

方向波スペクトルのハイブリッド型船上計測法開発

(その2)

——新開発方向波浪ブイ等による検証——

正員 平山次清* 正員 南 清和**
 学生員 平松真紀子*** 正員 河内 功****

Development of Hybrid-Type-On-Board-Measuring-System for Directional Wave Spectrum (2nd Report)
 ——Evaluation of the System by the Results of Newly Developed Directional Wave Buoy——

by Tsugukiyo Hirayama, *Member* Kiyokazu Minami, *Member*
 Makiko Hiramatsu, *Student Member* Isao Kawauchi, *Member*

Summary

We had already reported the developed results^① on the hybrid type on board measuring method of directional wave spectrum. This method utilize the measured ship motions including relative wave heights and also uses information by radar images on board. By this method, ocean wave characteristics can be observed automatically and quantitatively on board of a running ship. But more data is required for evaluating this method.

This time we report about the compared results with that of newly developed directional wave buoy, and also with the experimental results carried out in our towing tank for the improvement of the accuracy of our method.

1. 緒 言

著者の一人はかつて波浪の目視観測に代わるものとして、航行船舶が遭遇する方向スペクトルまで自動的に計測する船上システムを提案したが^{①,②} 問題点も残しており、模型実験も実施していなかった。本研究の前報^③ ではその問題点を解決し、実海域試験も実施し、その実用可能性を示した。定量的な検証としては長水槽での方向スペクトル波による模型実験により実施したが、実海域でその実用性を示すには信頼しうる別の方法で方向スペクトルまで含めて計測した結果と比較検証する事が望ましい。

特に目視観測では短波長域の波高の精度が悪い事が指摘

されている。その為に著者らは短期計測用の小型ブイを新たに開発し^④ 比較的短波長の波も捉えて検証に使用した。本論文はその検証結果および追加して実施した模型実験による検証結果を最適切り替え周波数の問題、最適なモード組み合わせの問題も含めて報告する。

2. 推 定 法

以下に示す方向スペクトルの推定法は船、ブイ両者とも浮体運動をもとにしてMLM(最尤法)により推定するもので、基本的には同じといえる。但し、前進速度が無視出来るブイと異なり、船体運動から求める方法は船速が大きく影響し、特に追い波から斜め追い波で出会い周波数と絶対周波数の間の一対一対応が無くなる困難さがあったが、この点については幾つかの提案^{③,④} があり、著者らも前報で解決策を提案し^⑤、既に適用している。

相対波高、加速度も含めた船体運動により遭遇波浪の方向スペクトル $S(\omega_0, \theta)$ をMLMにより推定する手法の詳細については前報^⑤ にあるので、ここでは結論の式のみを(1)式に示す。

* 横浜国立大学工学部
 ** 東京商船大学商船学部
 *** 横浜国立大学大学院
 **** 千代田化工建設(研究当時横浜国立大学大学院)

原稿受理 平成9年7月10日
 秋季講演会において講演 平成9年11月14, 15日

$$S(\omega_{01}, \theta) = \frac{1}{H^{*T}(\omega_{01}, \theta, V)\Phi^{-1}H(\omega_{01}, \theta, V)}$$

$$S(\omega_{02}, \theta) = \frac{1}{H^{*T}(\omega_{02}, \theta, V)\Phi^{-1}H(\omega_{02}, \theta, V)} \quad (1)$$

$$S(\omega_{03}, \theta) = \frac{1}{H^{*T}(\omega_{03}, \theta, V)\Phi^{-1}H(\omega_{03}, \theta, V)}$$

ここで Φ はモード間のクロススペクトルのマトリクス (6モード使用の場合 6行×6列), H は応答関数の列 (6×1) である。上付の*は共役, Tは転置, -1は逆行列を意味する。波との出会い角を指定した場合一つの出会い周波数に対応して3つのラインスペクトルが得られる。これは(1)式の周波数応答関数の中の絶対周波数の添え字 1, 2, 3 に示されるように, 出会い周波数に対応する三つの絶対周波数 ((2)式参照) に対応しており, 周波数応答関数はそれぞれの絶対周波数に対応するものを使用すれば良い。

$$\omega_e = \left| \omega_0 - \frac{\omega_0^2}{g} V \cos \chi \right| \quad (2)$$

ブイによる場合は基本的には(1), (2)式で船速 $V=0$ とすれば良く, 三価関数の問題は無い。ここでは本学のレーザ波面計の解析⁷⁾ とほぼ同じやりかたとした。

3. 新開発小型方向波浪ブイ

安価で手軽に使用可能な方向波浪ブイが見当たらないため, 当研究室では新たに“短期計測用方向波浪ブイ”を開発し, 実船試験に使用した。ブイの詳細については参考文献⁶⁾ を参照されたい。ここにはその概要を述べるに留める。原理的にはピッチ・ロールブイ³⁾ に属するが, 一人で運搬可能で小型折り畳み式, 安価である点が特徴である。即ち本体は波面に完全に追従するようにフーティングのついた超軽量三脚型としその頂点に加速度, 角度センサーを防水搭載し2方向の波傾斜及び上下加速度を計測した。データは三脚の中心下に没水させた電源用円筒ケース (電源ブイ) 内のデジタルレコーダにコードで導き記録した。短期計測用と言う事で特に係留は考えていないが, 実際には回収用の目印ブイ (係留なし) に繋がれた。超軽量のため実験水槽で造波した波にも追従できるが, 実海域計測でも短波長の

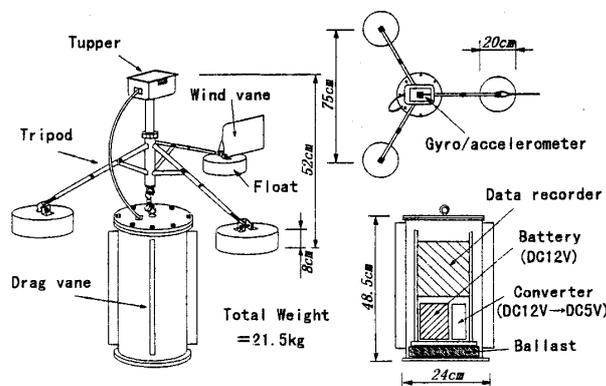


Fig. 1 Newly developed small directional buoy.

波によく追従するため, スペクトルのモーメントで平均周期を求めると, 大型のブイに比べて平均周期が短めに出る傾向がある。

Fig. 1 に外形図を示す。フロートの間隔は 75 cm, 電源ブイはほぼ没水する様にバラストを入れるので空中重量は三脚, フロートも含めて計測時には全体で 21.5 kg となっている。なおデータのサンプリング周波数は水槽実験, 実海域実験ともに 10 Hz としている。

4. ブイとの比較結果 (レーダ, 波浪追算も含む)

新たな実船試験による計測は東京商船大学の沙路丸 ($L_{pp}=46$ m, $W=785$ ton) を使用して都合 3 回実施された。それぞれ, 1996 年 7 月 31 日, 11 月 27 日, 11 月 28 日である。その時のブイのみの結果については既に報告されている⁶⁾ が, ここでは船体運動による結果と比較した。また, 波浪追算, レーダによる結果とも比較した。船体主要目は前報⁵⁾ と同じなので省略する。

Fig. 2(a) に三回のテスト海域および計測ポイントを示す。船首付近に設置した 3 本の超音波式相対波高計の位置も図中に示した。

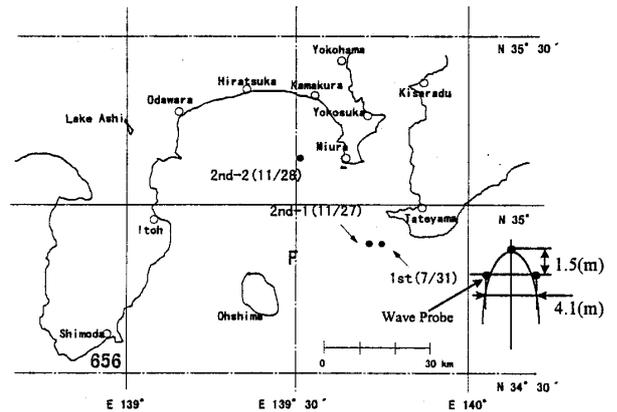


Fig. 2(a) Field test area and three points of measurement. On board relative wave probes are also illustrated.

