAC and DL2, were installed in the same offshore area within 20m horizontal distance where the wave conditions are expected to be the same. Acoustic techniques in combination with pressure are used in all systems, although the detail implementation is different in each system. The differences of the characteristics of the observed wave spectra are discussed through the observation.

Significant wave heights and periods obtained by each type of wave gauge showed good agreement during the test term, in both high wave conditions with significant wave heights bigger than 6m and low wave conditions with wave heights lower than 0.5m. However, in the high frequency component, AWAC results slightly differ to the DWDM and DL2 results. Because AWAC wave data analysis is based on the seabed pressure fluctuation, while DWDM and DL2 wave data analysis is based on direct acoustic water surface movement.

Key Words : NOWPHAS, DWDM, AWAC, DL-2, Directional Spectrum

1. はじめに

沿岸域における波浪観測情報は、港湾構造物等の計画・設計・施工に対する与条件として、あるいは、台風等による被災メカニズムの究明のために、重要な意志決定資料として広範に活用されている。しかしながら実海域における波浪観測値の検証が極めて困難であることに起因して、計測器であるにも関わらず、波浪計としての標準規格は波浪観測の先進国であるわが国においても未だ存在していない。そのため、観測機器毎の信頼性や特徴の相違に関しても明確な情報がないのが現状である。さらに、沿岸波浪観測機器が一般に高価であるため、同じ観測地点における複数機種種の比較検討は、これまでほとんど

実施されていなかった。

本稿は、御前崎港沖の実海域において、計測原理の異なる3種類の沿岸波浪観測機器による並行観測を実施し、その結果を、方向スペクトル情報として比較した結果を紹介するものである。

2. 現地比較実証観測

比較観測は、2001年9月から10月にかけての約1か月間にわたって、御前崎港沖合の水深22mの定常波浪観測点周辺で行われた。この間には、台風0115号の来襲を含む数回の高波期間が含まれている。

検討対象とした波浪計としては、①定常観測機器として設置されている海象計 (DWDM : Doppler-type

表-1 検討対象とした各沿岸波浪観測機器の測定項目の比較

機種	測定項目
①海象計	表面波(超音波), 海底水圧変動, 中間層の斜方向流速(3成分)
②AWAC	海底水圧変動, 中間層の斜方向流速(3成分)
③DL2	表面波(超音波), 海底水圧変動, 海底の水平流速(2成分)

表-2 検討対象とした各沿岸波浪観測機器による有義波と方向スペクトルの算定法

機種	有義波の算定法	方向スペクトルの算定法
①海象計	表面波形ゼロアップクロス法	EMLM法 橋本ら(1995)
②AWAC	周波数スペクトルの積分値	EMLM法に準ずる手法 Allenderら(1989)
③DL2	表面波形ゼロアップクロス法	EMEP法 橋本ら(1993a)

Wave Directional Meter), ②AWAC (Acoustic Wave and Current profiler) と呼ばれるノルウェーで開発された海象計の測定原理を活かしたコンパクトな直記式波浪計, ③DL2と呼ばれる我が国で最も汎用的に用いられている海底設置型直記式波浪計であり, 表-1に各観測項目を, 表-2に方向スペクトル算定法を示す^{1), 5), 12), 14)}.

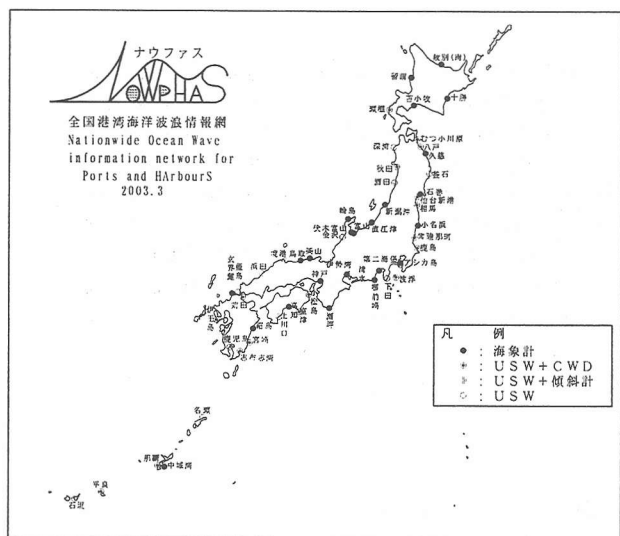


図-1 ナウファス波浪観測網

これらの3機の中で, 海象計は, ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網: NOWPHAS: Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbours) 定常観測の一環として, 定常的に観測が行われているものである^{3), 7), 8)}.

