側壁反射を用いて発生させた方向スペクトル波の 位置的定常性

正員 世 良 亘* 正員 梅 田 直 哉**

Homogeneity of Directional Irregular Waves with Side-Wall Reflections

by Wataru Sera, *Member* Naoya Umeda, *Member*

Summary

For model experiments of nonlinear behaviors of a ship running in realistic ocean environment, it is necessary to generate short-crested irregular waves that have a specified and stationary directional spectrum in a model basin. However, the measurements of the waves generated by the double-summation method with side-wall reflections indicated that the variance of wave elevation is not stationary in space. Therefore, the authors carried out comprehensive numerical experiments to compare the double-summation method and single-summation one both with side-wall reflections. As a result, it is concluded that single-summation method even with side-wall reflections can be regarded as practically stationary in space but the double-summation method cannot.

1. 結 言

船舶の転覆は線型予測に頼ることのできない非線型現象であり、その現象を再現するためには今日でも模型実験を行う必要がある。またその場合、自然界で発生する海洋波は短波頂不規則波であるため、多数の方向成分を持つ不規則波を想定した実験が行えることが望ましい。このため、多分割造波装置を水槽に設置して方向スペクトル波を発生させる実験が近年行われるようになった。

このとき、航走する船舶はその位置を刻々変化させるため、水槽内の一部ではなく全面に方向スペクトル波を

発生させねばならず、その波の特性についても位置的に変動しないことが望まれる。これらの問題を解決する方法として、竹沢らにより側壁反射を利用して水槽全面に方向スペクトル波を発生させる方法が考案され¹⁾、また笠原らの数値実験²⁾により Double-Summation 法でも実用上位置的に定常であるとの結論が得られた。

これに対し、梅田らが水産工学研究所において、側壁反射を利用して Double-Summation 法により発生させた造波実験³⁾では、方向スペクトルの形状は位置によりほとんど変動しないものの、その分散では位置的変動が観測されている (Fig.1)。実際、側壁反射があると同一周波数について複数の方向角の成分波が存在し、理論上は位置的定常とはならない⁴⁾。そこで、御手洗らはさらに詳細な水槽実験での計測と数値計算によりこの問題を追求し、分散の変動原因は側壁反射ではなく Double-Summation 法にあると結論づけている⁴⁾。しかし、Single-Summation 法により造波される不規則

* 神戸商船大学

** 大阪大学大学院工学研究科

原稿受理 平成 12 年 7 月 10 日

秋季講演会において講演 平成 12 年 11 月 16, 17 日

Fig. 1 Distribution of variance of measured wave elevation ($x=15\text{m}$; white circles : from Ref.3) ; black circles : from Ref.4) ; line : specific value)

波がどのような特性を持つかについては確認されておらず、その時の側壁反射の影響についても検討は行われていない。

この船舶の水槽試験法上残された重要な課題⁵⁾を解決するために、本研究では Single-Summation 法及び Double-Summation 法による方向スペクトル波の数値計算を行い、その結果を比較検討する事により方向スペクトル波の位置的定常性と側壁反射の影響について考察するものである。

2. 方向スペクトル波の数値計算法

2.1 Double-Summation 法

海洋波を模擬した方向スペクトル波は、周波数と方向角を変化させたランダム位相の規則波を線形重ね合わせることにより表現できると仮定すると、その水面変位を次式のように表すことができ、Double-Summation 法としばしば呼ばれる。

$$\zeta(x, y, t) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J a_{ij} \cos \left[\frac{\omega_i^2}{g} (x \cos \theta_j + y \sin \theta_j) - \omega_i t + \epsilon_{ij} \right] \quad (1)$$

ここで、 I, J は角周波数と方向角の分割数、 g は重力加速度、 x, y は空間固定座標、 t は時間である。また、 $a_{ij}, \omega_i, \theta_j, \epsilon_{ij}$ は成分波の振幅、角周波数、方向角、位相で次式に示す2次元スペクトラムによって与えられる。

$$a_{ij} = \sqrt{2S(\omega_i, \theta_j) \Delta \omega_i \Delta \theta_j} \quad (2)$$

$$S(\omega_i, \theta_j) = S(\omega_i) D(\theta_j) \quad (3)$$

$S(\omega_i)$ は1次元の周波数スペクトル、 $D(\theta_j)$ は方向分布密度関数である。

この方法は、原理上同一周波数で異なる方向角の成分波が存在するため、波の分散が位置的定常にはならないとされてきた⁶⁾が、竹沢ら¹⁾や笠原ら²⁾による観測及び数値計算では Double-Summation 法でも十分な方向数をとれば位置的に定常とみなし得るとの結果が報告されている。実際の海面を表現するにはこちらの方法が自然であると考えられ、船舶分野の水槽試験では一般的に用いられている。