Fig. 2(b) にブイと波浪追算との比較を示す。横軸が方位, 縦軸が周波数で両者共同スケールとした。全体的には追算の結果は波浪ブイの傾向と合っていると見えるが, より高周波数まで捉えているのが本波浪ブイの特徴である。追算では方位の刻みは 22.5 度, 周波数は 0.04 Hz から 0.25 Hz までを 0.01 Hz 刻みで分割している。即ち 4 秒以下の短周期部分は考慮していない。また 4 秒以下のスペクトルが必要な場合は標準スペクトルで外挿するようである。

有義波高については, 本ブイによる結果がそれぞれの計測日毎に 1.57 m, 1.21 m, 1.11 m に対して追算による結果が 2.58 m, 1.05 m, 0.97 m と, 一回目のウネリが卓越した状

Contour Line

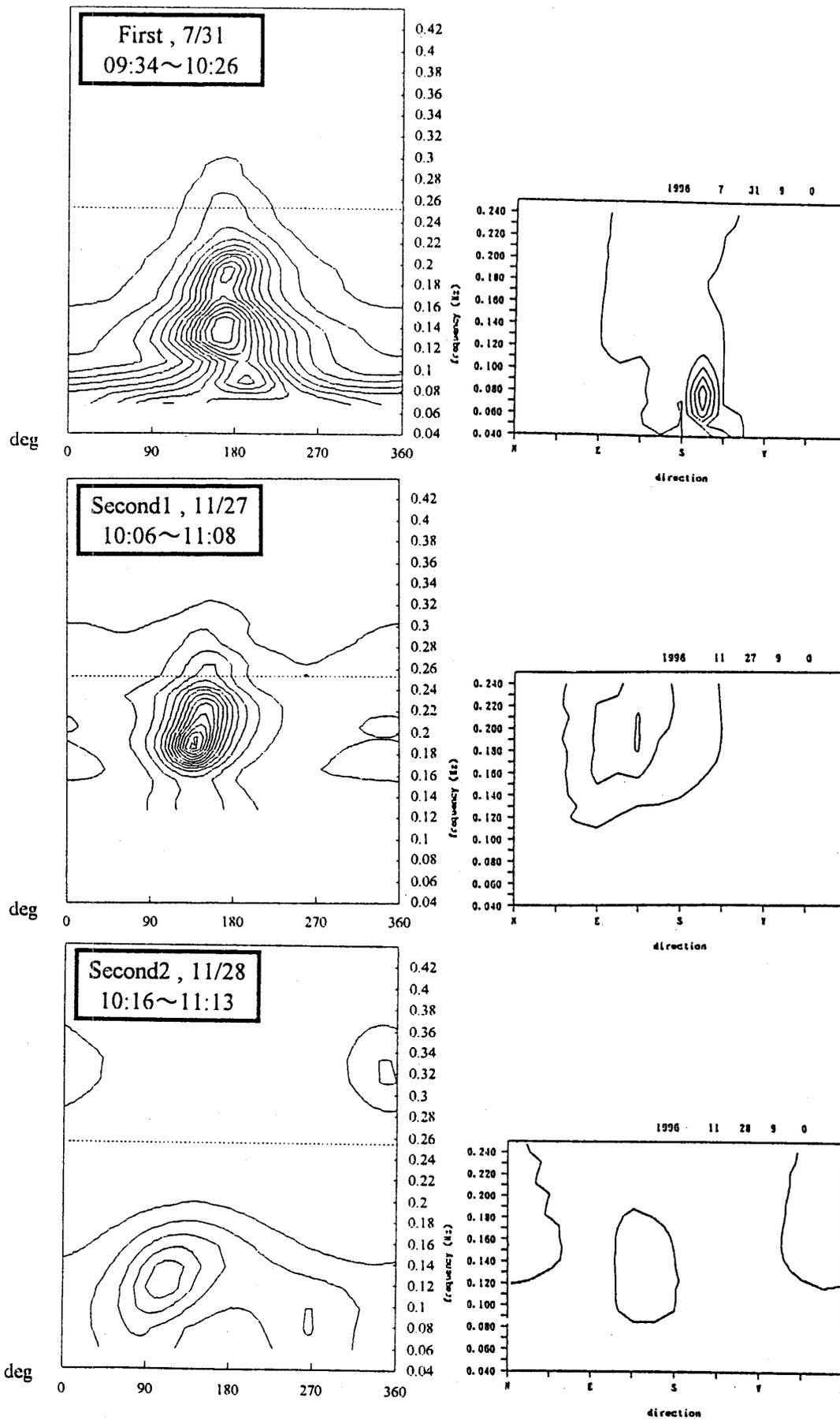


Fig. 2(b) Comparison of directional spectra by buoy (left) with that by hind cast (right).

態では、直径1.2 mの大型漂流ブイ（都合により一回目のみ投入）による有義波高1.4 mに比べても追算による結果がかなり大きめの推定となっている。

次に Fig. 3(a)および Fig. 3(b)に、船体運動 (Ship) による推定結果と小型ブイ (Buoy) による結果を、左右のペアとして並べて、方位角と周波数の極座標表示で示す。

船体運動データのサンプリングは2 Hzで、ピッチ角、ロール角、船首上下加速度、3カ所の相対水位変動 (Fig. 2(a)参照) を記録した。船体運動による推定では模型実験で良い結果が得られた切り替え絶対周波数 (5節参照) の実船対応周波数 (1.2 rad/sec, 5.24 sec) で切り替えた結果を示した。なおスペクトルは等高線を5度おきの点の集合で表示した

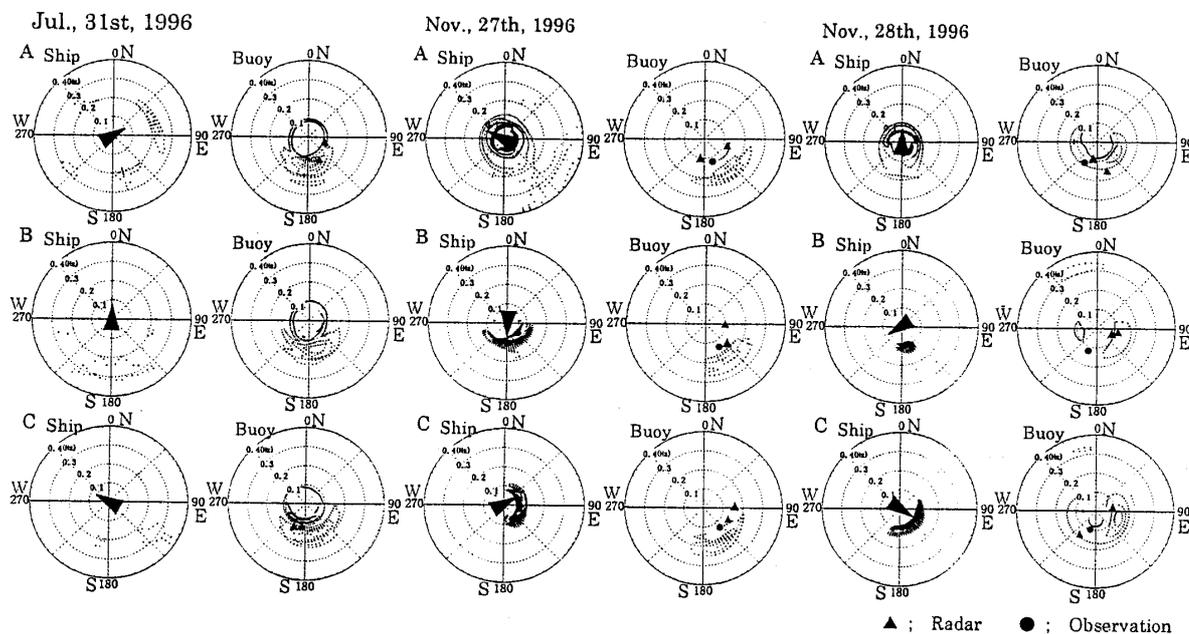


Fig. 3 (a) Estimated directional spectra.

