

極浅海域での多点波高計測による波向きの推定

河 口 信 義* ・ 柳 潤 子**・石 田 廣 史***
藤 井 英 信****・出 口 一 郎*****

本研究は極浅海域に約 10 m の短間隔と約 100 m の長間隔で設置された波高計測結果に MUSIC 法を適用することにより、当該海域に到来する長周期波の波向き推定を行った。波高計の数および形状を変えることで、その推定結果がどの程度変化するか、さらに従来法（電磁流速計と圧力式波高計）による方向スペクトルを推定した結果と比較することで、MUSIC 法による極浅海域における長周期波の波向き推定を検証し、さらに提案法が従来法に比べかなり高い分解能で波向き推定が可能なこと示した。

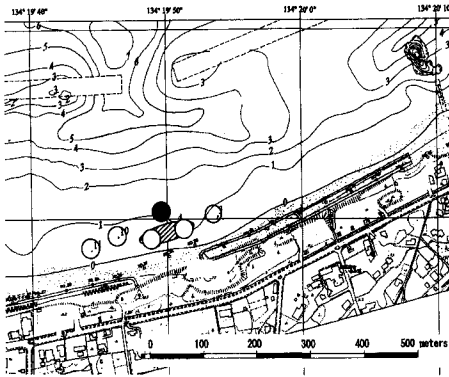
1. はじめに

長周期重力波（周期数十秒～数十分）によって沿岸域で引き起こされる諸問題に対しては、すでに幾つかの研究が行われてはいるが、その成因や特性については必ずしも正確に解明されたわけではない。著者らはすでに長周期重力波の伝搬方向をアレー配置されたブイの 3 次元位置変動を KGPS で精密に計測し、その上下変動に MUSIC 法を適用することにより、様々な周期の長周期重力波の波向きを精度良く推定するシステムを提案し（Fujii ら, 2002）、これを実用することに問題がないことをシミュレーションおよび基礎的な実験結果を用いて示した（藤井ら, 2003a；藤井ら, 2003b；Fujii ら, 2003）。さらに、提案した手法は KGPS によるブイ観測ばかりでなく、様々なアレー配置センサーに適用可能であることから、他のセンサーに本手法を適用し従来法と比較することにより、本手法の妥当性を検証することが必要である。

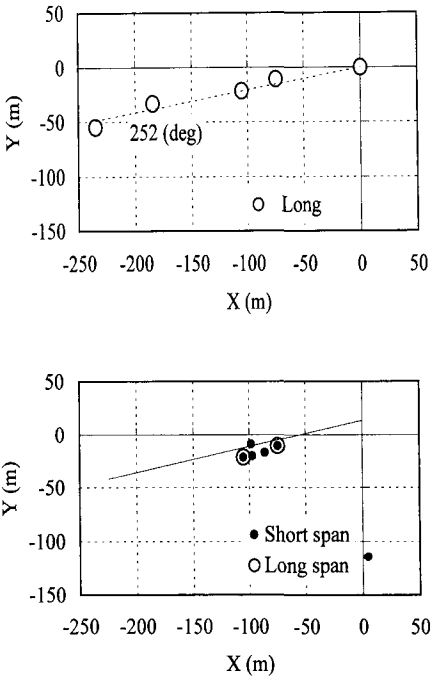
そこで、本研究は、極浅海域に到来する長周期波の波向きを精度良く推定するために、当該海域の多定点（短間隔および長間隔）に圧力式波高計を設置し、MUSIC 法（菊間, 1998；藤井ら, 2003a）を圧力式波高計測結果に適用する。さらに、それらの結果を従来法（電磁流速計と圧力式波高計）による方向スペクトルと比較することで、MUSIC 法による極浅海域における長周期波の波向き推定の可能性について考察する。

2. 実験概要

実験は 2002 年 9 月 2 日から 16 日の間、浦富海岸の極浅海域に離岸流の実測を目的として設置された複数個の波高計（出口ら, 2003）を用いて実施し、その計測結果を解析した。海岸付近の極浅海域（水深約 1 m）に、約 100 m 間隔と約 10 m 間隔の二つの間隔に設置して異なる周



図一(a) 実験海域とセンサー概略配置



図一(b) 長短間隔波高計設置状況（下図は図一(a)の●を示す。）

* 博(工) 神戸大学助教授 海事科学部
** 修(工) 韓国海洋大学
*** 理 博 神戸大学教授 海事科学部
**** 商(学) 大島商船高等専門学校教授
***** 正会員 工 博 大阪大学大学院教授 工学研究科

