レーザー光線群による方向スペクトル波計測

正員 竹 沢 誠 二* 正員 宮 川 清*
 高山 武 彦* 正員 板 橋 正 泰**

On The Measurement of Directional Wave Spectra by the New Wave Measuring System using Laser Beams

by Seiji Takezawa, *Member* Kiyoshi Miyakawa, *Member*
 Takehiko Takayama Masahiro Itabashi, *Member*

Summary

The wave measuring system applying laser beams for wave surface probes were recently developed by Experimental Tank of Yokohama National University. Laser spot projectors are set as the wave probe array under water, and He-Ne laser beams are projected vertically upward from each projectors. Images of laser spots on the wave surface are taken by a video camera, and that video pictures are processed and the digital informations of wave heights or wave slopes are obtained from processed video signals. These measured timeseries converted to the wave timehistories of multi positions by a personal computer in real time, and the directional wave spectrum is estimated by the Maximum Likelihood Method. Moreover the hard copies of 3-D graphs of directional spectra are got immediately.

In this paper, principles of these new measuring systems and related numerical calculus are mentioned. And the measured examples in the Experimental Tank of Yokohama National University by these systems are shown.

Consequently, these new systems showed the excellent abilities and performances.

1. 緒 言

耐航性試験に使用する人工水波は、従来造波装置の制約から長波頂水波を用いて行なわれるのが一般的であるが、一方、実海面は短波頂不規則波であり、方向スペクトル波として表わされる。従って、波浪中模型試験においてもその使用水波は、方向スペクトル波であることが望ましい。そして近年方向スペクトル波が発生可能な造波装置を有する試験水槽が世界的にも増えつつあり、日本においては最近の例として横浜国大長水槽があげられる¹⁾²⁾。しかし発生波の方向スペクトル実測例として発表されたものは、依然としてわずかであり、方向スペクトル波の発生法と対をなすべきその、計測法、および解析法は、実用の域に達しているとは言えない状況である。

横浜国大では Photo. 1 に例として掲げた方向スペクトル波発生装置によって造波された方向分布関数の概略特性

がわかっている短波頂不規則水波を測定することによって水中から発射されるレーザー光線群を利用した 2 種の新型非接触式波浪計測装置及びその方向スペクトル解析プログラムを開発した。

本論では横浜国大長水槽に発生させた方向スペクトル波をこれらの計測システムで測定し、解析した結果を引用して新しく開発したレーザー光利用の方向スペクトル計測、解析法について述べる。

2. レーザー式波高計群

レーザー光線を用いた変位計測装置は種々の既製品があるが、そのいずれもが固体面に照射されたレーザービームのスポットを測定対象にしている。しかし波高計は測定対象が透明な液面であるのでこの方法は適用できない。本研究では Fig. 1 に示したように、水中から垂直上方へ向けてレーザー光を発射する複数の He-Ne レーザービーム発射器を平面配置し、斜め上方から一つのモノクロ CCD-TV カメラによって水面上のレーザービームのスポットをまとめて撮像する方式によって水面上の複数位置の波高情報を

* 横浜国立大学

** 横浜国立大学大学院工学研究科

Photo 1. Artificial directional spectrum wave generated in a towing tank.

Fig. 1 Block diagram of the wave measuring system applying laser beams for wave surface probes.

まとめて一画面上に計測する方式を開発した。レーザービームは本報では最大5本使用し、5本の波高計群を構成している。これを斜め上方から撮像し、この画面を画像処理装置を通して、時々刻々に読み、波高情報を得る。画像の例を Photo. 2 に示す。この画像処理装置は、CCD. TV カメラによって撮影されたレーザービームの画像を白黒に2値化しその境界と画面左端の画面上における距離を読みとり、デジタルで出力するものである。このため波高測定方向が画像の分解能が高い TV 画面の横方向（走査線方向）になるように TV カメラを設置してある。任意の走査線（すなわち画面上の任意位置）について読み取り可能と