Ship courses are shown by triangles at each origin.

Left ; by ship motions (Switching frequency 1.2 rad/sec (0.19 Hz)) ($V=8$ knots)

Right ; by small buoy ($V=0$), by radar image and visual observation.

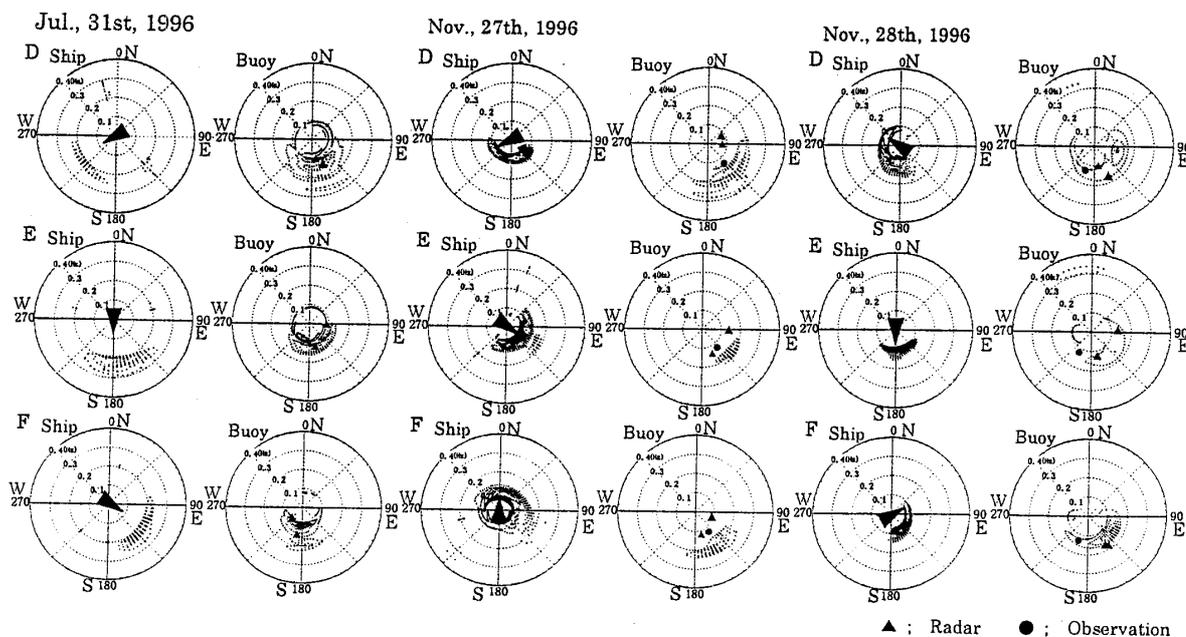


Fig. 3 (b) Estimated directional spectra. Ship courses are shown by triangles at each origin.

Left ; by ship motions (Switching frequency 1.2 rad/sec (0.19 Hz)) ($V=8$ knots)

Right ; by small buoy ($V=0$), by radar image and visual observation.

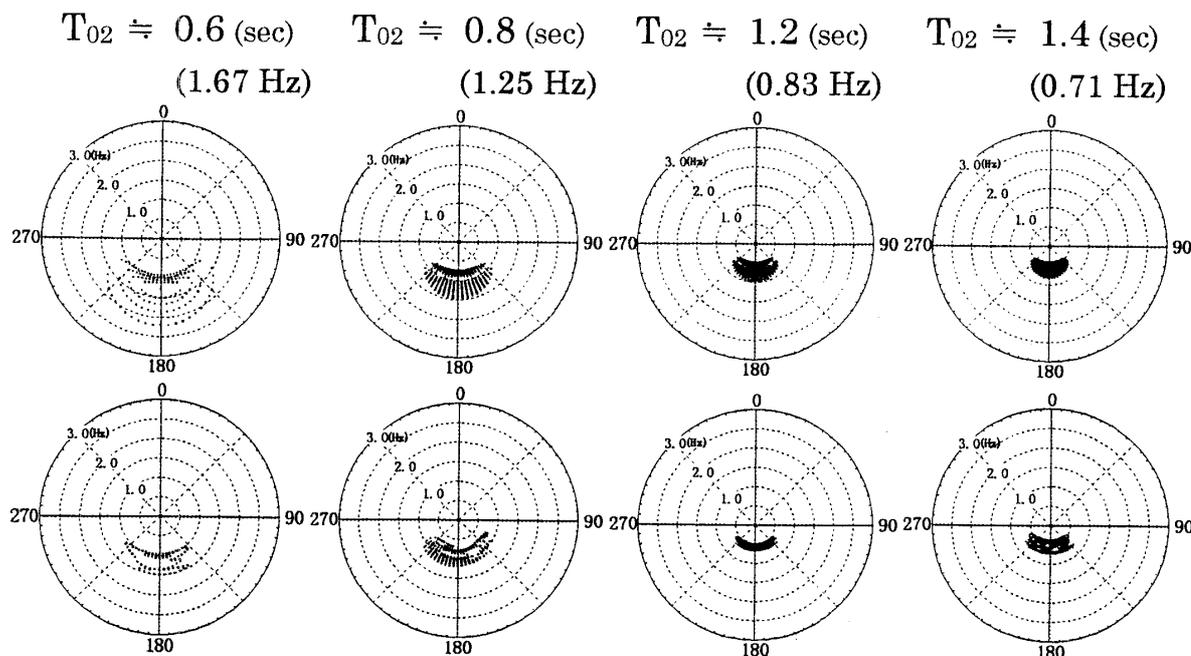


Fig. 4 Directional wave Spectra in polar coordinate

Upper; Expression of ITTC ($\cos^2 \chi$)Lower; Comparison with measured result by Laser wave surface probe ($V=0.0$ m/s)

が、見やすい様に最大値の1/3以下の低レベルの裾野部分は表示をカットした。半径方向が周波数軸、円周方向が波の絶対方位(波が来る絶対方向)である。記号AからFはそれぞれの実験日の針路に対応させているが、実験日によって針路は異なる。針路は船型を図の原点に入れて示した。ブイの結果には船用レーダ画像から二次元フーリエ変換で求めた波数スペクトルのピーク位置を、高い方から二つ選んで黒三角形で示した。また黒丸印で目視結果も示した。

三回とも船速は8ノットで船の状態もほぼ同一である。船はブイのまわりを60度毎に針路変更をしつつ約1時間かけて廻った。従って波との出会い角は6種類、各レグ当たり7分程度(行程は約1.7 km)となる。従って出会い波の山数は、平均周期5秒の波だと向かい波状態で約130山程度、追い波状態では約40山程度で、追い波状態ではかなり少ない。

全体的に各レグ毎のブイ(漂流状態)の結果が安定しているのに対して、船体運動による結果に変動が見られ、特に追い波、斜め追い波状態で推定精度が落ちており、出会い山数の問題も考慮しつつ、追い波状態での三価関数の問題以外にまだ改良する余地がありそうである。なお周波数切り替えなしの場合も、模型試験の結果と異なり実船試験ではそれほど違った結果にはならなかった。ただし7月31日の結果は、切り替えなしの場合にはかなり高周波数側のスペクトルが卓越し、分布も安定していなかった。この場合、船首上下加速度が0.01 gのオーダーで非常に小さかったので、船首加速度を抜いた5モードデータで解析した結果はかなりブイのデータに近くなった。これは7月31

日の波浪が九州南方にあった台風によるうねり性の波であって周期が長く、従って加速度も小さくその計測精度も悪かった事によると推定され、船体運動モードの最適組み合わせを考える時の判断材料になりうる結果である。

