II-170　linear array の設計例について

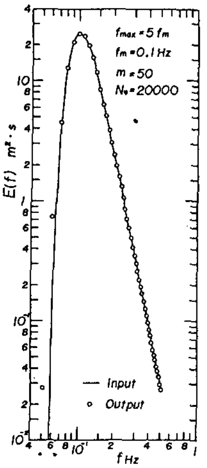
愛媛大学工学部　正員　○山口正隆
愛媛大学工学部　正員　畑田佳男

1．はじめに：完全配置をもつ linear array は高分解能を有するので，海岸近くのように屈折によってエネルギー集中度が高くなり，入射方向が半平面に限られる浅海波浪の方向スペクトルの測定に適している．著者の1人はすでに合田により提案された準完全配置をもつ5台の波高計群による linear array の方向分解能を明らかにした。しかし，多数の波高計を維持する労力が大きいうえ，低周波数成分に対して高分解能を得るために最大波高計間距離が大きくなり，不規則な海底地形上や桟橋など取り得る波高計間距離に制約がある場合には必ずしも得策でない。したがってこの場合には4台の波高計よりなる linear array が有利であろうし，さらに状況によっては完全配置とし得ない場合がある．そこで，本研究では準完全配置をした4台の波高計よりなる linear array の方向分解能を，主として既知の方向スペクトルをもつ不規則波浪のシミュレイション結果の検討から究明し，linear array の設計例とする．

2．linear array：研究対象とする linear array は準完全配置（最大波高計間距離 $l_{max}=5D$；位置座標 0，D，3D および 5D，5組の独立なクロススペクトル）をもつものである。ここに，D；最小波高計間隔，である．いま，日本海側の水深6.5m地点を想定し，最大および最小波高計間隔が種々の理由により $l_{max}\leqq 30m$ および $D\geqq 6m$ とする．日本海における波の周期は異常波浪時を除けば大部分10秒以下であろうから，最大波長は $l_{max}<76m$ となる。4台の波高計に対する完全配置の波高計設置位置は 0，D，4D および 6D であるが，$l_{max}=30m$ とすれば，$D=5m$ となり，上述の条件を満たさなくなるので，波高計配置が前述のように変更された．ただし，比較のため，$D=6m$ したがって $l_{max}=36m$ をもつ完全配置に対する分解能も1例のみ検討された．また浅海では屈折の影響により方向分布関数は sharp になり，合田の図表によると，たとえば $T=10S$，$S=10$，$\theta=0°$ の深海波の場合，水深6.5m地点では $S=65$（$n\approx 32$）になる。ここに，S は $\cos^{S}\theta/2$，n は $\cos^{n}\theta$ 型方向分布関数の母数である。そこで，方向分布関数の形状母数として $n=4$，16および32が本研究で用いられた。

3．分解能の検討：波高計アレイを用いた多くの方向スペクトル計算法のうち，ここでは Borgman の最小自乗法および最尤法（MLM）を用いる。著者の検討によれば，2次元アレイの場合 MLM はエネルギーの方向集中度により分解能が大きく変化することおよび誤差に敏感であることなどがわかっている。MLM による方向スペクトル推定式は，$E(\theta)=\left[\sum_{i,j=1}^{N} Q_{ij}^{-1}\exp\{-ikD_{ij}\cos(\theta-\beta_{ij})\}\right]^{-1}$ …(1)，で与えられる。ここに，$E(\theta)$：方向スペクトル，D_{ij}：波高計間隔，β_{ij}：波高計を結ぶ線と基準方向とのなす角，Q_{ij}：共役クロススペクトル行列，k：波数および N：波高計台数，である．

つぎに，周波数スペクトル（ピーク周波数 $f_m=0.1Hz$　$H_{1/3}=5.28m$）および方向分布関数としてそれぞれ光易正型スペクトルおよび $\cos^{n}\theta$ 型関数（主方向 $\theta_0=80°$）を与えて $\Delta t=1s$ としてディジタルフィルター法により4地点でそれぞれ20000個の水位変動をシミュレイトしたのち，Blackman-Tukey 法によりラッグ50，自由度800として周波数スペクトルおよびクロススペクトルを算出した。図－1は入出力周波数スペクトルを比較したものであり，$f\leqq 0.07Hz$ 以下を除いて両者はきわめてよく一致している。図－2は $n=4$ の場合の入出カクロススペクトルの比較を示したものである．これから，周波数スペクトルの場合と同様 $f\geqq 0.08Hz$ に対して両者がよく一致していることが見出されるが，いづれの n に対しても波高計間隔が大きいほど，適合性はわずかに低下する．図－3は入出力方向分布関数の数例を $n=4$，16および32について示したものであり，図中の実線が入力関数，