図-1に, 2003年3月現在のナウファスネットワークを示す. 1970年以降, ナウファスの成果は, 毎年, 港湾空港技術研究所資料として刊行される波浪観測年報にとりまとめられている¹¹⁾.

写真-1に, 左から順に, 海象計, AWACおよびDL2の海底設置センサーを, それぞれ示す.

海象計は, 海表面と海底面の間層における波に伴う水粒子運動を, 0.5s間隔で3次的に測定することができるので, 海底まで届かない沖波(深海波)条件となる波浪に関しても, 方向スペクトル情報を得ることが可能である^{5), 14)}. 海象計の実用化によって, それまで試みられていたような非常に高価な大水深海域における波高計アレーによる波浪観測^{4), 6)}の代替手段ができたため, 沖波の方向スペクトル観測情報の定常的な入手が非常に容易になった.

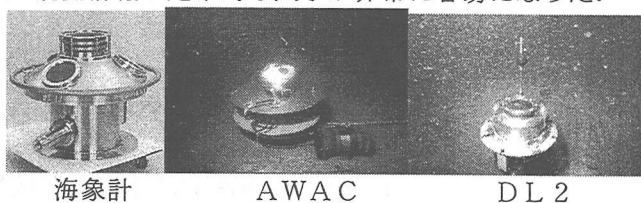


写真-1 海底設置センサー

AWACとは, 共同著者の一人が所属するノルウェー国のNORTEK社によって開発された簡易な直記式波浪観測装置であり¹⁾, 海象計の測定原理を活かして方向スペクトルの算定を行うことができる. このため, 計測項目は, 海象計とよく似ているが, 超音波による表面波形計測はおこなわず, 水圧変動記録だけから表面波形を換算しなければならない. 従って, 沖波(深海波)条件となるような, 周期の短い成分波の観測には, 不向きである¹³⁾.

DL2とは, 我が国で最も汎用的に用いられている海底設置式直記式の波浪計であり, トルコ港湾水理センタープロジェクトなどのような, 我が国の海外技術協力にも汎用的に採用されている²⁾. 水平2成分流速・超音波による水位変動・水圧変動の4chを計測する構造となっている. 方向スペクトル解析手法はユーザに委ねられるが, ここでは, EMEP法によって方向スペクトルの推定演算を行った¹²⁾.

3. 代表波諸元に関する比較

波浪を表現する最も一般的な指標は有義波高である. ここでは, ナウファスにおけるデータ処理方法に倣って, 有義波高 $H_{1/3}$ をゼロアップクロス法で定義した. ただし, 統計的に, $H_{1/3}$ は, 周波数スペクトルの全周波数領域の積分値である m_0 との間に, 式(1)の関係が概ね成り立つことが知られている.

$$H_{1/3} = 4m_0^{1/2} \quad (1)$$

すなわち, $H_{1/3}$ は波浪の総エネルギーに対応する.

図-2は, 検討対象期間中の有義波高の経時変化を, 各波浪観測装置に関して比較したものである. 3種類の波浪観測機器は, 有義波高の算定結果に関しては, 概ね一致した値を出力している. ただし, 例えば, 9月21日深夜から22日未明にかけての記録に見られるように, AWACで算出される有義波高が,