レーダによるスペクトルピーク方位も概ねブイによる結果と一致していると言えるが、一枚の画像では向きは分かるが方位は分からないので、方位まで一意に決定するには文献¹⁾のようにレーダの時間差画像の相互相関をとる必要がある。

またピーク対応の波長から換算した周期も、ブイよりは全体的に長目となっている。なお一次元スペクトルおよび方向分布関数についても求めているが、ここでは省略する。但し有義波高、平均周期については6節で触れる。

5. 切り替え周波数の検討

本手法では短波長域(高周波数)の波も精度良く推定出来る事を狙っている。

一方、高周波数領域では船体運動が消滅するので吉元⁴⁾の様に相対波高を使用することが考えられる。そこで応答関数の特性を考慮して、適当な周波数で推定に使用する運動モードを切り換える事を提案した⁵⁾訳であるが切り換え周波数の違いによる推定結果の違い、上下加速度あるいはピッチを外した場合など、組み合わせモードの違いによる推定結果の違い、などについては検討不足であった。ここでは切り替え周波数の影響を水槽試験と実船試験について検討する。

Fig. 4 に比較の為に ITTC 標準方向スペクトル (コサイ

ン2乗型)の等高線を極座標表示した例および、長水槽で造波した方向スペクトル波(ねらいはITTC標準形)を前進速度無しで本学のレーザー式波面計で計測推定した結果を示す。

平均周期は0.6 secから1.4 sec(実船で2.5 secから5.8 sec)まで変化させている。この場合もピークの1/3以下の裾野部分はカットしているが、長水槽に於ける方向スペクトル造波でほぼ標準形方向スペクトルが再現出来て

いると言える。

5.1 極座標表示スペクトルで見た場合

Fig. 5(a) (向かい波) および Fig. 5(b) (追い波) に模型試験において切り替え周波数の変化(縦方向)に伴う推定結果の変化を示す。横方向には波の平均周期を変えている。先の標準形と比較して、また有義波高, 平均周期, なども総合的にみて, 上から3段目の絶対周波数 4.95 rad/sec (0.79 Hz) での切り替えが良いと判断できる。即ちこの切

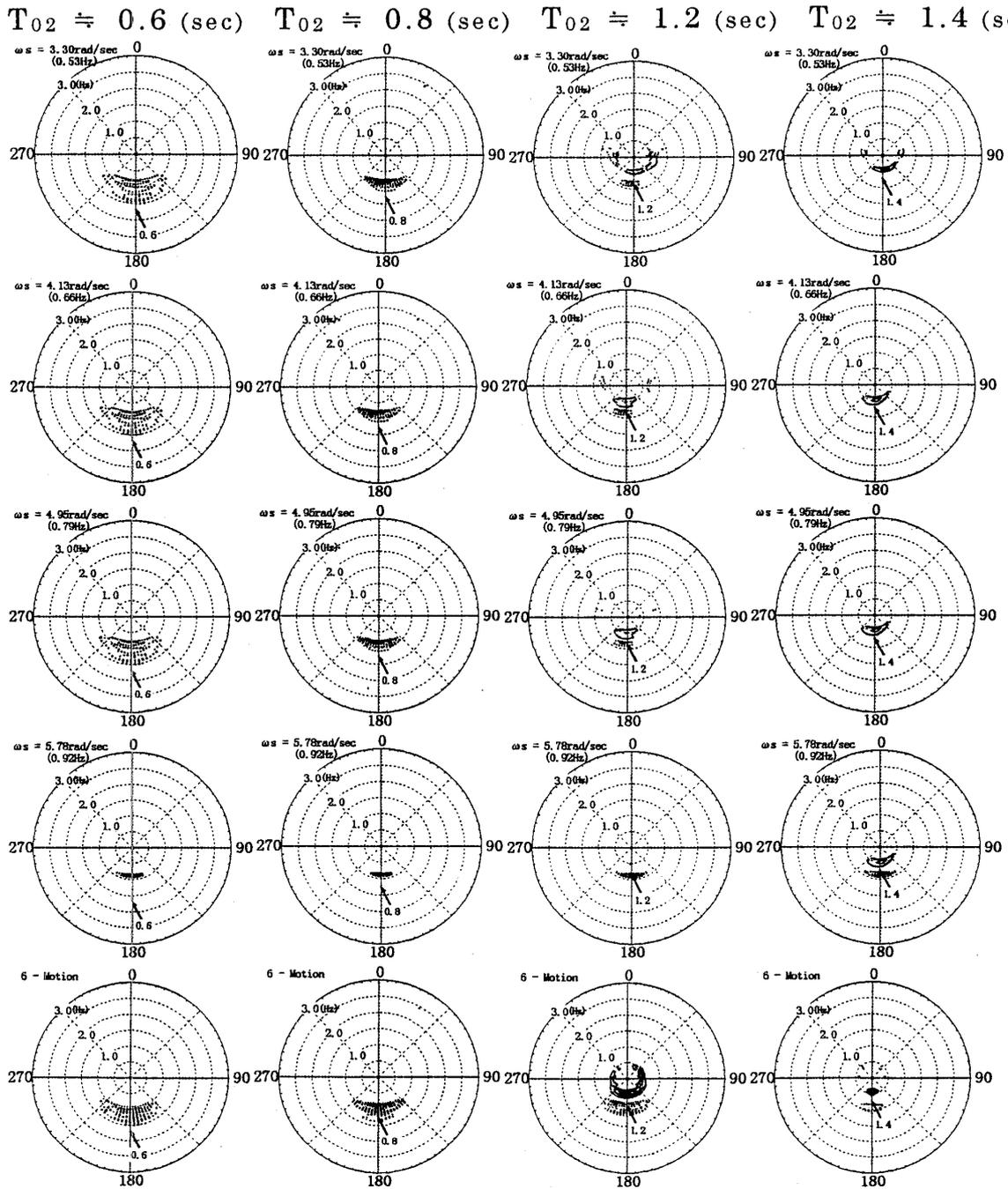


Fig. 5(a) Effect of switching frequency on the estimation (Model, Short Crested Heading Wave, V=1.0 m/s) Switching frequency corresponds to 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 rad/sec in actual ship scale