波数の長周期波を観測対象とした。本実験で設置した長間隔波高計 (○) 短間隔波高計 (●または・) ならびに電磁流速計および波高計 (●) の概略配置を図-1(a), 詳細配置を図-1(b)に示す。本実験で用いたすべての波高計は圧力式波高計で、水位変動は圧力変動から LCM 法で変換することによって求めた。

解析対象期間は、比較的高い 1.5 m の有義波高が観測された 9 月 7 日午前 1 時 00 分から 1 時 20 分までの 20 分間 (サンプリング周期 1 秒) とした。実験海域付近の長尾鼻灯台で計測された風速、風向および水深 7 m 地点に設置した波高・流速計 (Wavehunter-Σ) の水位変動から計算された波浪の状況を表-1 に示す。

表-1 気象および波浪状況

風向	335 (deg)
風速	10 (m/s)
有義波高	1.5 (m)
有義周期	6.5 (s)
波向	328 (deg)

3. 解析および考察

ここでは解析およびその結果を短間隔配置と長間隔配置センサー別に、以下の順で示しそれらに考察を加える。まず、各波高計の波高データを基にスペクトル解析により卓越した波の周波数成分を求め、浅海波の水深による周波数と波長の分散関係式 (光易, 1995) より波長を推定する。次に、得られた波長から各波高計の位置および波高データに基づいて MUSIC 法により波向きを推定する。最後に、MUSIC 法による結果と、同一海域に設置された電磁流速計と圧力式波高計による従来法による波向き推定結果との比較および考察を行う。

(1) 周波数および波長の推定

波高計によってサンプリング周波数 1 Hz で 20 分間計測された波高データ (1200 個) の周波数特性を FFT により解析し図-2 に示す。図-2 より長周期成分として、比較的低い周波数における卓越した波の成分が 0.01 Hz (周期 100 秒) および 0.03 Hz (周期 33 秒) 付近に見られ、また比較的高い周波数成分として先の有義周期の結果も考慮して 0.15 Hz (周期 6.5 秒) 付近に見られ、ここでは 3 成分を解析対象波とする。また、センサー設置海域の水深が約 1 m であることから、本解析で用いる周波数、周期、波長の関係をまとめて表-2 に示す。

(2) 0.01 Hz の波

ここでは、0.01 Hz の波について解析した結果を示す。解析に用いるセンサーの個数を 2 から 5 個まで変えた場合における MUSIC スペクトル値を図-3 に、橋本・小舟

表-2 対象波の情報

周波数 (Hz)	周期 (s)	波長 (m)
0.01	100	380
0.03	33	120
0.15	6.5	20

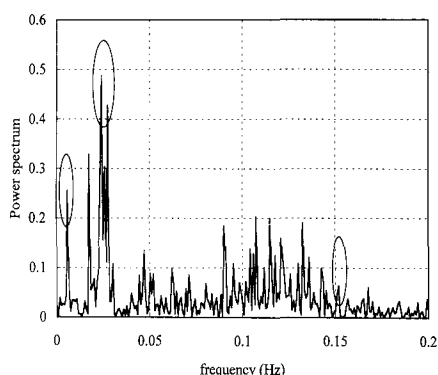


図-2 波高の周波数特性

(1986) の方法 (以下、従来法と言う.) を用いて計算した方向スペクトルと MUSIC スペクトルの比較結果を図-4 に、またこれらの特徴をまとめた結果を表-3 に示す。

表-3 の半値幅とは方向特性のスペクトルが 0.5 倍になる両側の角度を示しており、角度の分解能を示す一つの指標として用いる。また、本実験は基本的にリニアなセンサー配置を用いている。この配置の特徴としては、波の到来方向の分解能は良好であるが、ベースラインに対して真の波向き方向と対称方向に卓越する対称方向に卓越する入射反方位波が示される (藤井ら, 2003a) ことである。そこで、この入射反方位波の方向を入射波の反方位として示す。

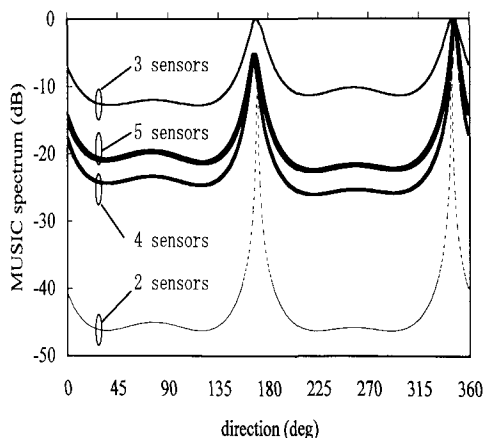


図-3 センサー個数の違いによる波向き推定 (0.01 Hz)