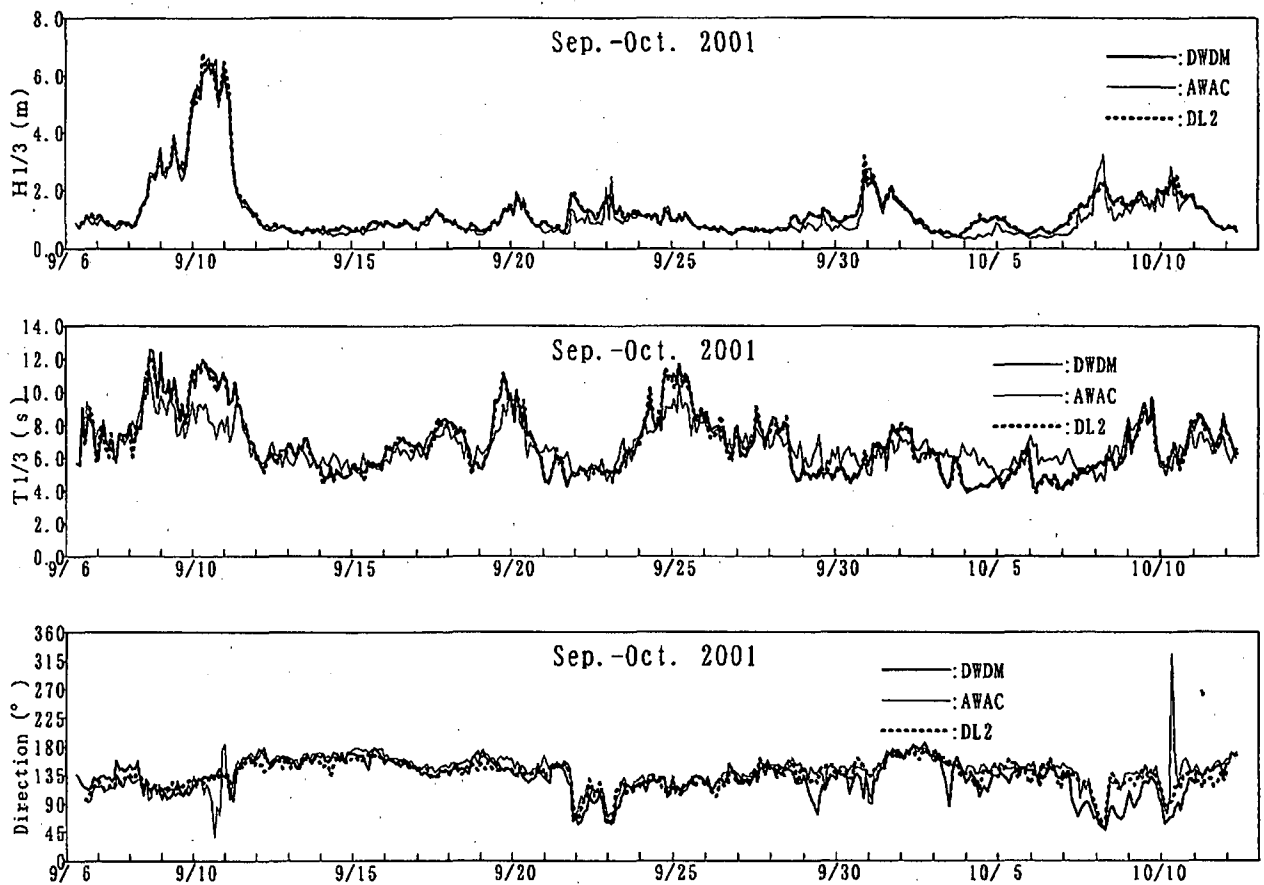


図-2 有義波高・周期・平均波向の経時変化

海象計やDL2に比べて若干小さくなっていることについては、水圧計測と表面波直接計測との相違であると推定される。これについては、周波数スペクトルとしての検討において考察する。

3種類の波浪観測機器は、有義波周期や平均波向の算定結果に関しても、概ね一致した値を出力している。しかし、9月10日から11日にかけての台風来襲時にAWACで算出される平均波向が急変する事象など、3者の波向算定結果は完全に一致するものではないので、こうした場合には、より詳細に方向スペクトルにおける比較が必要になる。

4. スペクトル解析による比較

(1) 方向スペクトルの検討

図-3は、台風0115号による高波浪時における方向スペクトルの演算結果を比較した一例として、9月10日0時の方向スペクトルを示したものである。ここで、0時の観測値とは、厳密に述べれば、9日23:50から10日0:10までの20分間のデータをもとに算定した結果である。