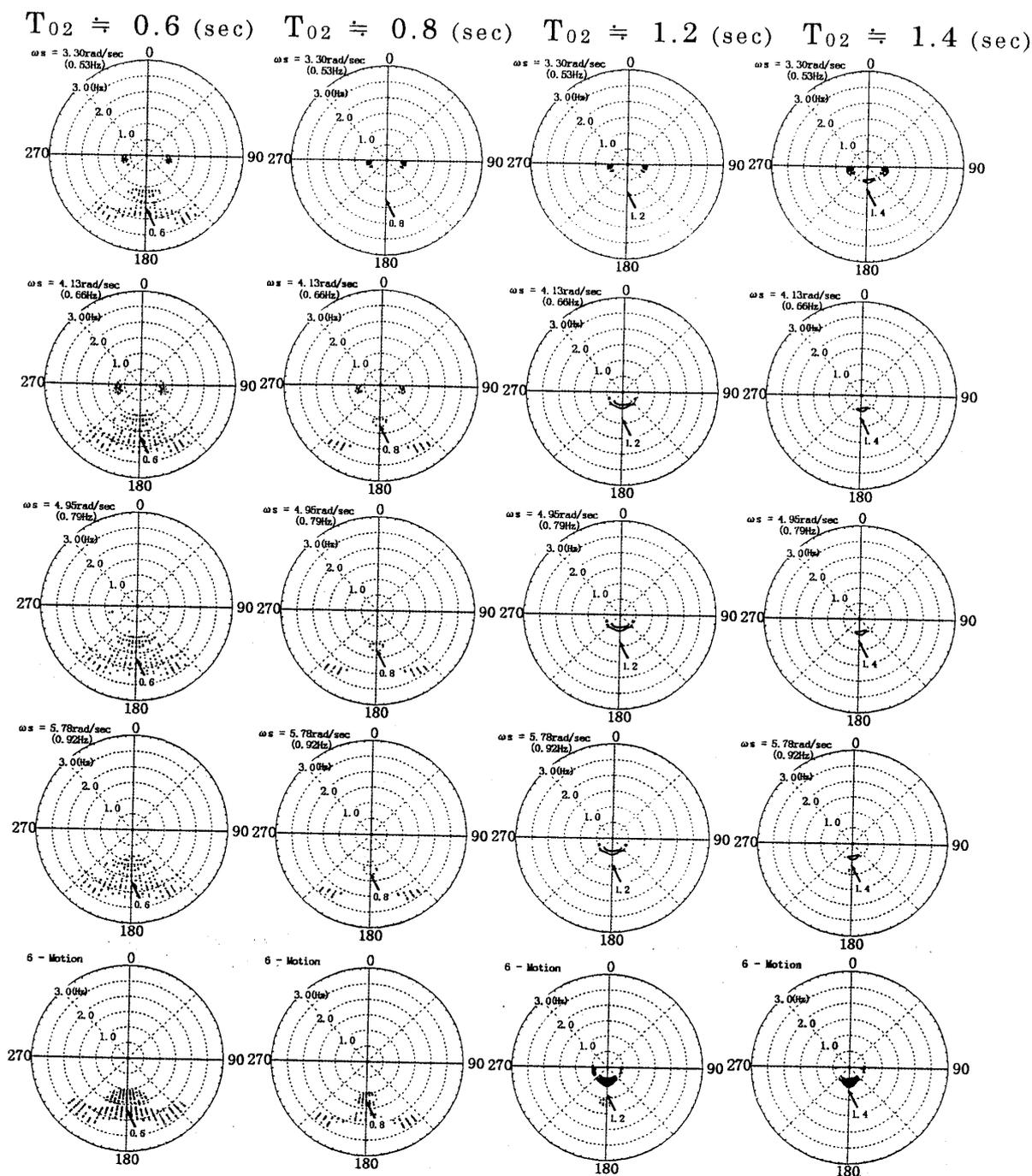


Fig. 5(b) Effect of switching frequency on the estimation
 (Model, Short Crested Following Wave, $V=1.0 \text{ m/s}$)
 Switching frequency corresponds to 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 rad/sec in actual ship scale

り換え周波数以下の周波数ではピッチ，ロール，船首上下加速度の3モードを，それ以上の周波数では相対波高（船首および船首近くの両舷）の3モードを推定に用いる場合である。この切り替え周波数は応答関数の振幅でもピッチ，船首上下加速度と相対波高についての大小関係が入れ替わる周波数に対応している。但し追い波中で短周期の波では実船試験結果と同様切り替えてもあまり精度が良くない。なお追い波中では1回の出会い山数が平均周期1.0

秒では，20程度なので10回航走した平均を示した。

実船試験のデータについて同様な切り替えをした。ここでは図は省略するが，実船試験では切り替え無し（6モード使用）でも推定結果に大きな変化はなく，どちらかというとも6モード使用の方が極座標表示の方向分布は良い様であった。これは1つには実船試験での波の平均周期が水槽試験時より長目であって相対波高が効く波成分が少なかったことが効いていると思われる。

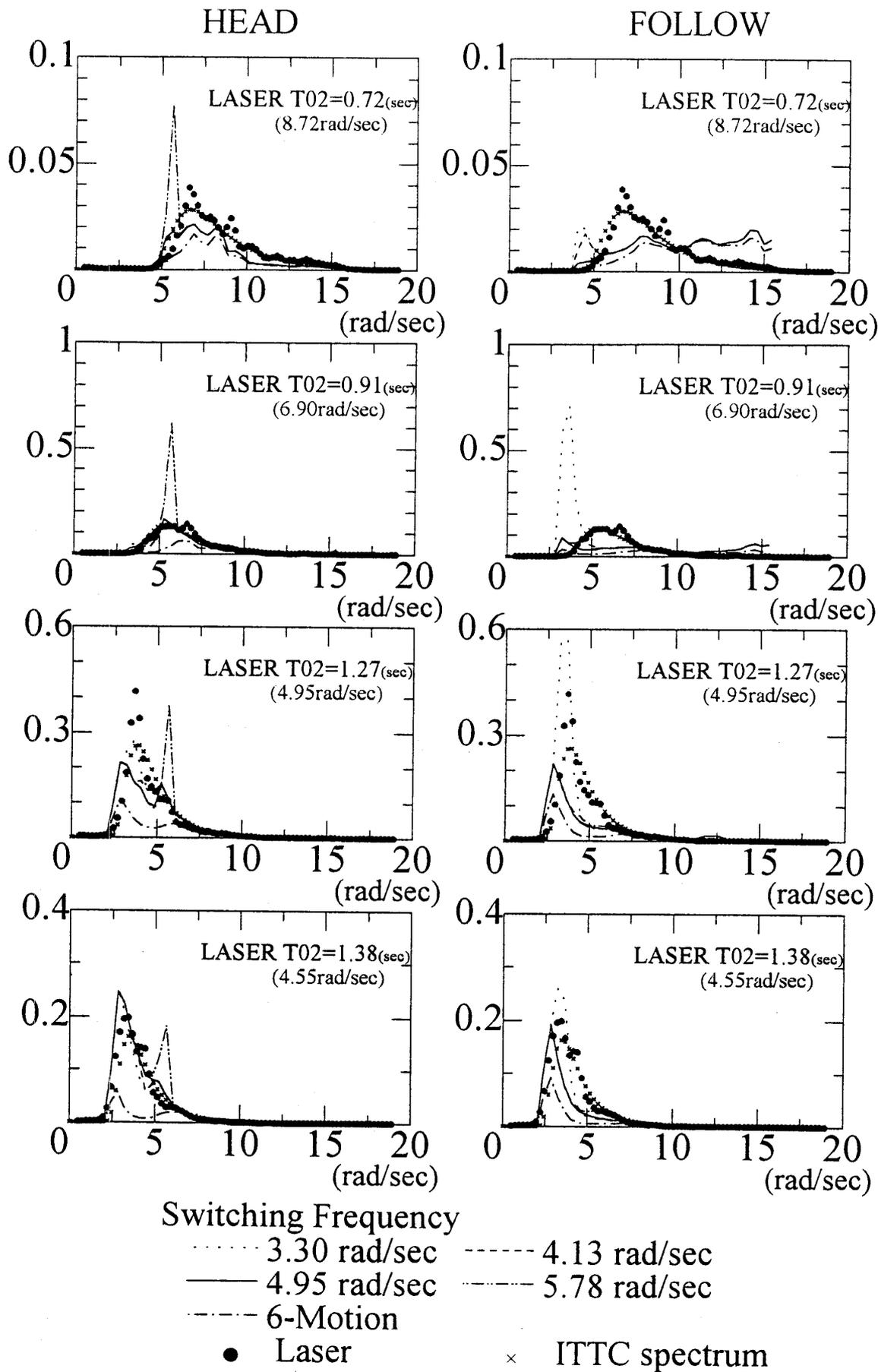


Fig. 6(a) One-dimensional spectra (Model, Short Crested Wave, V=1.0 m/s)