2.2 Single-Summation 法

これに対して Single-Summation 法とは、ある周波数の成分波は一方向のみに進むという条件を施し、位置的定常性を理論的に保証する造波方法で、以下の式で表現される。

$$\zeta(x, y, t) = \sum_{i=1}^I a_i \cos \left[\frac{\omega_i^2}{g} (x \cos \theta_i + y \sin \theta_i) - \omega_i t + \epsilon_i \right] \quad (4)$$

$$a_i = \sqrt{2S(\omega_i, \theta_i) \Delta \omega_i \Delta \theta_i} \quad (5)$$

$$S(\omega_i, \theta_i) = S(\omega_i) D(\theta_i) \quad (6)$$

この方法はある1地点において1つの周波数の波は単一に存在するのみであるから、十分な時間の計測を行えば必ず位置的定常性が保たれるはずである。しかし、側壁反射の影響を受ける水槽内においては反射波として同一周波数の波が存在しうするため、必ずしも位置的定常性が保たれるかどうかはわからない。また、波の周波数を作為的に調整していることから、実際の海面状況を模擬するとは言い難い面がある。

2.3 設定条件

上記の2種類の計算方法を用いて、御手洗らが水槽実験を行ったとき⁴⁾と同様の条件設定で数値計算を行った。なお、計算においては、造波機のユニット幅を無限小と理想化して上述の式を用いた。計算に使用した座標系を Fig.2 に示す。

本計算では、周波数 0.5~3.0Hz を分割された区間のスペクトラムの面積が一定となるように不等間隔に 200 分割し、方向角は-70~70 度を等間隔に 71 分割して行った。また、各成分波の位相は $[-\pi \sim \pi]$ の一様

Fig. 2 Coordinate system

乱数によって与えられている。発生する波の有義波高は4.5cm、平均波周期は1.0秒とし、周波数スペクトルはITTC(1978)、そして方向分布関数はコサインの4乗分布を使用した。

計算点は $x=15\text{m}$, $y=-12.5\sim 12.5\text{m}$ の区間を0.1m間隔で分割した251点とし、計算時間間隔は0.1秒とした。

また、側壁反射については完全反射を考えている。このため、ある地点での波を計算する場合各方向角について壁に当たった反射波かどうかを調べ、反射波が届いている場合は壁に対して線対称となる方向角の周波数成分の波を重ね合わせることになる。たとえば、 $\theta = 60$ 度の成分波が側壁反射を1回起こして届いている場合は、造波機の位置で $\theta = -60$ 度方向に発生した波が届いているので、その成分波の振幅、周波数、位相で計算を行う。

そして、数値計算により求められた定点における波高の時系列からその分散を求め、各計算点の分散を比較することにより位置的定常性について検討を行うこととする。

3. 計算結果

3.1 計算時間と時系列の分散の変動

まず最初に、側壁反射が存在しない状況での Double-Summation 法及び Single-Summation 法による方向スペクトル波の数値計算を、計算時間を変化させて行いその影響について調べた。同じ乱数を用いて計算時間を変化させたときの時系列の分散を、それぞれ Fig.3 及び Fig.4 に示す。どちらの計算方法においても計算時間が長くなるほど分散の変動幅は小さくなったが、Double-Summation 法では2000秒を超えると大きな変化はなくなった。この時の変動幅は約40%程度である。それに対し、Single-Summation 法では同じ計算時間でも Double-Summation 法より変動幅が小さく、さら

Fig. 3 Distribution of variance of wave elevation generated by Double-Summation without side-wall reflections ($x=15\text{m}$) Fig. 4 Distribution of variance of wave elevation generated by Single-Summation without side-wall reflections ($x=15\text{m}$)

に計算時間が長くなるにつれて変動幅が縮小している。計算時間が2000秒で変動幅が約10%、8000秒では約2%である。これは、波の成分数が同じ場合 Single-Summation 法の方が Double-Summation 法よりも周波数間隔が狭くなり、それだけ定常となるのに時間がかかるためと考えられる。すなわち、分散を得る際に成分波間の積を求める過程で各周波数の差に当たる周波数の時間による変動が生じる。周波数の間隔が小さくなると、この差の周波数での変動が収束するために長時間を要することとなる。本来は、それぞれの方法で変動幅が定常となるところまで計算するべきとも考えられるが、計算が長時間かかること及び両者の計算時間をそろえた状態で比較を行いたいことから今回は計算時間を2000秒として後の計算を行い、その結果を比較検討することとした。

Fig. 5 Effect of number of component angles on variance of wave elevation generated by Single-Summation without side-wall reflections

Fig. 6 Effect of number of component angles on variance of wave elevation generated by Single-Summation with side-wall reflections

3.2 Single-Summation 法における方向分割数と分散の変動

Double-Summation 法による計算では、実用で使われるような範囲では方向分割数を増やしても分散の位置的変動に対しては影響が見られなかったと報告されている⁴⁾。そこで、Single-Summation 法において位置的変動に対し方向分割数による影響があるかどうかを調べるため、Single-Summation 法で 201 分割と 351 分割で計算を行い、71 分割の結果と比較した。