なっているので、任意の位置にレーザービームを多数設置することが可能である。また TV 画面は画像処理する前に、標準型 VTR に録画する方式をとった。したがって画像の時間間隔すなわち計測時間間隔は最短で各チャンネル 1/60 sec である。水槽試験時には通常 1/10 sec 程度のサンプリング時間がとられるので、十分な性能を有する。

Fig. 2 にレーザー波高計群の測定原理を図解した。本図は TV カメラの垂直中心面上に投影した 2 次元表示になっている。基準レーザービーム O はカメラ中心面内にあり撮像画面上では画像上下中心付近の水平走査線にある。

ビーム O が測定する水面の上下変位 Δh_0 は次式で演算

2ch になっている。従って 2ch は (1) 式, 1ch, 3ch は (2) 式によって水面上下変位に換算している。2ch と 3ch は平行に配置されているのでまったく同じ波形を示しているが 1ch はごく僅か異なる波形になっている。しかし、各々のパワースペクトルの形状は一致しており (1), (2) 式による算定が正しいことがわかる。

なお、従来型の容量式アナログ波高計群と同時計測を行ない、レーザー波高計システムの検証を行なったが、測定精度、安定性などすべての点で本システムが優れている事が判った。

本システムの特徴を以下に列記する。

- 1) 波高の検出にレーザービームを用いており、非接触計測であるので、原理的に高精度、高安定測定が可能である。
- 2) 船型の水槽試験などで、不可欠な航走時の山会い波浪の測定では、非接触式波高計は走行により波面を乱さないので、より大きな長所となる。
- 3) レーザービームの増設だけで波高計の数を簡単に増すことができ、必要ならば 10 本～20 本の波高計群の採用もでき、その場合でも記録・解析装置はこのままでよい。
- 4) 固定位置における測定では大水深でも水槽底にレーザービーム発振器を固定しておくことが出来る。
- 5) 土木系の水理実験のように水深の浅い場合、水底にレーザービーム発振器を埋め込み高精度測定が可能である。
- 6) レーザービームを用いているので実海面での夜間測定が可能である。

3. レーザービーム式波面計

水波の波傾斜とは波形の局所勾配 (Gradient) を言い、ある短波頂波面は一つの固定位置ではある瞬間に波高と波傾斜ベクトルで表わされる。試験水槽における不規則長波頂波の波傾斜測定の例としては文献 (3) 等があるが、短波頂水波についてその長さ方向 X 、幅方向 Y の 2 成分の波傾斜計測の例は、短波頂不規則水波が発生可能となったのが最近の事であるためほとんど前例がない。

本研究では水中から垂直上方に発射される一本のレーザービームを用いて、任意の一点における波高と X 方向、 Y 方向の 2 つの波傾斜成分を同時に計測できる波面計を開発した。この新波面計の計測原理を Fig. 4 に示した。前出のレーザー波高計群で使用するレーザービーム一本に注目する。水中から垂直上方に発射されたレーザービームは水中から空中へ入射する際に、次式に示すような屈折率で屈折する。

$$\text{屈折率 } n = \frac{\sin r}{\sin i} \quad (3)$$

i : 入射角 r : 屈折角

$n=1.33$ (水の場合)

この屈折したレーザー光線を、水面上に設置した半透明白色スクリーンに投影する。この投影されたレーザービームのポイントを、上方からモノクロ CCD. TV カメラでとら

Fig. 4 Measuring principle of wave elevation and wave slopes on the laser wave surface probe.

Photo 3. Images of laser wave surface probe obtained from X-Y tracker in still water condition (a) and in measuring condition (b).