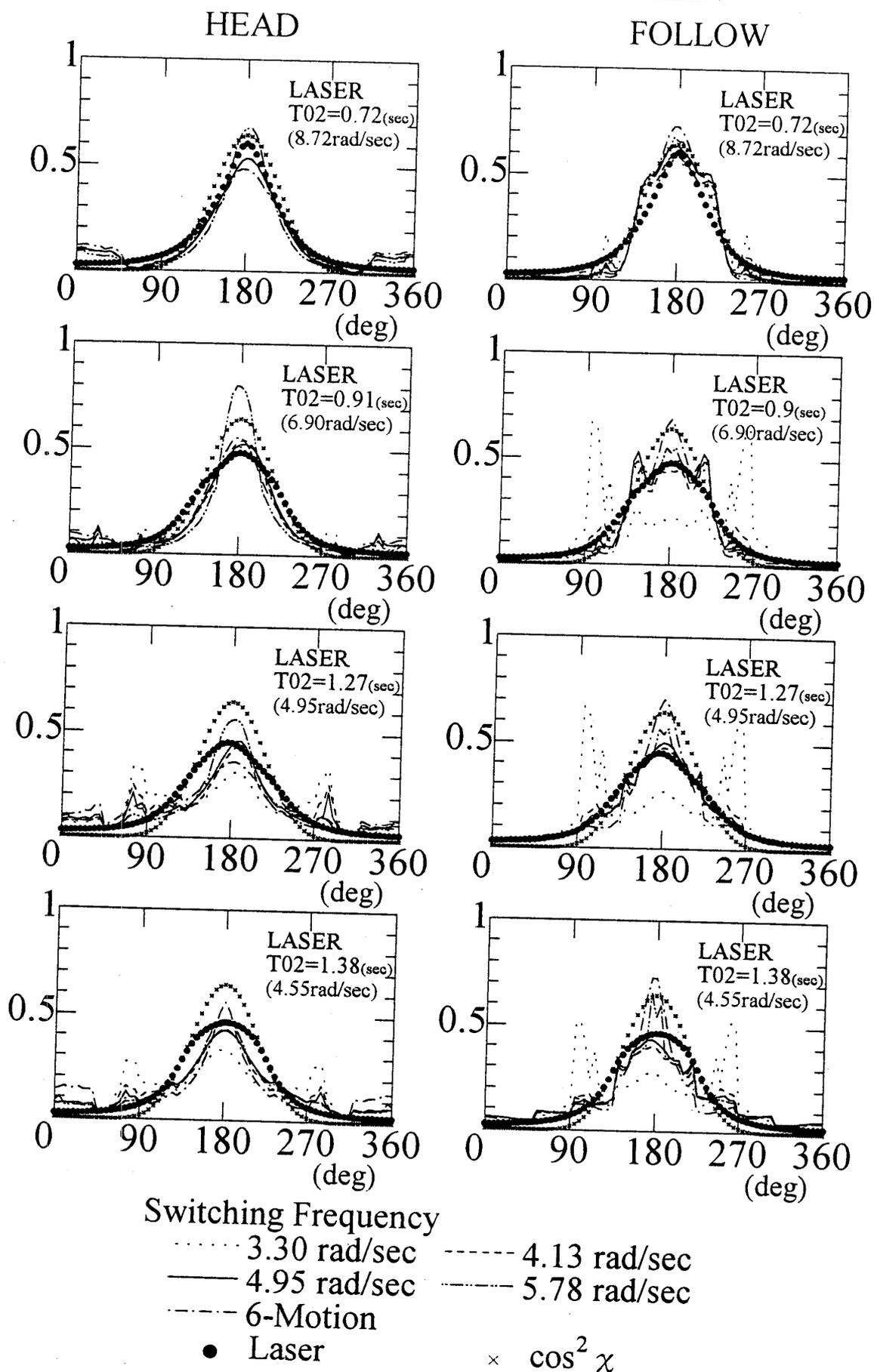


Fig. 6(b) Directional Distribution Function (Model, Short Crested Wave, $V=1.0$ m/s)

5.2 一次元スペクトル, 方向分布, 有義波高, 平均周期
で見た場合

切り替え周波数の影響を1次元スペクトル, 方向分布関数の面から見る為に, Fig. 6(a)にレーザ式波面計による結果と船体運動(水槽実験)による推定1次元スペクトルとの比較, Fig. 6(b)に同じく方向分布関数の比較を示す。各々にレーザ式波面計による結果, および参考の為にITTCスペクトルも示した。1次元スペクトルについては, 向かい波中(Head)は比較的レーザ式波面計と一致しているが短周期の追い波(Follow)中は良くない。なお方向分布関数は

絶対方位に直しているため向かい波, 追い波ともに180度(造波機方向)にピークをもつ。

Fig. 7(a)に水槽試験結果として有義波高および平均周期のレーザ式波面計との相関を示す。全体的に短波頂波(Short)の方が長波頂(Long)よりも相関が良く4.95 rad/secで切り換えた場合が特によい。また Fig. 7(b)に実船試験(6方位航走で1時間程度)の結果を横軸に針路をとって示す。縦軸はパイによる結果で規格化した。

7月31日は先にも触れたように加速度精度の影響の大きい6-Motionによる結果がパイよりかなり小さめ, 低周

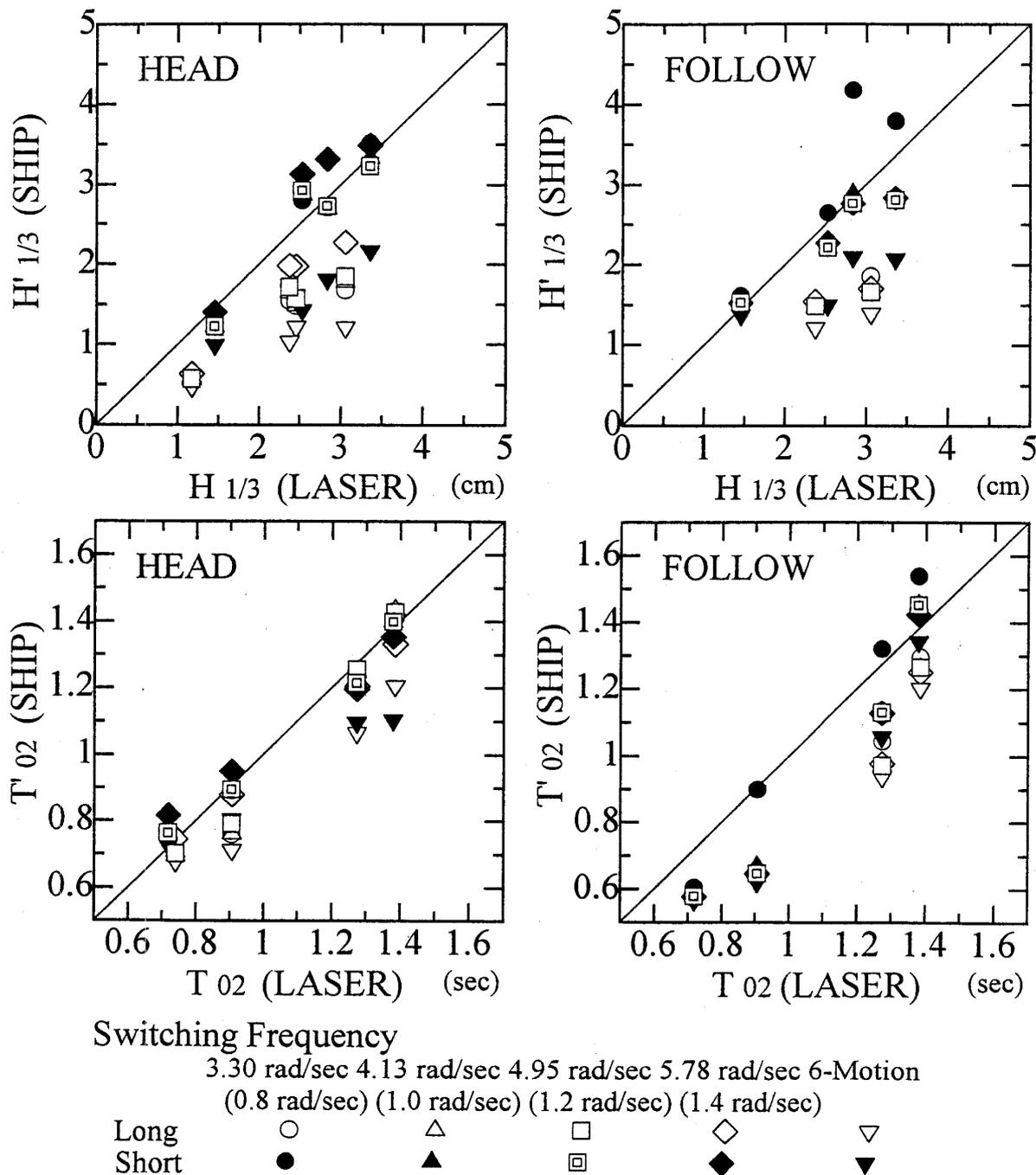


Fig. 7(a) Estimated results of $H_{1/3}$ and T_{02} (Model, $V=1.0$ m/s)