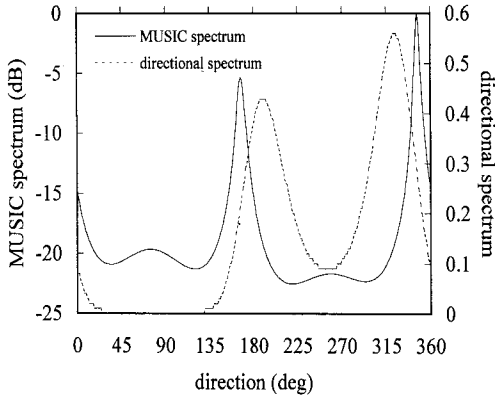


図-4 解析手法の違いによる波向き推定 (0.01 Hz)

表-3 センサー個数および解析手法の違いによる波向き推定 (0.01 Hz)

解析方法	センサー数	入射波 (deg)	半値幅 (deg)	反射波 (deg)	半値幅 (deg)	入射波の反方位 (deg)
MUSIC	2	344	1	172	1	172
	3	345	4	171	15	171
	4	347	3	169	7	169
	5	347	5	169	9	169
directional	—	326	50	192	52	—

これらの結果より、0.01 Hz の波は入射波の波向きは 344 度から 347 度で最大 3 度の差に収まっているので、波向きの精度についてはセンサー個数による違いはさほど見られない。一方、半値幅はセンサー個数を増すほど大きな値を示しており、これをさらに検討するためにはセンサーの計測誤差を評価する必要があるが、以前行った GPS プイによるシミュレーション結果（藤井ら、2003a）を参考までに示すと、本センサー間隔と対象波長の関係が約 0.25 倍程度であるので、半値幅は約 6 度程度であると考えられる。さらに、反射波の波向きはセンサー個数に無関係に入射波の反方位と等しい値を示していることから、入射波は 1 つであり、その波向きは 347 度付近で、反射波は無いと考えられる。

また、5 センサーの結果と従来法との結果より、入射波の主方向において 19 度の差が生じているが、半値幅において提案法は従来法に比べて 1/10 程度の値を示していることから、提案法はかなり良い分解能で波向き推定が行えていると判断出来る。

(3) 0.03 Hz の波

ここでは、0.03 Hz の波を対象として行った解析結果を示す。解析に用いるセンサーの個数の違いによる波向き推定結果を図-5 に、従来法と比較した結果を図-6 に、またこれらの特徴をまとめた結果を表-4 に示す。

これらの結果より、センサー個数による入射波の主方向の波向き推定は 323 度から 315 度とわずか 8 度の差し

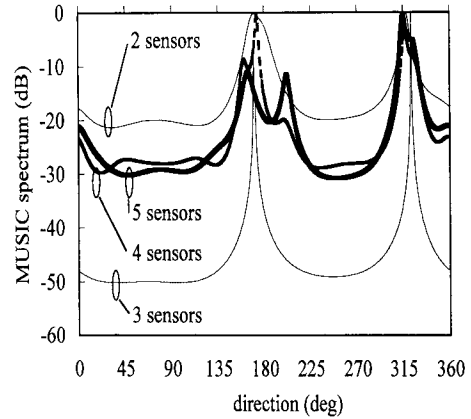


図-5 センサー個数の違いによる波向き推定 (0.03 Hz)

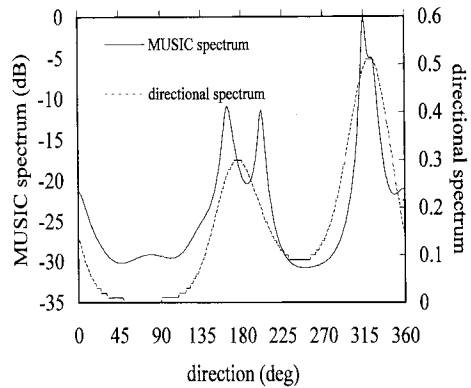


図-6 解析手法の違いによる波向き推定 (0.03 Hz)

表-4 センサー個数、配置および解析手法の違いによる波向き推定 (0.03 Hz)