側壁影響がない場合の各分割数の計算結果を Fig. 5、側壁影響がある場合の結果を Fig. 6 に示す。どちらの場合でも、方向分割数を増加させてもその位置的変動量の分散は同様の変動幅を示しており、方向分割数の増加により位置的定常性が現れるという現象は Double-Summation 法と同様 Single-Summation 法においてもみられない。また、側壁影響の有無についても変動幅に対する影響はみられなかった。

3.3 水槽の長手方向における分散の変動

水槽の幅方向だけでなく長手方向に対しても同様の計算を行い、各造波方法による違いと側壁反射の影響について比較した。計算点は $y=10\text{m}$ 、 $x=5\sim 45\text{m}$ の区間を 0.1m 間隔で分割した 401 点とし、計算時間間隔 0.1 秒で計算時間は 2000 秒とした。Double-Summation 法と Single-Summation 法についてそれぞれ側壁反射がない場合の計算結果を Fig. 7、側壁反射がある場合の計算結果を Fig. 8 に示す。水槽の幅方向の場合と同様に、長手方向でも側壁影響による変動幅への影響は見られず、造波方法の違いにより大きな差が現れていることが分かる。

Fig. 7 Distribution of variance of wave elevation generated by Double-Summation and Single-Summation without side-wall reflections ($y=10\text{m}$)

3.4 側壁反射による分散の変動

側壁反射の影響があるかどうかを論じる場合、ある初期位相の組に対する一つの結果だけで評価するのは十分ではない。そこで、50 通りの初期位相の組を与えて計算を行い、それぞれの計算結果について次のような統計量 S^2 を計算し、その分布図を作成することで位置的定常性に対する側壁反射の影響を評価することとした。

$$S^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (v_n - \bar{x})^2, \quad \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n \quad (7)$$

ここで、 N は計測点数、 v_n は各計測点における波高の分散の値である。これにより作成される分布図を Fig. 9 に示す。図中の点は確率分布関数の標本値を表しており、縦軸の値は累積の最大値が 1 となるように正規化されて

Fig. 8 Distribution of variance of wave elevation generated by Double-Summation and Single-Summation with side-wall reflections ($y=10\text{m}$)

Fig. 10 Comparison of Double-Summation and Single-Summation for variance of wave elevation with side-wall reflections ($t=8000\text{sec}$)

Fig. 9 Distribution function of sample variance of wave elevation

いる。この図より、Double-Summation 法と Single-Summation 法のどちらの場合でも、側壁反射があるなしに関わらずその分布形状に違いがみられないことがわかる。また、Double-Summation 法に比べて Single-Summation 法の変動は著しく小さい。

Single-Summation 法では、さらに前述のように計測時間を増加させるとこの変動がより小さくなっていくことより、位置的定常性を有するとみなしてもさしつかえないと考えられる。計算時間が 8000 秒の時の Double-Summation 法と Single-Summation 法の結果の一例を Fig.10 に示す。

4. 結 言

本研究における数値実験の結果、方向スペクトル波の発生における位置的定常性について以下の結論を得た。

- (1) 実用で使われるような 70 以上の方向角をもつ

よう生成された波で位置的定常性を調べるには、数千周期単位での計測、計算が必要である。

- (2) Double-Summation 法により発生させた不規則波では、位置的定常であるとみなすことはできない。
- (3) Single-Summation 法により発生させた不規則波は、位置的定常であるとみなすことができる。
- (4) 側壁反射は、位置的定常性についてはほとんど影響を及ぼさず、Single-Summation 法では側壁反射がある場合でも位置的定常であると実用上みなすことができる。

以上の結果に関し、今後 Single-Summation 法を用いた水槽実験による詳細な計測での確認が期待される。また、実験に際してどのような不規則波の発生法を使用すべきかは、その実験の目的を十分考慮して決定されねばならない。

終わりにのぞみ、本研究に対して神戸商船大学井上欣三副学長より御高配を受けたこと、本研究の一部は文部省科学研究補助金（課題番号 12450400：研究代表者 長谷川和彦教授）によることを記し、関係各位に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 竹沢誠二, 小林顕太郎, 笠原昭夫：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，163，pp.222-232，1988
- 2) 笠原昭夫, 前田久明, 増田光一, 吉野博之：2次元人工不規則水波の発生法と解析法（第3報），関西造船協会誌，216，pp.93-99，1991

- 3) 梅田直哉, 山越康行: 側壁反射を用いて角水槽内に発生させた方向スペクトル波の特性, 日本造船学会論文集, 174, pp.297-307, 1993
 - 4) 御手洗哲司, 梅田直哉: 側壁反射を用いて角水槽内に発生させた方向スペクトル波の位置的特性, 関西造船協会誌, 229, pp.205-210, 1998
 - 5) 平山次清, 富田宏, 新開明二, 石田茂資, 馬寧, 小川剛孝: 応答から見た波浪の諸問題, 船体運動およびその制御と海象 (運動性能研究委員会・第 13 回シンポジウム), 第 1 編, 日本造船学会, pp.68-75, 1997
 - 6) Jefferys, E. R. : Directional Seas should be Ergodic, Applied Ocean Research, Vol.9, No.4, 1987
-