えると、Photo. 3 に示した例のような画像が得られる。立体角が動的に変化するので実際には不規則振動のリサーチの図形のように変化する。この画面を画像解析装置によって TV 画面上の 2 方向 (X, Y) の座標をリアルタイムで読みとる。このレーザービームのポイントの変位の X 方向成分と Y 方向成分、及び前出のレーザー波高計用 CCD. TV カメラでとらえた波高情報の同時計測結果から水槽中の一点における波高、及び X 方向、 Y 方向波傾斜成分のタイムヒストリーを求めることが出来る。

ここでは簡単のため Fig. 4 では 2 次元平面におきかえて考えている。水面が傾いていない場合、すなわち水平面の場合レーザーのポイントの像は O' にあるとすると、水面が角度 s だけ傾いた場合レーザービームは、水面上の点 O において屈折し、上方のスクリーン上の点 B にうつし出される。この変位量 R を上方の CCD. TV カメラによってとらえる。水面とスクリーンとの垂直距離 h は、平水時の垂直距離と同時計測しているレーザー波高計の計測データ Δh から求めることが出来る。

このときの X 方向の波傾斜 dz/dx を求めることを考え

Fig. 5 An example of measured time histories of long crested wave (a) and wave slope (b) by laser wave surface probe.

る。入射角 i と屈折角 r の関係は (3) 式である。水面の傾斜角 s とレーザビーム入射角 i は等しい事より、

$$\left| \frac{dz}{dx} \right| = \tan s = \tan i \quad (4)$$

(3) より、

$$r = \sin^{-1}(n \sin i) = \sin^{-1}(n \sin s) \quad (5)$$

また、

$$\tan(r-i) = \tan(r-s) = \frac{R}{h} \quad (6)$$

であるから

$$r = \tan^{-1}\left(\frac{R}{h}\right) + s \quad (7)$$

(5), (7) より

$$\sin^{-1}(n \sin s) - s = \tan^{-1}\left(\frac{R}{h}\right) \quad (8)$$

すなわち、(8) 式で n は既知量であり、 h は波高 Δh の測定値から求められているので、測定量 R から、波傾斜角 s が求められる。

この波面計によって計測された長波頂不規則波の波傾斜のタイムストリーの実測例を Fig. 5 に示す。水位変化と波傾斜の位相差が $\pi/2$ であることがよくわかる。

Fig. 6 にこのデータをそれぞれスペクトル解析し、波高のパワースペクトル (上図) から変換した波傾斜のスペクトル (中図) と実測した波傾斜のスペクトル (下図) を比較示す。中、下図のスペクトル形状、それから算定されて図中に示した各統計値ともほぼ一致している。またここには示さないが規則水波による初期の検討でも良い一致が得られている。以上の事から本研究で採用した波傾斜計測法は十分な精度を持つと言える。この波面計は 1 本のレーザビームで、実海面でも良く用いられているピッチロールブイと同等の情報が得られる⁴⁾。本報ではピッチロールブイとの対比の意味から一本の場合のみを扱ったが、容易に複数設置することが可能であり、また実用的には 2 本、あるいは 3 本用いるのが良いのではないかと考えている。また出会い波高計とする場合、レーザ発射部支持装置を前出の波高計群方式に比し非常に小型に出来る特色がある。なお本方式による波面計の前例は無い。計測システムとしての一般的な特色は前出のレーザ波高計群の場合と同じである。

Fig. 6 Analyzed spectrum of long crested wave (a) corresponding to timehistory of Fig. 5(a), wave slope spectrum transformed from above wave spectrum (b), and wave slope spectrum analyzed from timehistories of Fig. 5(b) & 5(c).