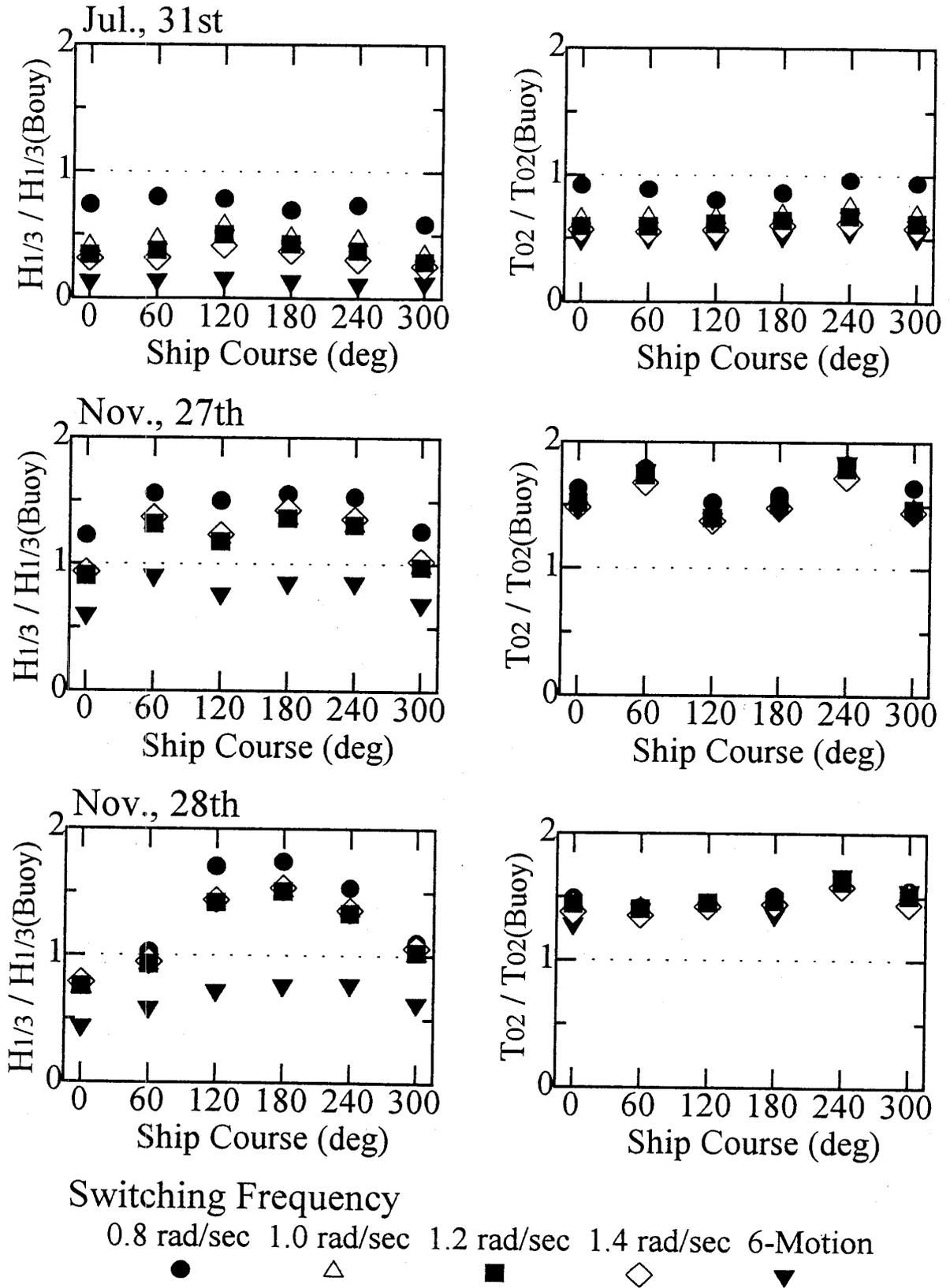


Fig. 7(b) Estimated results of $H_{1/3}$ and T_{02} (Field test, $V=8$ knots)

波数側でモードを切り替えた場合即ち、加速度データをあまり使わない場合が大き目となっている。平均周期については切り換えによる差が小さい。他の2回については、6-Motion に対して切り換えによる違いは比較的小さい。特に平均周期は殆ど一致しているが、これは当日の波が比較的長周期で切り換え効果が少なかったものと考えられる。

6. 運動モードの組み合わせ

運動モードをいくつとれば良いか、その組み合わせは何か良いかという問題も検討すべき課題である。今回最適組み合わせについては結論が出ていないが、組み合わせを変えた場合の結果の違いについて幾つか検討した。

Fig. 8 に、実船試験の場合について6モード、6モードから1モード抜いた5モードの場合、周波数切り替えをした場合(3モード使用に相当)の推定結果の違いについて示す。縦軸はブイによる推定値で規格化している。但し7月31日は除いた。有義波高、平均周期はどちらもモードを一つ抜くと値は大きくなる。また6モード使用に対して周波数1.2 rad/sec で使用モード切り替えた場合は50%位大きくなるが全体的な評価としてブイを基準とした分散から求めた標準偏差(Fig. 9)は同程度であり有義波高については上下加速度を抜いた方がむしろよい結果となっている。但し、相対波高を3つとも抜いた場合は誤差が大となる。

また平均周期のブイを基準とした分散から求めた標準偏差はピッチ、上下加速度を抜くと大きく変化する。即ち、平均周期を考えるとピッチあるいは上下加速度は欠かせない。また方位を判別しうるロールも欠かせないと考えられる。

7. 結 言

新開発の小形方向波浪ブイは比較的安定した結果を示し、方向波スペクトルのハイブリッド型船上計測法の検証に使用可能と考えられたため、実船試験に投入して、主として船体運動による波スペクトル推定結果の評価、検証を試みた結果以下の結論を得た。

- 1) 船体運動による方向スペクトルのMLM(最尤法)推定については向かい波から横波状態では、1次元スペクトル、方向分布関数ともにかなり良好な推定が期待できる。
- 2) 一方、追い波、斜め追い波状態ではまだ信頼性に欠ける点が見られる。これは水槽試験でも見られた為出会い山数の問題も含め、検討する余地がある。
- 3) 使用モードの切り換え周波数については、汐路丸の実船については大略1.2 rad/sec (5.24 sec) が良いとの結論がえられたが、これは船体運動の周波数応答関数との関連で見ると、剛体運動と相対波高の大小関係の切り替わる周波数に対応している。但し実船試験では有義波高について