解析方法	センサー数	入射波 (deg)	半値幅 (deg)	反射波 (deg)	半値幅 (deg)	入射波の反方位 (deg)
MUSIC	2	323	1	170	1	193
	3	318	7	170	5	198
	4	317	6	173	3	199
	5	315	4	164 202	10 7	201 201
directional	—	322	60	175	64	—

か示さなかった。ところが、0.03 Hz の波向き推定結果における反射波の波向きは 0.01 Hz で見られた入射波の反方位の方向とは異なる。さらに 5 センサーによる推定結果では反射波のスペクトルピークが 2 つ有り、反射波が 1 つ以上ある可能性が考えられる。さらに、5 センサーにおける 2 つの反射波のなかで 202 度は入射波の反方位に等しいことから、この反射波がベースラインに対して真の波向き方向と対称方向に卓越する入射反方位波である可能性が高く、提案法では反射波と入射反方位波を分離識別出来ていることがわかる。そこで、0.03 Hz におい

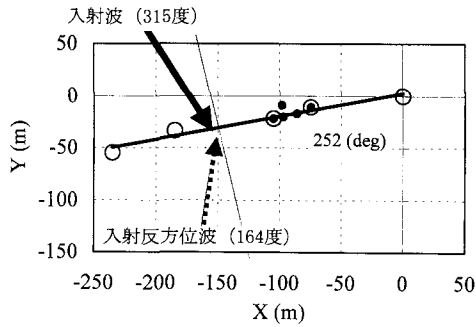


図-7 センサー直線配置における反方位波

ては、入射波は一つ見られ波向きが315度、反射も一つ見られ波向きは164度と考えられる。図-7にセンサーを直線配置した場合における反方位の関係を示す。

また、5センサーの結果と従来法との結果より、入射波の主方向において7度の差を生じているが、半値幅において提案法は従来法に比べて1/15程度の値を示している。さらに、反射波と入射反方位波の分離の面では、従来法では分離出来ていないことがわかる。

(4) 周波数0.15 Hzの波

ここでは、0.01 H や 0.03 Hz のような比較的周期の長い波に比べて、0.15 Hz の比較的周期短い波を解析した結果を示す。解析に用いるセンサーの個数の違いによる波向き推定結果を図-8に、従来法と比較した結果を図-9に示す。また、解析に用いるセンサーの個数を3個とした場合、配置が直線(リニア)の場合と三角形(トライアングラー)の場合に、波向き推定結果がどの程度異なるかを図-10に示す。さらに、これらの特徴をまとめた結果を表-5に示す。

これらの結果より、センサー個数による入射波の主方向の波向き推定は340度から349度と9度程度で、4個

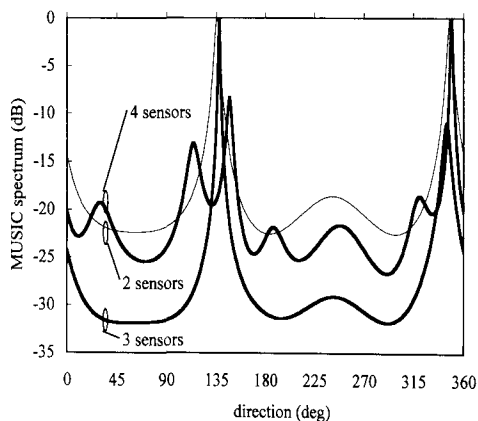


図-8 センサー個数の違いによる波向き推定 (0.15 Hz)

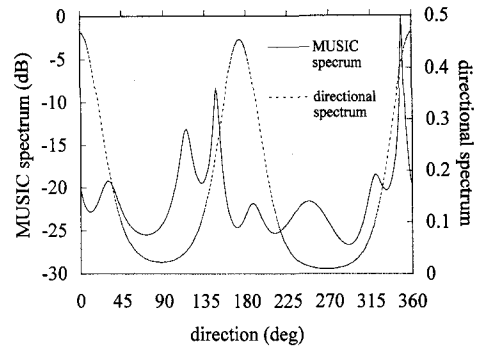


図-9 解析手法の違いによる波向き推定 (0.15 Hz)

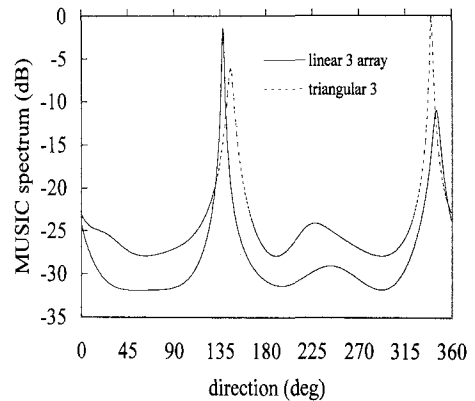


図-10 センサー配置の違いによる波向き推定 (0.15 Hz)