4. 波高計群方式による方向スペクトル推定

方向スペクトル波の観測手法は、Barber 以来色々な方法が論じられてきた。しかし試験水槽内に発生させた方向スペクトル波の計測においては、高精度の波高計による波高計群方式が最も適している。

波高計群方式によって計測されたデータから方向スペクトルを推定する手法としては、直接積分法、フーリエ級数展開法、最尤法などがある⁵⁾。

本報では、このうちでは、最も分解能が高いとされている最尤法 [MLM 法, Maximum Likelihood Method] を用いて方向スペクトルの推定を行なった。その推定式の誘導については文献 (6) に詳しいので、ここでは推定式のみを示すことにする。

N 台の波高計によって構成される波高計群方式に適用される最尤法による方向スペクトルの推定式は、

$$S(\omega, \theta) =$$

$$\frac{1}{\sum_m \sum_n \phi_{mn}^{-1}(\omega) \exp(-i(kY_{mn} \cos \theta + kX_{mn} \sin \theta))} \quad (9)$$

ここで mn は波高計の番号で5台使用した場合は1~5となる。 $\phi_{mn}^{-1}(\omega)$ は m と n の波高計の組み合わせから求めたクロススペクトル $\phi_{mn}(\omega)$ によって構成される行列 Φ の逆行列 Φ^{-1} の mn 成分を表わす。 $N=5$ の場合は次式になる。

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{15} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi_{51} & \cdots & \cdots & \phi_{55} \end{bmatrix}$$

また X_{mn}, Y_{mn} は波高計の座標 X_m, Y_m から

$$X_{mn} = X_n - X_m, Y_{mn} = Y_n - Y_m$$

である。

文献(6)によると最尤法は波高以外の各種の波動量の場合にも適用できるように一般的な形で示されている。その算式を本報の場合の1点における水面変動と2成分波傾斜が計測された場合に適用すると、方向スペクトルの推定式は次のように書ける。

$$S(\omega, \theta) = \frac{1}{\sum_m \sum_n \phi_{mn}^{-1}(\omega) \times (\cos \theta)^{p_m + p_n} \times (\sin \theta)^{q_m + q_n}} \quad (10)$$

ここで $\phi_{mn}^{-1}(\omega)$ は計測された波高及び2成分の波傾斜から求められるクロススペクトル $\phi_{mn}(\omega)$ を波傾斜の波高に対する応答関数 $H(\omega)$ で正規化した $\Phi_{mn}(\omega)$ で構成される行列 Φ の逆行列 Φ^{-1} の mn 成分である。すなわち

$$\Phi_{mn}(\omega) = \frac{\phi_{mn}(\omega)}{H(\omega) \cdot H^*(\omega)} \quad * \text{は共役複素数を表わす} \quad (11)$$

$m, n=1, 2, 3$ の場合には Φ は次のようになる。

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \Phi_{13} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \Phi_{23} \\ \Phi_{31} & \Phi_{32} & \Phi_{33} \end{bmatrix}$$

また波高と波傾斜の間の応答関数 $H(\omega)$ は

$$H(\omega) = G(\omega) \cdot (\cos \theta)^p \cdot (\sin \theta)^q \quad (12)$$

と書くことができ、微小振幅波理論によると $G(\omega)$ は

$$G(\omega) = ik \quad (k \text{ は波数}) \quad (13)$$

であるが本報では $G(\omega)$ の絶対値は次のようにして求めた。

$$|G(\omega)| = \sqrt{\frac{S_2(\omega) + S_3(\omega)}{S_1(\omega)}} \quad (14)$$

ただし

$S_1(\omega)$: 水位変動のパワースペクトル

$S_2(\omega)$: X 方向波傾斜成分パワースペクトル

$S_3(\omega)$: Y 方向波傾斜成分パワースペクトル

このようにして求めた $|G(\omega)|$ を使った場合の方向スペクトルの推定結果は(13)式より求められる $|G(\omega)|$ を使った場合より優れた結果を示した。また指数 p, q は m が波高の場合 $p=q=0$, m が X 方向波傾斜成分の場合 $p=0, q=1$, m が Y 方向波傾斜成分の場合 $p=1, q=0$ である。

以上の算法から類推される波高計配置に対する注意事項

を列記する。

- (1) 波高計を結ぶベクトルが同一とならない
- (2) そのベクトル距離の最小値が測定対象の最短波長の半分程度以下となる。
- (3) 波高計の本数は3本以上であること。