スペクトルに現れる0.08から0.09Hz（換算周期11から12s程度）の低周波側のSE方向からのピーク

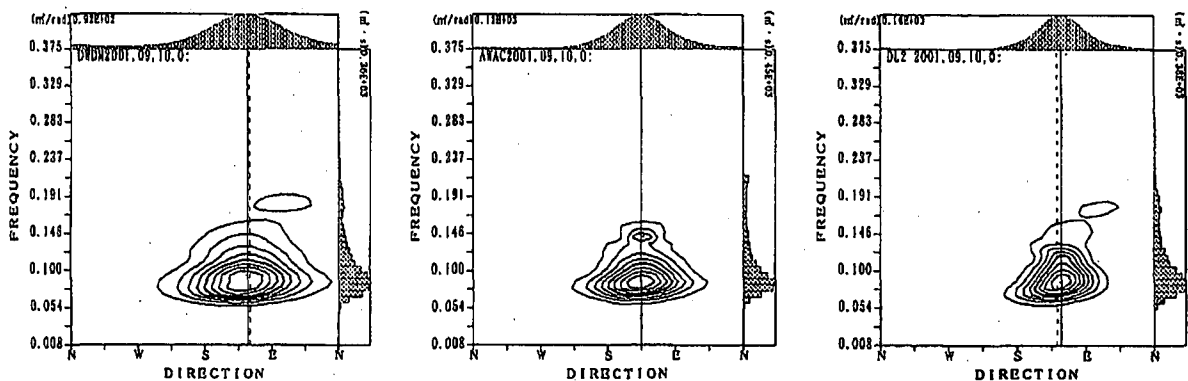


図-3 方向スペクトルの観測事例(2001.9.10. 0:00)

は3者に共通する。しかし、海象計とDL2に見られる0.18Hz程度（換算周期5-6s）のE方向のピークは、AWACでは顕著に現れていない。AWACの高周波領域の方向スペクトル推定には課題が残されており、今後の機能改良が必要と考えられる。

(2) 周期帯表記による記述

方向スペクトル情報は、情報量が大きすぎるため、その経時変化を直感的に理解するための表記が極めて困難である。ナウファスは、風浪・うねり・長周期波の特性表示を、周期帯毎のスペクトルのパワーに対応する換算成分波高を用いている^{9), 10)}。

風波における有義波高は、式(1)で述べたように周波数スペクトルの積分値の平方根とほぼ一致することを類推して、式(2)を算出して周期帯換算波高とする。ここに、スペクトルの積分周波数帯は、式(3)に示す b_1 から b_2 の区間として設定する。

$$H_b = 4m_b^{1/2} \quad (2)$$

ここに、

$$E_b = \int S(f)df = \frac{1}{2} \sum a_i^2 \quad (i=b_1, b_2) \quad (3)$$

表-3は、ナウファスにおける周期帯区分を示したものである。ここに、スペクトル順位は、FFT法で計算され、平滑化された周波数スペクトルの値を低周波側から並べた順位を意味する。すなわち、0.5s間隔でサンプリングされた2048データを解析すると、1024の周波数に関してスペクトルパワーが出力され、対応周波数は、

$$f_i = \frac{i}{1024} \quad i=1, 2, 3, \dots, 1024 \quad (4)$$

として示される。スペクトルの平滑化にあたって、8周波数毎の平均値を取るようにすると、周波数の数は128に減少し、対応周波数は、

$$f_n = \frac{n}{128} \quad n=1, 2, 3, \dots, 128 \quad (5)$$

となる。表-3のスペクトル順位は、 n の値である。

表-3 周期帯の区分とスペクトル順位

周期帯	順位	周波数 (Hz)	対応周期 (s)
f_1	1-4	1/128-4/128	30-
f_2	5-8	5/128-8/128	15-30
f_3	9-12	9/128-12/128	10-15
f_4	13-16	13/128-16/128	8-10
f_5	17-30	17/128-30/128	4.3-8
f_6	31-128	31/128-128/128	-4.3

表-3では、 f_1 から f_6 までの6区分を考えている。ただし、 f_1 は、周期30s以上の長周期領域であり、20分間を単位とした波浪ファイルではなく、2時間を単位とした長周期波ファイルの中で表記が行われるためダミー周期帯として処理される。また、 f_6 は、周期が短く（対応する波長が短く）、海象計によって方向スペクトルの算定が困難とされる周期帯である。