表-5 センサー個数・配置および解析手法の違いによる波向き推定 (0.15 Hz)

解析手法	センサー数	入射波 (deg)	半値幅 (deg)	反射波 (deg)	半値幅 (deg)	入射波の反方位 (deg)
	2	347	4	135	4	169
	3	345	7	137	2	171
	3 (triangular)	340	2	145	12	—
	4	349	2	114	12	169
				147	5	169
directional	—	0	53	173	53	—

のセンサーによる結果の反射波に114度と147度の2つのピークが現れている。しかし、この4センサーの反射波ではどちらの反射波の波向きも入射反方位波方向170度とは一致していないことから、反射波の数が2波以上であることが考えられる。4センサーによる解析可能な波向き数は3波であることから、一つの入射波と2つの反射波の分離が限界であり、これ以上の波の数においては5センサー以上用いる必要がある。

解析手法の違いによる波向き推定結果については、5センサーの結果と従来法との結果より、入射波の主方向において11度の差を生じているが、半値幅で提案法は従

来法に比べて 1/20 程度の値を示している。

さらに、4 センサーの結果において、反射波と入射反方位波の分離の点では、従来法では分離出来ていないことがわかる。センサー配置の違いによる波向き推定結果からは、入射波では 5 度の差を示している。トライアングル配置における特徴は、入射反方位波が存在しないことが上げられ、反射波の波向き方向が 145 度とリニア配置 4 センサーによる一方の反射波の波向き推定結果 147 度と 2 度程度の違いで一致していることから、入射波は一つで波向きは 349 度、反射波は複数波であり、その一つは 147 度を波向きと考えられる。

4. ま と め

極浅海域の多定点に圧力式波高計を配置し、その波高計から得られた結果に従来法で方向スペクトルを、また新しく提案する手法で MUSIC スペクトルを求めた。その結果、比較的周期の長い波である 0.01 Hz と 0.03 Hz、周期の短い波である 0.15 Hz のどちらにおいても、提案法において従来法から得られる波向きと最大でも 11 度程度の差で波向きが得られた。さらに提案する手法の特徴である高い方向分解能により、複数の反射波が分離識別できていると考えられる。提案手法の方向分解能は従来法に比べて、スペクトルの半値幅が 1/10 から 1/20 程度減少しており、約 10 から 20 倍の分解能の向上が示された。また、本実験結果より、提案手法を用いて波向きを推定する場合、配置の対称性による入射反方位波が生じることから、リニア配置よりトライアングル配

置が望ましく、予測される波の数 + 1 個のセンサーを必要とする。

謝辞：本実験を実施するにあたり、GPS におけるデータ収集に関して多くのご助言を頂いた古野電気株式会社研究部の井潤健二氏に心よりお礼申し上げます。

なお、本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（課題番号 15360466）の補助を受けて行いました。

参 考 文 献

- 菊間信良 (1998): アレーアンテナによる適応信号処理, 科学技術出版, 350 p.
- 出口一郎・荒木進歩・竹田怜史・松見吉春・古河泰典 (2003): 鳥取浦富海岸で観測された離岸流の特性, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 151-155.
- 橋本典明・小舟浩治 (1986): 方向スペクトルの推定における多変量自己回帰モデルの適用, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 164-168.
- 藤井英信・河口信義・石田廣史・出口一郎 (2003a): アレー配置ブイによる GPS 波浪観測システムの提案と波の到来方位推定精度, 土木学会海洋開発論文集, 第 19 巻, pp. 857-862.
- 藤井英信・河口信義・石田廣史・出口一郎 (2003b): GPS ブイアレー波浪観測システムを用いた大阪湾内うねり伝搬方向の計測, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 1416-1420.
- 光易 恒 (1995): 海洋波の物理, 岩波書店, pp. 172-179.
- Fujii H., K. Kouguchi, H. Ishida and I. Deguchi (2002): GPS Wave Observation System with Arrayed Buoys, Proceedings of ION GPS 2002, the Institute of Navigation, pp. 2733-2740.
- Fujii H., K. Kouguchi, H. Ishida and I. Deguchi (2003): Development and Experimental results of GPS Wave Direction Finding System, Proceedings of ION GPS 2003, the Institute of Navigation, pp. 75-83.