波高計配置は波高データの高精度測定と並んで、方向分布の分解能に大きく影響することが予想されるので、十分な検討が必要である。本報ではこれらの事を実験によって検証するため、悪い性能が予想される配置も含め波高計の配置は Fig. 7 に示す3種類の波高計配置とした。このうち(A)はさきに発表した文献(1)で用いられた形状と相似であるがより小型になっている。これらの波高計によって計測された波高データを適宜組み合わせ色々な配置について解析を行ない、一本のレーザ式波傾斜計を用いた計測解析結果と併せて比較検討を行なう。

5. 実験と考察

実験は横浜国大の長水槽で行なった。造波装置は16ユニットプランジャー式多分割造波装置を使用した。この造波装置による方向スペクトル波の造波については文献(1)に詳細が述べられているのでここでは割愛する。

使用水波: 本論で解析例として使用した水波は長波頂不規則波1種類、方向スペクトル波2種類とした。これらはいずれも不規則波のパワースペクトル $S(\omega)$ の形状は同一で、平均周期 $T_{02}=1.0$ sec, 有義波高 $H_{1/3}=5.0$ cm として造波信号が作成されたものである。

方向スペクトル波の与えた方向分布関数 $D(\omega, \theta)$ は θ のみの関数とし次式

$$D(\omega, \theta) = D(\theta) = D_0 \cos^{2n} \theta \quad |\theta| \leq \frac{\pi}{2} \quad (15)$$

$$D_0 = \frac{1}{\pi} \frac{2n!!}{(2n-1)!!}$$

において $n=1$ のいわゆるコサイン2乗分布および $n=2$

Fig. 7 Used patterns of wave probe array and their relative coordinates. (all units are in metre.)

Fig. 8 An example of measured timehistories of a short crested irregular wave from five laser beams.

のより狭い方向分布関数を用いた。波の主方向は水槽長さ方向である。

水波の計測位置は、造波装置から 40 m, 水槽センターライン上で計測装置は前出のレーザー式波高計群, 及びレーザー式波面計である。

方向スペクトルの推定には前述の通り最尤法を採用した。計測したタイムヒストリーから FFT 法によって各波高計間のクロススペクトルを算出し (9) 式または (10) 式に代入している。クロススペクトルの算出においてはその精度が方向分解能に大きく影響するため十分な重ねずらし平均を行なった。またスペクトルウィンドウはハニングウィンドウを用いている。以下の議論において方向分解能の検討は周波数別の方向分布関数 $D(\omega, \theta)$ と全ての周波数について平均した方向分布関数 $D(\theta)$ について行なう。

$D(\theta)$ は最初に算出される $D(\omega, \theta)$ を周波数について積分し正規化したものであり, ω にまたがる平均特性を与える。従って詳細な検討には $D(\omega, \theta)$ が必要である。また各図間の定量的な比較の基準として造波信号算出時に与えた方向分布関数を図中に破線で示している。なお, 本論ではこの関数と各図での実測特性との差に意味はないことに注意されたい。 $D(\omega, \theta)$, $D(\theta)$ の方向角の解析範囲は長水槽の消波ビーチからの反射成分の検討を行なう意味もあり, -180° から 180° の全方向とした。

(A) の不整形 5 本の波高計群によって計測された方向スペクトル波のタイムヒストリーの例を Fig. 8 に示す。このタイムヒストリーは前述のレーザー式波高計群によって計測された波高情報を (1), (2) 式によって水位変動量に変換したものである。データのサンプリングタイムは 1/20 sec である。図は記録の一部であり全タイムヒストリーは全ての実験とも 300 秒程度である。又このタイムヒストリーから FFT 法によって算出したパワースペクトルを比較