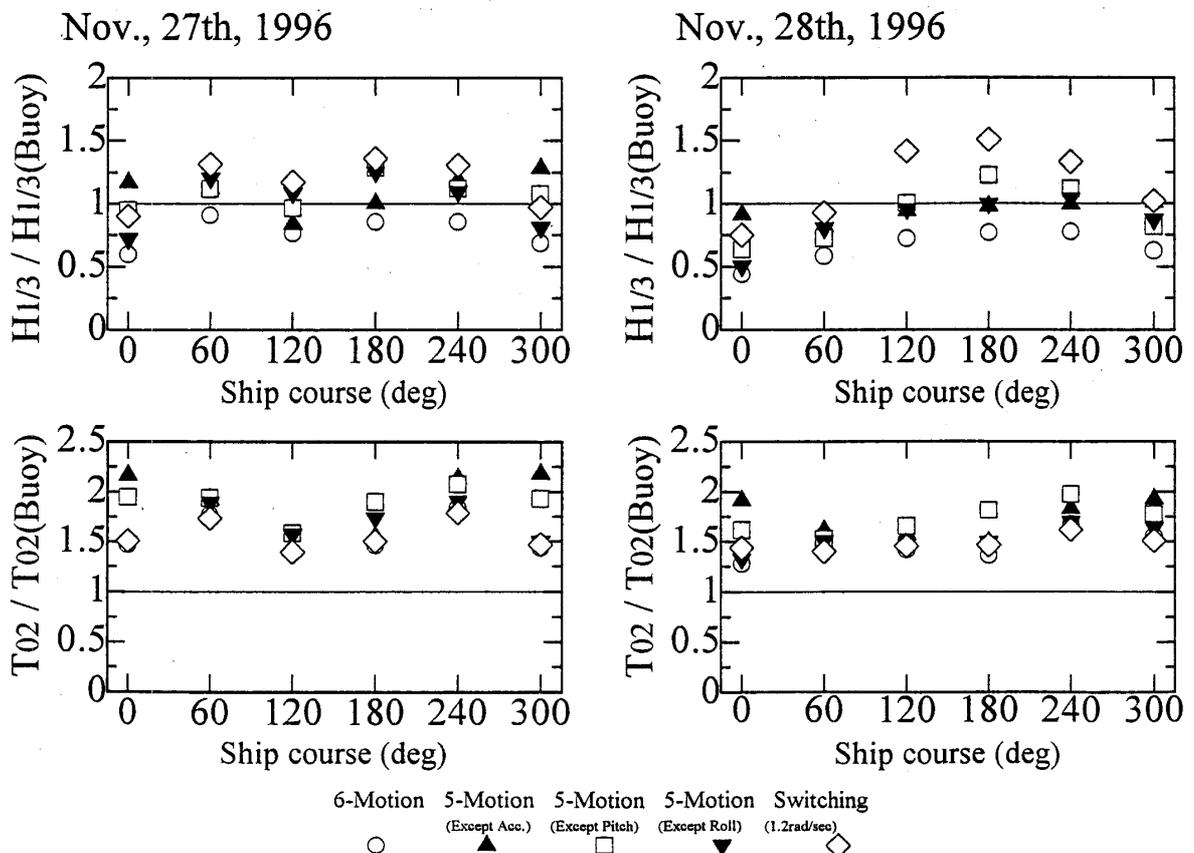


Fig. 8 Effect of one mode exclusion on estimated results (Field test, V=8 knots)

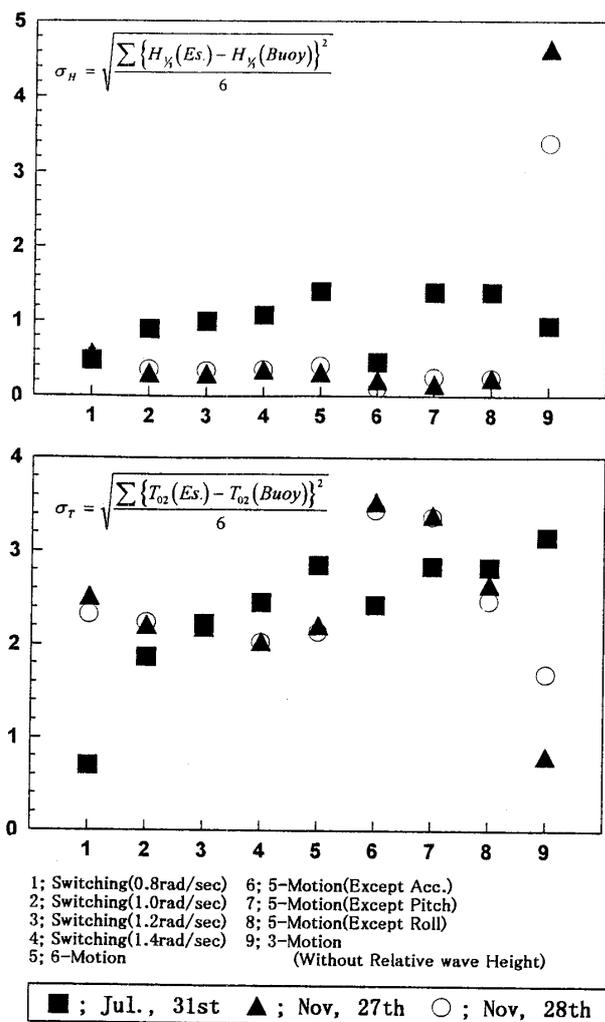


Fig. 9 Standard deviation of $H_{1/3}$ and T_{02} based on buoy results. (Field test, $V=8$ knots)

は、切り換え周波数の値を変えた場合の変化は大きくなかったが、これは水槽試験時に比べて平均周期が長めで切り換え効果の少ない海象であったことによると思われる。

4) 実船試験における組み合わせのモードについては今回の6モードに対して、3モード(周波数切換による)でも有義波高は高めとはなるが比較的安定した結果が得られた。但し、相対波高をすべて除いた3モードでは有義波高に大きな誤差を示した。これは、本手法における相対波高の重要性を示していると考えられる。

その他、本手法では周波数応答関数が重要であるが、過渡水波を使用した水槽実験ではNSMによる応答関数が前報³⁾でも示した様に比較的良好な結果をしめす。但し相対波高の高周波数成分については実験でもバラツキが多いため、更に検討が必要である。今回はNSMによる結果を

前提として種々検討し、本推定手法を用いた場合に得られる結果の相対的な評価はし得たと考えられるが絶対評価には更に応答関数の詳細な比較、実船試験の積み重ねなどが必要である。

謝辞

本報告で検証の対象とした実船試験はSR 233の一環として実施されたもので、データの公表を許可頂いた造船研究協会およびご意見を頂いた伏見委員長、内藤主査、山野幹事はじめ委員の方々に謝意を表す。また東京商船大学の芋生秀作船長をはじめとする汐路丸の乗組員の方、大型漂流ブイ、回収漁船など種々便宜を図って頂いた同じく東京商船大学の大津皓平教授、庄司邦昭教授、井関俊夫助教授、波浪追算等を担当して頂いた日本気象協会の山本、仲井氏にも謝意を表したい。なお小形波浪ブイは当研究室で開発したもので、開発および実海域計測における本学の宮川清、高山武彦氏の貢献に対して、また日頃学生の指導をしていただいている馬寧助教授、及び模型試験、実船試験ともに当研究室の大学院および学部学生諸君の積極的な協力があつた事を付記し謝意を表す。

参考文献

- 1) 平山次清：航走中の船体運動による海洋波スペクトルのリアルタイム推定(その1)―実船試験―、関西造船協会誌、第197号、1985、pp. 97~125
- 2) 平山次清：航走中の船体運動による海洋波スペクトルのリアルタイム推定(その2)―方向スペクトルの推定、関西造船協会誌、第204号、1987、pp. 21~27
- 3) 井関俊夫、大津皓平：船体運動データを用いた方向波スペクトルのBayes推定(第2報)、日本造船学会論文集、第176号、1994、pp. 99~105
- 4) 吉元博文、渡辺巖：航走する船舶が遭遇する方向波スペクトルの推定法について、日本造船学会論文集、第176号、1994、pp. 107~116
- 5) 平山次清、南清和、平松真紀子：方向波スペクトルのハイブリッド型船上計測法開発、日本造船学会論文集、第180号、1996、pp. 295~309
- 6) 平山次清、河内功、宮川清、高山武彦：短期計測用波浪ブイの開発、関西造船協会春季講演会前刷、1997、May、pp. 99~104
- 7) 竹沢誠二、宮川清、高山武彦、板橋正康：レーザー光線群による方向スペクトル波計測、日本造船学会論文集、第166号、1989、pp. 173~185
- 8) Longuet-Higgins, M. S., Cartwright, D. E., and Smith, N. D.: Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy, *Ocean Wave Spectra*, 1961, pp. 111~136