

方向スペクトルの推定に及ぼす流れの影響に関する検討

中川康之*・鶴谷広一**・橋本典明***

1. はじめに

河口部や潮流・海流の卓越する海域では、流れは波浪変形に影響を及ぼす。ところが、すでに実用化されている波動場の計算法や現地波浪場の解析法には流れの影響を考慮したものはほとんどなく、また、これまでの波と流れを対象とした研究には、一次元波動場を対象とした相互干渉に関するものが多い。一方、最近になり広域的な平面波浪場を対象とした海流による波動場への影響の計算による検討もなされるようになってきた (Tolman, 1992)。流れの存在が波の屈折にも影響を及ぼすことを考えると、平面場を対象とした波・流れの共存場に関する研究は今後も精力的に取り組むべき課題である。

さて、平面波浪場を解析する手法として方向スペクトル推定手法がいくつか提案されており、代表的なものとして EMLM (拡張最尤法; 磯部ら, 1984) や EMEP (最大エントロピー法; 橋本ら, 1993) がある。しかしながら、これらはいずれも流れの影響を考慮したのではなく、流れを伴う平面波浪場の解析にこれらの手法を用いれば、得られた方向スペクトル推定値からは、波浪現象の誤った解釈がなされる可能性がある。したがって、既存の方向スペクトル推定法で推定される方向スペクトルが、流れによってどのような影響を受けるのかを把握し、問題点を明確にしておくと共に対処法を検討しておく必要がある。

そこで本研究では、流れの効果が多方向波に及ぼす影響を評価するための前段の研究として、空間的に一様な流れの存在する場を仮定した数値シミュレーションにより、既存の手法を用いた方向スペクトルの推定を行い、推定結果に及ぼす流れの影響に関する検討をおこなった。また、流れを伴う風洞水槽の実験により、波・流れ共存場での測定データから方向スペクトルを推定し、数値シミュレーション結果との比較により流れの影響を調べた。

2. 波・流れ共存場における方向スペクトルの推定

複数の時系列データから方向スペクトルを推定するための基礎式は、分散関係式の成立を前提として、周波数 f と方向角 θ を用いて次式で表される。

$$\begin{aligned} \Phi_{mn}(f) = & \int_0^{2\pi} H_m(f, \theta) H_n^*(f, \theta) \\ & \times [\cos\{k(x_{mn} \cos \theta + y_{mn} \sin \theta)\} \\ & - i \sin\{k(x_{mn} \cos \theta + y_{mn} \sin \theta)\}] \\ & \times S(f, \theta) d\theta \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここに Φ_{mn} は座標 (x_m, y_m) および (x_n, y_n) の二点での波動量間のクロススペクトルで、 $x_{mn} = x_m - x_n, y_{mn} = y_m - y_n$ である。また $H(f, \theta)$ は水面変動から他の波動量 (水圧, 流速, 水面勾配等) への伝達関数である。既存の方向スペクトル推定法では、それぞれ固有の仮定や近似を導入することにより、方向スペクトル $S(f, \theta)$ を推定している。

一様な流れが存在する場合、ある固定点すなわち絶対座標上での角周波数が ω のとき、それに対応する波数 k は式 (2) より求められる。

$$\omega = kU \cos \alpha \pm (gk \tanh kh)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 U は一様流れの流速、 α は流れと波向きをなす角度である。すなわち一様な流れの中では図-1 に示すように、同じ周波数の波であっても波の進行方向と流れ方向のなす角度によって波数が異なることになる。

一方、流れがない場合の正弦波動場の水平水粒子速度は次式で表される。

$$u(x, z, t) = \frac{agk}{\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(k \cdot x - \sigma t) \dots (3)$$

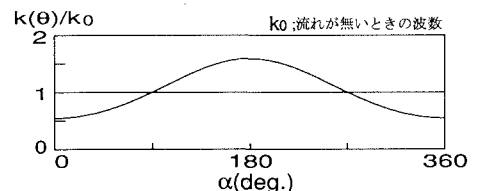


図-1 一様流れ場中での波数の変化 (f=0.1 Hz, 水深 100 m, U=80 cm/s の場合)

* 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室
 ** 工博 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室長
 *** 工博 運輸省港湾技術研究所水工部海洋エネルギー利用研究室長

ここに、 $\sigma=(gk \tanh kh)^{1/2}$ である。この関係は、一様な流れが存在する場合にも、流速 U に乗った移動座標系において成立する。ただしその場合には、 σ は移動座標上での角周波数である。ところで、この波動運動による水平水粒子速度を固定座標上に座標変換した場合には、正弦運動の角周波数が固定座標上のものに置き換わるだけで、振幅は変化しない。したがって、一様流中の固定座標での水粒子速度から水面波への伝達関数は式(2)から

$$H = \frac{gk}{\omega - U \cdot k} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \dots\dots\dots(4)$$