して Fig. 9 に示す。使用水波の造波信号算出時に与えたパワースペクトルはすべて同一のものであり, 造波装置の性能がよいことから本論で引用している実測水波のパワースペクトルはほぼこれに一致している。

以下に波高計群配置の差による方向スペクトル推定の差異について述べる。Fig. 10 は波高計を 2 本用いて長波頂不規則波を計測, 方向分布関数を求めた場合の $D(\theta)$ の例である。この場合, 2 つの波高計を結ぶ線は, 波の主方向に対して $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の 3 通りである。各場合とも方向分布関数の分解能は著しく低く, 波高計 2 本では方向分布関数は測定不能であることを示している。

Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13, はそれぞれ 5 本の波高計を用いた Fig. 7 の (A), (B), (B') の配置によって計測された方向スペクトルの解析例である。各々の図に於て, 左図が長波頂不規則波, 右図が短波頂不規則波を解析したものである。ここに両者のパワースペクトルはほぼ等しい。なお長波頂波の図では縦軸が 5 に圧縮されていることに注意されたい。長波頂のいずれの図でも $\omega < 3$ では方向分解能が著しく悪くなることが示されている。波高計配置に関する

Fig. 9 Power spectra of a short crested wave analyzed from timehistories shown in Fig. 8.

Fig. 10 An example of directional distribution of a long crested irregular wave analyzed from timehistories of two wave probes.

Fig. 11 Directional distributions of an analyzed wave spectrum using five wave probes of array pattern (A) in Fig. 7.

Fig. 12 Directional distributions of an analyzed wave spectrum using five wave probes of array pattern (B) in Fig. 7.

Fig. 13 Directional distributions of an analyzed wave spectrum using five wave probes of array pattern (B)' in Fig. 7.

(1)の条件を満たす不整形な配置(A)は左右、上下対称な配置(B), (B')に比べ明らかに優れた分解能を示している。また(B')は(B)を45°回転させただけの配置であるのにも関わらず推定される方向スペクトルはかなり違ったものになっている。

これらの結果を詳細に検討してみると $D(\omega, \theta)$ においていずれも左右非対称が現われている。この原因については波高計群形状によるものかどうか不明であり検討中である。

次に(A), (B), (B')の配置に於て波高計の本数を3本まで減らした場合の解析結果を示す。

Fig. 14 は(A)の配置の波高計2番, 3番, 5番の波高データを使用して解析した結果, Fig. 15 は(B)の配置の1番, 4番, 5番の波高データを使用して解析した結果である。この場合にも, 特に短波頂不規則波の解析例に於て左右非対称性が現われているが, 二等辺三角形の様な左右対称配置よりも全ての辺の長さが異なる不等辺三角配置の方が良い分解能を有することが分かる。但し Fig. 16 に示すように直線列に近いような三角形では逆に方向分解能は著しく悪く, 長波頂波と短波頂波でほぼ同様な特性が出てくる。これは2本直線配置に見られた結果と類似している。いずれの場合も5本使用の不整形配置より優れた分解能を示すものはない。

次に一本のレーザー式波面計による結果を示す。この計測法の妥当性は前述の通りである。この方法によって計測した方向スペクトル波の解析結果を以下に示す。Fig. 17, Fig. 18 にパワースペクトルのほぼ等しい長波頂, 短波頂不規則水波の波高, 水槽幅方向(Y)の波傾斜成分, 水槽長さ方向(X)の波傾斜成分のタイムヒストリーの例を示す。この場合データのサンプリングタイムは1/10 secである。水槽幅方向の波傾斜成分 $S(t)y$ は長波頂波では当然ほとんどゼロであり, 広い方向分布の場合に大になる傾向がよくわかる。これらのタイムヒストリーから最尤法によって方向スペクトルを推定した例を Fig. 19~Fig. 21 に示す。Fig. 19の長波頂波では, 波高計群方式よりも良好な方向分解能を示している。Fig. 21のコサイン2乗分布の場合を, Fig. 14, Fig. 15 に示した波高計3本による計測解析結果と比較してみると, 最良であった不等辺三角配置による推定結果と同程度の分解能を持っている事がわかる。波傾斜を利用したこれらの例においても方向分布関数の左右非対称性が現われている。波高計群方式による例と併せて考えると, 実際にこの程度のわずかな非対称特性が起きていると思われる。また波高計群方式, 波面計方式どちらにおいても, $D(\omega, \theta)$ の解析結果では低周波数域において方向分解能が低下している。