図－1 スペクトルの比較

1点鎖線がMLM，点線がBorgman法である。Borgman法を用いる場合，Fourier級数の項数を適切に選択する必要があるので，実際には項数を2，3変えた計算結果のうち最も妥当な結果が示されており，図中の数字は項数を示す。さて，これらの図によると，まず$n=4$という比較的広いエネルギー分布の場合，Borgman法は全周波数帯（$D/L=0.062\sim0.37$）について良好な対応関係を与えるのに対して，MLMによる算出結果はピーク付近でとがり，入出力分布関数とかなり異なる結果を与える。また$n=16$の場合，Borgman法は高周波側になるにつれて項数を増やせば，$f>0.23$Hzに対して適切な評価を生むけれども，低周波側ではやや平滑化された結果を生じるし，sharpな方向分布関数を得るため，Fourie級数の項数を多くすれば，side lobeが大きくなる。この平滑化傾向は$n=32$のように非常に鋭い方向分布の場合により一層顕著である。一方，

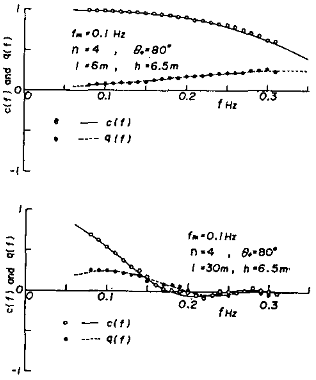


図-2 入出力クロススペクトルの比較

MLMは$n=16$の場合，$f=0.11$Hz~0.27Hz（$D/L=0.087\sim0.29$）に対し，計算結果に入力関数よりやや鋭くかつひずんだ形が見出されるものの，良好な結果を生むし，side lobeもない。また$n=32$の場合，計算結果が不安定になるが，$f>0.2$Hz（$D/L=0.18$）に対しては与えられた分布が非常にsharpであるにもかかわらず，MLMは良好な結果を生む。さらに，図-4は$l_{max}=6D$，$D=6$mとした完全配置の場合の比較である。この場合独立したクロススペクトルの対が1つ増加することにより，Borgman法の平滑化傾向は改良されている。またMLMによる分布形状もより入力関数に近づき，低周波側での適合性（$f=0.1$Hz）も拡大しているのに対して，$f>0.2$Hzでは平滑化傾向が顕著になる。以上のことから，方向集中度があまり大きくない場合には広範囲にわたって高適合性を与えるBorgman法が優れている。一方，方向集中度が大きい場合にはMLMが良好な分解能を与えるが，その適用範囲は狭い（$D/L=0.08\sim0.29$）うえに，方向集中度が小さい場合には低い分解能しか与えない。これは雑音に埋もれた平面波の抽出というMLMの原理から考えて当然の帰結であるかもしれない。つぎに，無次元クロススペクトルと方向分布関数の関係式を利用してクロススペクトルの評価に誤差を含まない場合の分解能を検討した結果が図-5であるが，この場合当然計算結果における安定性および分解能の向上が見出される。図-6は入力関数が2ピークの場合であり，分解能が低下することがわかる。

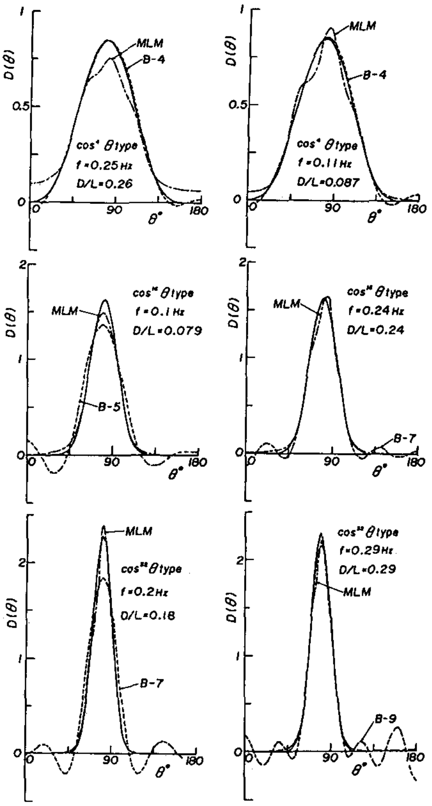


図-3 入出力方向分布関数の比較（1）

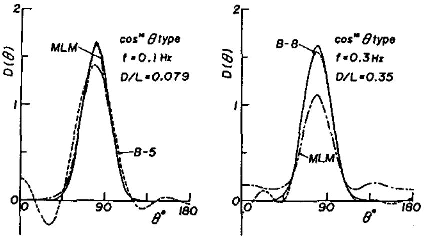


図-4 入出力方向分布関数の比較（2）

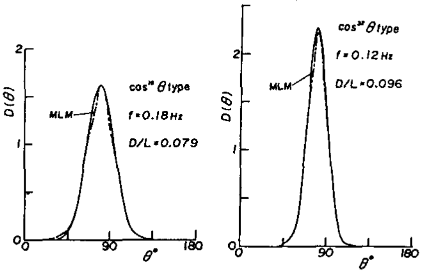


図-5 入出力方向分布関数の比較（3）

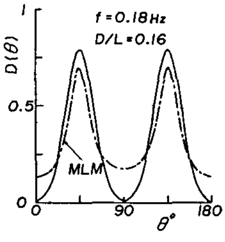


図-6 入出力方向分布関数の比較（4）