となり、伝達関数の表現そのものが波数と同様に流れと波向のなす角度によって異なるものとなる。なお、波数 k と伝達関数 H を流れ場を対象として上記のように修正すれば、観測して得られるクロススペクトルと方向スペクトルの基礎式は式(1)で表されることは容易に導かれる。

以上より、流れの存在する波浪場に、流れの影響を考慮せずに既存の方向スペクトル法をそのまま適用すれば、実際の波浪状況とは異なる結果が得られると推察される。

3. 数値シミュレーションによる流れの影響の検討

式(2)が成立する一様流れが存在する波浪場を想定し、既存の方向スペクトル推定法を用いた数値シミュレーションにより、方向スペクトルの推定値に及ぼす流れの影響を調べた。ここでは同一座標上に設置された波高計と流速計の組み合わせによる3成分観測を想定したため、流れの影響はすべて伝達関数に含まれることになる。そこで以下では、後述する異なる3種類の伝達関数を用いて検討を行った。

(1) 計算方法

数値シミュレーションは磯部ら(1984)と同様な手法を用いて実施した。すなわちある特定の周波数 f に着目し、方向角 θ に関するエネルギー分布についてのみ検討した。ただしここでは、真の方向関数(式(5))からクロススペクトルを計算する際には、式(2)と式(4)を用いて一様流れの中でのクロススペクトルを求めている。

$$S(\theta) = \left[\cos\left(\frac{\theta - \theta_0}{2}\right) \right]^{2s} \dots\dots\dots(5)$$

こうして得られたクロススペクトルをもとに、EMEPとEMLMを用いて方向関数の推定を行い、式(5)で与えた真の方向関数と比較した。なお、伝達関数については、流れの影響を考慮しないもの、流れの影響を式(2)と式(4)を用いて考慮したもの、および次式を用いてパワースペクトルから推定された伝達関数の3種類を用いて数値計算を実施した。

$$H(\omega) = \sqrt{\frac{\Phi_{uu} + \Phi_{vv}}{\Phi_{\eta\eta}}} \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 $\Phi_{\eta\eta}$ 、 Φ_{uu} 、 Φ_{vv} はそれぞれ水位変動、直交する2つの水平水粒子速度のパワースペクトルを表す。

(2) 計算結果

a) 流れの影響の現れ方

水深が100mで流速80cm/sの一様流れが存在する場で、主波向が180°、周波数 $f=0.1$ Hz、方向集中度 s が10の方向関数をEMEPにより推定した結果を図-2に示す。ここでは流れの向き θ_{cr} が0°(主波向きに対して逆行)、90°(同直交)、180°(同順行)の3ケースの結果を示した。図-2中の破線はいずれも流れの影響を無視した伝達関数を用いた場合の推定結果である。この場合、流れの速度を位相速度の約5%としたにもかかわらず、それぞれの推定結果と真値との差が明確に現れていることがわかる。流れが主波向きと逆行する場合には真値に比べて集中度が高く、ピーク値も大きな方向関数が推定される。一方、流れが主波向きと順行する場合には、真値よりも集中度が低くピーク値も小さな推定値が得られる。また、流れと主波向が直交する場合には、推定された主方向が流れの流下方向側にずれて現れる。

このように推定値が真値からずれる原因は、前述のように一様流れの中では同じ周波数の波であっても、その波数や伝達関数は波向と流れのなす角度によって異なるため、図-2中の破線ではそのような特性を無視して

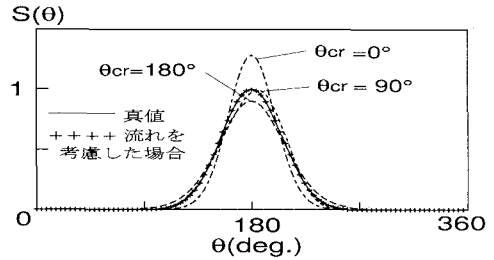


図-2 一様流れ場中での方向スペクトルの推定結果 (EMEPによる場合)

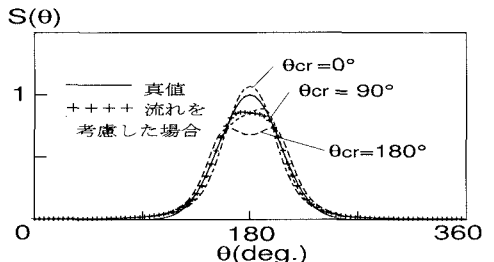


図-3 一様流れ場中での推定結果 (EMLMによる場合)