(3) 解析結果

図-4は、 f_2 から f_6 までの各周期帯における換算波高および平均波向の経時変化を、検討対象期間中の異なった気象擾乱に関して、それぞれ示したものである。図中の折れ線は、3種類の波浪観測機器によって得られた周期帯換算波高の経時変化を示し、図の上部の矢印は、周期帯毎の平均波向を示している。なお、この矢印の長さは換算波高に比例させており、換算波高が25cm以下となる場合は、矢印を記していない。ここでは、以下の3種類の典型的な事例について、それぞれ3日間づつの解析結果を紹介する。

- ①台風0115号の影響による波浪の発達期からピーク時点までの期間（9月8日-10日）
- ②周期の短い風波の発達したものの、周期の長い波浪成分は低かった期間（9月21日-23日）
- ③はじめに周期の短い北東からの風波が発生し、続けて南からのうねりが来襲したため、双峰型の方向スペクトルが見られた期間（10月7日-9日）

(4) 考察

①9月8日-10日について

この期間中、図-2で示す有義波高は、3種類の波浪計で、よい一致を示している。図-4における周期帯換算波高についても、各周期帯で期間中の波高は、3者は概ねよく一致している。ただし、エネルギーの最も高い9月10日の午後、比較的周期の短い f_6 の周期帯（周期6-8sに対応）で、水圧計測から換算波高を算定するAWACの観測結果は、超音波によって海面の上下変動を直接計測している海象計やDL2に比べて、少し異なっている。海底の水圧変動から表面波形を推定する精度は、一般的には周期の長い成分ほど高く、表面から海底までの水粒子の運動減衰が大きくなる周期の短い成分では推定精度が低下することが原因である。

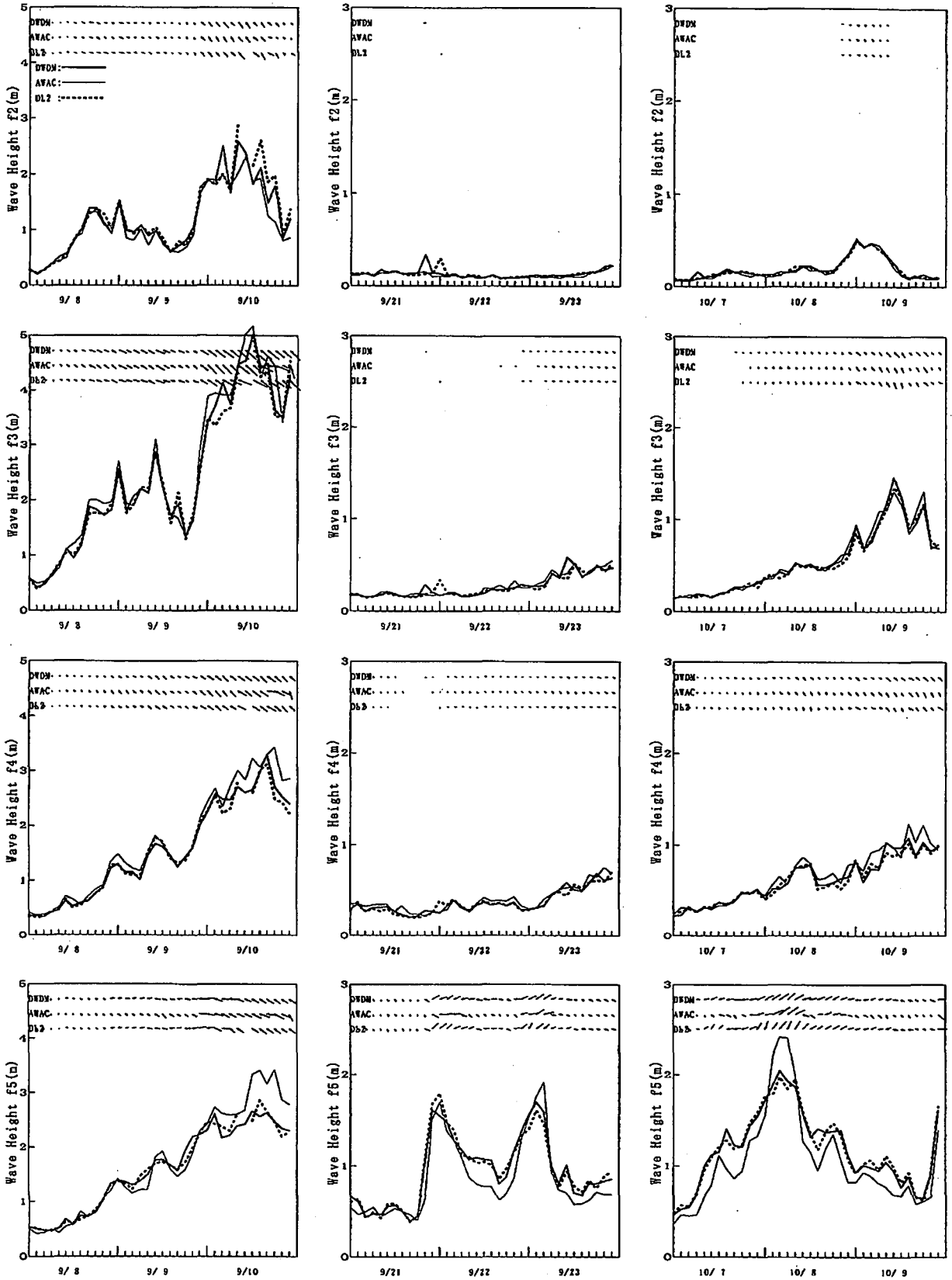
図-4に示す平均波向に関しては、波浪エネルギーが極大となる10日午後から11日未明にかけて、AWACによって観測された平均波向が、大きく変動していることが注目される。すなわち、AWACでは、各周期帯に共通して、9月10日の10時頃から18時頃にかけて海象計やDL2の波向よりも反時計回り（北側）にずれており、9月10日の22時になると時計回り（南側）にずれている。4段階のすべての周期帯でこのようなずれが見られたのは、AWACのセンサーの固定法に問題があり、センサーの方位が安定して