Fig. 14 Directional distributions of an analyzed wave spectrum using wave probe nos. 2, 3 and 5 of array pattern (A) in Fig. 7.

Fig. 15 Directional distributions of an analyzed wave spectrum using wave probe nos. 1, 4 and 5 of array pattern (B) in Fig. 7.

Fig. 16 Directional distributions of an analyzed wave spectrum using wave probe nos. 2, 3 and 4 of array pattern (A) in Fig. 7.

Fig. 17 An example measured timehistories of a long crested irregular wave elevation (a), wave slope in transverse direction (b), wave slope in longitudinal direction (c) using single laser wave surface probe.

Fig. 18 An example of measured timehistories of a wide spreading directional irregular wave elevation (a), wave slope in transverse direction (b), wave slope in longitudinal direction (c) using single laser wave surface probe.

6. 結 言

試験水槽内で発生させた方向スペクトル波の高精度の実用的計測、および解析法を確立することを目的に、実験的な研究をおこない以下の結果を得た。

(1) 水中から発射されたレーザー光線群を水上のビデオカメラによって撮影することによって、新しい非接触式波浪計測システムを開発した。このシステムは一度セッティングすればキャリブレーションを必要とせず、また原理上高速応答性を有するため、出会い波高計測に特に有用である。

(2) 波高計群によって方向スペクトル波を計測する場合波高計の数は最低3本以上必要であり5本以上であることが望ましい。また波高計配置の平面形状は左右対称形よりも不整形の方が優れた分解能を有する。ただし波高計間を結ぶ線分ベクトルが波の主方向に対して左右に広く分布していることが望ましい。

(3) 一点における波高と波傾斜の2方向成分の同時計測が可能な新レーザー式波面計およびその解析ソフトを開発した。その結果3本の波高計群による解析結果に比べて安定した結果及び優れた分解能を得た。複数の新波面計を用いると非常に高い測定精度が期待できる。本波面計はま

Fig. 19 Directional distribution of a long crested irregular wave spectrum obtained by a laser wave surface probe.

Fig. 20 Directional distribution of a narrow spreading irregular directional wave spectrum obtained by a laser wave surface probe.

Fig. 21 Directional distribution of a wide spreading irregular directional wave spectrum obtained by a laser wave surface probe.

た，出会い波面計として非常に優れた性能を有する。

本研究の一部は文部省科学研究費で行なった。最後に，卒業研究として本研究に関連した実験を分担してもらった，神山知英，稲垣秀彦の両氏をはじめ多数の横浜国立大学浮体運動学研究室学生各位に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 竹沢誠二，他：長水槽内で発生させた方向スペクトル波について，日本造船学会論文集，第 163 号(1988)
- 2) 竹沢誠二，他：長水槽用方向スペクトル波発生装置 関西造船協会誌，第 211 号 (1988)
- 3) 竹沢誠二，石田光弘：人工不規則水波の統計的性質 (その 2) 主として波傾斜について，関西造船協会誌，第 198 号，(1985)
- 4) 光易 恒，他：九州大学応用力学研究所所報，第 39 号，(1973)
- 5) 前田久明，笠原昭夫：2 次元人工不規則水波の発生法と解析法，関西造船協会誌，第 202 号，(1986)
- 6) 磯部雅彦，他：方向スペクトルの推定における MLM の拡張，第 31 会海洋工学講演会論文集，(1984)