方向関数を推定したためである。

なお、方向関数を推定する際に、流れの影響を考慮した適切な伝達関数を用いれば、真値に近い方向関数が推定されるはずである。図-2中の++++は式(2)と(4)を用い、伝達関数に流れの効果を含めてEMEPで推定した結果を示したものである。この場合には真値にほぼ一致する結果が得られている。

参考のため、同様な計算をEMLMを用いて行った結果を図-3に示す。推定法の違いにより図-2の結果との差はあるものの、推定値と真値との差の現れ方の傾向は類似している。すなわち流れが主波向きに対して逆行する場合には集中度が高まってピーク値が過大となり、直交する場合には流れの流下方向側にピーク値がシフトしている。ただし順行の場合には集中度は低くなるが、ピークが2つに割れてしまうEMLMの欠点が現れている。

このような推定法による結果の違いは流れの有無にかかわらず生じるものであり、また本研究では流れの影響を評価することを主目的としているため、以下の検討では推定精度が高いと思われるEMEPを用いた結果のみを示すこととする。

b) 周波数の違いによる流れの影響

図-4は同じ流れの条件を用い、周波数だけを変化させた場合の結果を示したものである。同じ流速の条件下での周波数の変化は、位相速度に対する流れの大きさの相対的な影響度の相違を意味する。ここでは図-2の場合と同様に、主波向と流れの向きとの差を変えた3ケースを対象として計算し、各ケースごとに方向関数のピーク値と真値のそれとの比を示している。また特に流れの向きと主波向が直交するケースについては、主方向の真値と推定値とのずれも同図中に示している。図-4を見ると、流れの影響が相対的に強くなる高周波数側ほど真値からのずれが増大していることがわかる。

c) 流れの向きと方向集中度の違いによる影響

a)と同様の条件で流れの向き(θ_{cr})だけを連続的に変化させ、その際の主波向とエネルギーピークの推定値と真値との比較を行った結果を図-5に示す。図-5に見られるように、ピーク値および主波向の推定値の誤差の変化は $\theta_{cr}=90^\circ$ 近傍で連続性を失うが、特に後者の変化が急激的である。同様の計算を集中度の低いケース($s=5$)に対して行った結果も同図中に併記したが、集中度が低い場合にはより広い範囲で主波向きの推定値と真値とのずれが生じることがわかる。

d) 観測値から求まる伝達関数を用いる場合

現地観測データから方向スペクトルを推定する場合には、式(6)をもとにパワースペクトルの推定値から計算された伝達関数を用いられることが多い。これは実際の

観測においてはセンサーの検定誤差や観測値に混入するノイズ信号の影響などによって伝達関数が理論値と必ずしも一致しないことを考慮し、この影響を軽減するために磯部ら(1984)によって推奨された方法である。

式(6)で与えられる伝達関数は、式(2)と式(4)で与えられる伝達関数の理論値と異なり、方向角の関数では

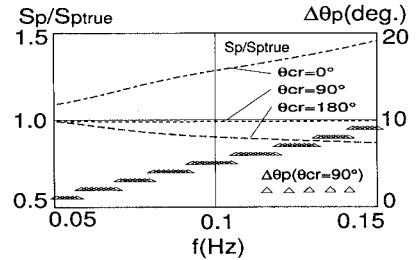


図-4 周波数の違いによる影響

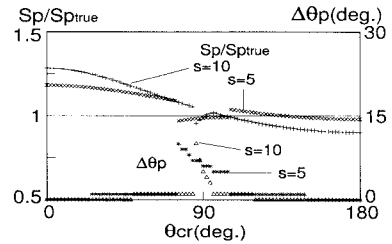
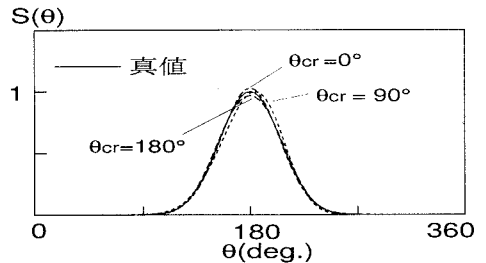
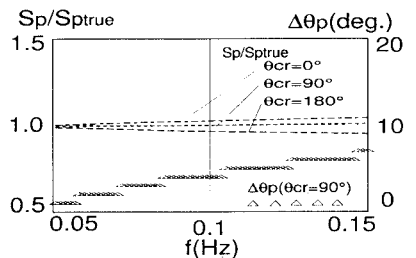