いなかった疑いが高い。こうしたAWACによって算定される波向の大きな乖離事象は、10月10日の6時から10時頃にかけても見られた。断定的に原因をセンサーの動揺と特定するのは困難だが、今後、条件が

整えば、より堅固な固定法で追加検証実験を行いたい。

②9月21日-23日について

図-4の周期帯換算波高について見ると、この期



(1) 9月8日~10日

(2) 9月21日~23日

(3) 10月7日~9日

図-4 周期帯換算波高と平均波向の経時変化

間中の f_2 から f_4 の比較的周期の長い成分の換算波高は低く、比較的周期の短い f_5 の周期帯で、22日0時前後と23日4時前後とに、2回の換算波高2m弱の極大値が見られる。すなわち、この期間中の波浪エネルギーのほとんどは、周期8s以下の短周期成分であった。①で前述したように、水圧変動から表面波形を推定する換算精度は短周期成分ほど低下するので、こうした算定波高の若干の相違は、やむを得ないものと考えられる。

③10月7日-9日について

図-4の周期帯波高を見ると、時間変動は、各周期帯毎に異なっている。8日の4時頃の有義波高の極大値は、もっぱら周期の短い f_5 の周期帯のものであった。その後、周期の長い f_2 の周期帯(周期15-30sに対応)で換算波高50cm程度の極大値が9日0時頃に見られる。次に周期の長い f_3 (周期10-15sに対応)では、9日0時以降も換算波高は増加を続け、9日12時頃に1.5m程度の極大値を示し、その後は減衰している。図-4の上段の波向を見ると、8日の4時頃 f_5 の周期帯で見られる波向は、各機種とも北東からの成分であり、9日0時から12時にかけて f_2 および f_3 の周期帯で見られる波向は、各機種とも南からの成分であった。すなわち、この期間には、異なった方向からのうねりと風波が混在する双峰型の方向スペクトルが見られた。

図-2の有義波高を、3種の機種で比較すると、9日になると3者は概ね一致するものの、8日におけるAWACの有義波高は、海象計やDL2と若干異なった値となっている。これは、前述したように、周期の短い成分に関しては、水圧変動から表面波換算を行う精度が若干低下するためであろう。