図-5 流れの向きと方向集中度の違いによる影響



(a) 方向スペクトル推定結果



(b) 周波数の違いによる影響

図-6 スペクトルの比から伝達関数を求めた場合

ないが、その大きさは流れの影響を含んでおり、方向ごとに異なる真の伝達関数を方向角に関して平均したものと考えられる。この伝達関数を用いることにより図-2と同様な条件で計算した結果を図-6に示す。流れを無視した伝達関数を用いた図-2、図-4の結果に比べて、真値に対するピーク値の過大あるいは過小な評価は軽減されていることがわかる。主波向きに推定誤差は、流れを無視した場合ほど顕著ではないが、やはり真値とはやや異なる結果となっている。

実際の現地観測データを解析する際には流れ場の把握が困難であることが多い。しかしながら図-6に示す程度の誤差を許容すれば、式(6)で与えられる伝達関数の適用は妥当であろうと考えられる。

4. 風洞水槽を用いた実験による検討

(1) 実験方法

全長28.5m、幅1.5mの循環流装置付き風洞水槽を用い、一様流れの中で風波を発生させ抵抗線式波高計および電磁流速計（水平2成分）によりデータの測定を行った。実験に用いた風洞水槽の概略図を図-7に示す。大型ファンにより水槽内に送り込まれた風で風波を発生させ、吹送距離13.5mの地点で風を水槽外へ排出し、うねりとなって伝わる波を測定した。なお実験では2次元水槽を用いたが、波は風の不均一性や側壁からの反射等に起因して奥行き方向に一様とはならず、水路中央部で観測される波は多方向波となる。風は吹送距離6.27m地点で水面から20cm、水路中央部での風速が10.4m/sの強さで与えた。一方、流れの強さは波向きと逆行するケースでは11.5cm/s、順行のケースでは7.98cm/sの平均流速とした。

(2) 実験結果

(1)の条件のもとで、図-7に示す測点で得られた水位変動のパワースペクトルを図-8に示す。波向に対して流れが順流の場合、および逆流の場合のそれぞれの結果を示している。なお、この検討でも3.同様に、伝達関数に流れの影響を考慮しないもの、流れの影響を式(2)と式(4)を用いて考慮したもの、および式(6)で与えられる伝達関数の3種類を用いて方向スペクトルの推

定を実施した。図-9は式(6)で与えられる伝達関数を図示したものである。図-9には流れが順行、逆行および流れがない場合の伝達関数の観測結果と、それぞれの理論値を示している。ただし、順行と逆行の伝達関数の理論値は波浪の方向分散を考慮せず、一方向への伝播を想定して求めている。図-9に見られるように、流れがない場合には伝達関数の観測値と理論値は周波数の広い範囲でほぼ妥当な一致が見られる。一方、流れがある場合には、順行・逆行のいずれの場合にも理論値と大きく異なっている。これは、実験水路で発生させた流れが実際には一様でなく、流れが鉛直方向に分布を有することにより波の分散関係も変化してくることや、波数の変化だけでは伝達関数の変化を表現できないこと（Tsuruyaら、1984）等が原因と考えられる。

しかしながら、図-8に示したパワースペクトルのピーク周波数近傍では理論値と観測値の差は比較的小さく、以下では、図-8の各ケースで、それぞれのパワースペクトルのピーク周波数近傍の方向関数を示すこととする。

a) 逆流中での方向関数

図-10に見られるように、流れを無視した伝達関数を用いた場合には、他の伝達関数を用いた結果に比べて、方向集中度が高く、ピーク値が大きいことがわかる。一

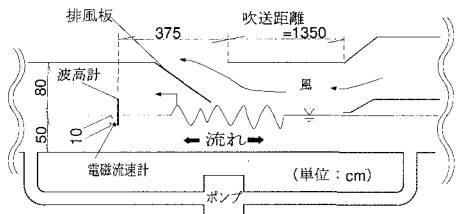


図-7 実験装置概略図

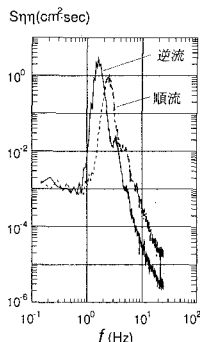


図-8 流れの中での波のパワー・スペクトル

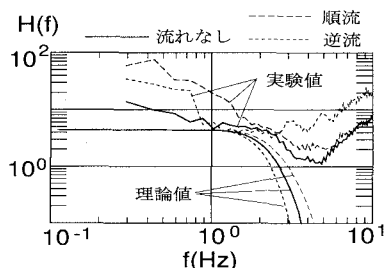


図-9 伝達関数の理論値と観測値の相違

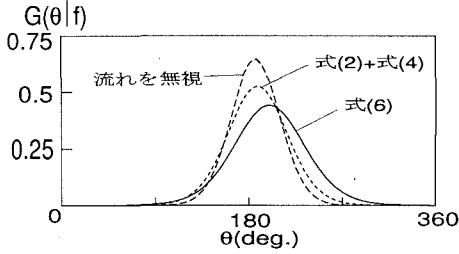


図-10 逆流中での EMEP による推定結果

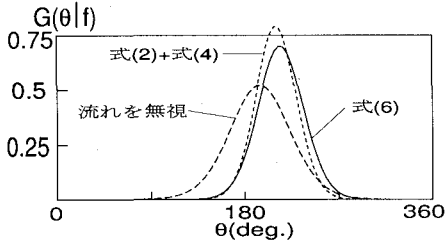


図-11 順流中での EMEP による推定結果

方、式(6)により求めた伝達関数を用いた場合には、主波向きが水路の主軸方向からややずれるという結果が得られた。また、水平流速の平均値を一樣流の流速と仮定して求めた伝達関数を用いた結果に比べて方向集中度はさらに低下し、ピーク値も小さくなっている。この傾向は3.の検討結果と矛盾する。

b) 順流中での方向スペクトルの推定結果

図-11に見られるように、流れを無視した伝達関数を用いた場合には、方向集中度が低く、ピーク値が小さく現れている。また式(6)の伝達関数を用いた場合には、逆流のケースと同様に主波向きがややずれて現れている。ただし、ここでは一樣流れを仮定した場合にも、ほぼ同様に主波向きがずれた推定結果が得られており、方向集中度やピーク値の大小関係のみに注目すると3.の結果と一致している。

以上、実験による流れ場における多方向波の方向スペクトルの推定結果を示した。真値の不明な実験データの推定結果を定量的に評価することは困難である。しかしながら、流れを無視した既存の推定法の流れによる誤差の影響は、数値シミュレーションの結果との対比により定性的に把握できた。すなわち主波向きに対して流れが順流か逆流かにより、既存の流れを無視した推定法では、それぞれ方向集中度がより低く、あるいは高くなるとい

う数値シミュレーションで得られた結果と同様な傾向が現れることがわかった。ただし式(6)より求めた場合の伝達関数を用いた場合には、数値シミュレーションの結果と一致しない場合もある。これは先にも述べたように、一樣流を仮定した伝達関数が必ずしも実測値とは一致しないためと考えられる。

また、パワースペクトルの比から求めた伝達関数を用いた場合には、いずれのケースにおいても主波向きが水路軸からずれる結果が得られた。この原因については不明であり、今後詳細に検討する予定である。

5. おわりに

本研究では一樣流れの存在する波浪場を対象として、既存の方向スペクトル推定手法を用いた数値シミュレーションにより、推定結果に現れる流れの影響について検討した。また、実験水槽において流れの中を進行する多方向波の方向スペクトルの推定を行い、数値シミュレーションの結果から得られた知見をもとに、推定結果に含まれる流れの影響について定性的に評価し、流れの存在する波動場へ既存の手法を適用する際の問題点を検討した。なお、今回の検討では一点における3成分観測データを対象としたが、そこでは各波動量間の伝達関数が適切であることが重要であった。このような場合に、より妥当な方向スペクトルを推定するためには、今後、流れ場の中での水位変動と水粒子速度や水圧変動などの波動量間の特徴をさらに詳細に調査する必要がある。一方、ここには示さなかったが、波高計群による観測を想定した同様の数値シミュレーションにおいても、今回示した結果とほぼ同様な流れの影響があることが確かめられている。その場合には波の伝搬特性、すなわち分散特性に及ぼす流れの影響を正しく把握する必要があり、この方面の研究も今後継続的に実施する予定である。

参考文献

- 磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司 (1984): 方向スペクトルの推定における MLM の拡張, 第 31 回海講論文集, pp. 173-177.
- 橋本典明・永井紀彦・浅井正・菅原一晃 (1993): 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, 港研報告, 第 32 巻, 第 1 号, pp. 3-25.
- Tolman, H. L. (1992): Effects of the Gulf Stream on wind waves in swade. Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 712-725.
- Tsuruya, H., H. Terakawa and Y. Matsunobu (1984): Effects of wind shear and waves on the structure of turbulent streams, 港研報告, 第 23 巻, 第 4 号, pp. 3-75.