5. おわりに

本稿では、極めて実施事例が少ない、異なる機種の波浪観測機器による同時観測データの比較結果を紹介した。その結果、3種の機種の観測結果は概ね良好な一致を示しており、波浪観測の信頼性(機器による相違は概して小さいこと)が、ある程度は確認できたものと思われる。ただし、条件によっては機種による差が出ることもあることが認められた。特にこうした相違が顕著になったのは、周期の短い波浪成分が卓越するような状況下における、海底水圧測定結果から表面波を推定する場合である。9月10日や10月10日の高波浪条件下で、AWACによる波向観測結果が極端に大きく変動していたが、この時、センサーが動揺していた可能性を否定できない。波向観測センサーの海底への固定法を、より堅固なものとするよう、今後の改善が必要であろう。

最後に、ここで紹介した現地実証観測を行うにあたって、国土交通省中部地方整備局清水港湾工事事務所のご協力をいただいた。また、沿岸海洋調査(株)には、波浪観測機器の設置および撤去作業を担務していただいた。ここに、改めて謝意を表する。

参考文献

- 1) Allender, J., Audunson, T., Barstow, S.F., Bjerken, S., Krogstad, H.E., P. Steinbakke, P., Bartdal, L., Borgman, L.E., and Graham, C. (1989), The WADIC Project: A Comprehensive Field Evaluation of Directional Wave Instrumentation, Ocean Engineering, Vol.16, No.56, pp.505-536.
- 2) Nagai, T. (2000), Turkey Sees Completion of Hydraulic Research Center, Ports and Harbours Vol.45, No.3, The International Association of Ports and Harbours, pp.37-39.
- 3) 合田良実監修, 海象観測データの解析・活用に関する研究会編集(2001): 波を測る(沿岸波浪観測の手引き), (財)沿岸開発技術研究センター, 212p.
- 4) 清水勝義・永井紀彦・橋本典明(1996): 沖波の方向スペクトルの出現特性(第2報) - いわき沖における7か年方向スペクトル統計, 港湾技術研究所報告第35巻第1号, pp.65-89.
- 5) 高山知司・橋本典明・永井紀彦・高橋智晴・佐々木弘(1992): 水中ドップラー式波向計(海底設置式波浪計)の開発について, 海岸工学論文集第39巻, 土木学会, pp.176-180.
- 6) 永井紀彦・橋本典明・浅井正(1993): 沖波の方向スペクトルの出現特性(第1報) - いわき沖の観測結果, 港湾技術研究所報告第32巻第2号, pp.45-113.
- 7) 永井紀彦(1997): ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)による我国沿岸の波浪特性の解明, 港湾技研資料 No.863, 113P.
- 8) 永井紀彦(1998): ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)の現況と今後の課題, 土木学会論文集, 巻頭論文(技術展望), 第609号VI-41, pp.1-14.
- 9) 永井紀彦・橋本典明・川口浩二・佐藤和敏・菅原一晃(1999): ナウファスの連続観測化による我国沿岸の長周期波の観測, 港湾技術研究所報告第38巻第1号, pp.29-69.
- 10) 永井紀彦・額田恭史・岩崎泰夫・久高将信(2002): 切れ目のない連続観測とスペクトル周期帯表示による全国沿岸の長周期波観測情報システム, 海洋開発論文集第18巻, 土木学会, pp.149-154.
- 11) 永井紀彦・小川英明(2003): 全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 2001), 港湾空港技術研究所資料No.1041, P86. 1970年版から2000年版までの波浪観測年報は、同様に港湾技研資料の下記ナンバーとして既刊. No.137, 158, 178, 209, 233, 258, 282, 311, 332, 373, 417, 445, 480, 517, 545, 574, 612, 642, 666, 712, 721, 745, 770, 796, 821, 859, 894, 926, 951, 988, 1017.
- 12) 橋本典明・永井紀彦・浅井正・菅原一晃(1993a): 海洋波の方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法(MEP)の拡張: 港湾技術研究所報告第32巻第1号, pp.3-25.
- 13) 橋本典明・永井紀彦・浅井正・菅原一晃・朴慶寿(1993b): 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第32巻第1号, pp.27-51.
- 14) 橋本典明・永井紀彦・高山知司・高橋智晴・三井正雄・磯部憲雄・鈴木敏夫(1995): 水中超音波のドップラー効果を応用した海象計の開発, 海岸工学論文集第42巻, 土木学会, pp.1081-1085.