

高速艇による航走波の高分解能波向解析法

High Resolution Analytical Method for Direction of Wave Generated by the High Speed Ship

塩谷茂明¹・藤富信之²

Shigeaki SHIOTANI and Nobuyuki FUJITOMI

A simplified estimation of the height and the period of waves generated by a small ship was proposed in previous papers. The estimated heights and periods of waves were in good agreement with the experimental results obtained from a small ship. In this paper, the new system called MUSIC (Multiple Signal Classification) was proposed for analyzing the direction of ship waves. The distribution of directional spectrum of ship waves estimated by MUSIC presented a sharper monotone peak, and the estimated results were supported by field results obtained from a small ship. The proposed estimation of the wave direction of ship waves by MUSIC was confirmed to be very effective.

1. はじめに

航走波に関する研究は古く、航行周辺海域の遊漁船、作業船及び停泊船舶等への影響、護岸の越波問題、海浜浸食等が挙げられる（例えばSorensen, 1967；Hertzberg, 1954；塩谷ら, 1998a）。特に近年、旅客船、プレジャーボート及び漁船等の小型船舶は高馬力の機関を搭載し、通称高速艇と呼ばれ、高速化している。その結果、大波高の造波を伴う高速航行により、周辺海域の海洋及び水産構造物等に被害を及ぼすことが懸念されている。小型高速艇は大型船舶と異なり、限定された特定航路の航行より、むしろ海域を自由に航行することが多く、状況次第では、真珠や牡蠣等の養殖筏や魚類の生け簀に接近し、危害を与えることが報告されている（例えば塩谷ら, 1996b, 1998c, 2001d；Shiotani, 1996）。

今後、航走波に関連の危険海域において、高速艇の航行規制や速力制限等の法的措置を講じることもあり得ることから、現場における航走波の諸特性の把握が今後重要になりつつある。実海域において、航走波の代表的特性である波高及び波周期は単一の超音波式や水圧式波高計で容易に計測可能であるが、波向の計測はそれほど容易でない。

本研究の目的は、波向を高精度に計測・解析できるシステムを提案することである。特に、室内実験でなく、実海域で実船を用いた航走波の波向計測の実験から、本手法が有益であることが解ったので、ここに報告する。

2. 航走波の波向計測の実験の概略

航走波の波向計測の実験は、瀬戸内海の広島県豊田郡大崎上島の白水港に隣接する防波堤付近の海域で実施し

た。実験海域は瀬戸内海の中央部に位置し、太平洋からのうねりの侵入、伝搬はほとんどなく、しかも多数の島々が点在することから、風浪も発達しない静穏な海域である。実験は夏期の日中に実施したので、ほとんど無風状態にあり、海面は有義波高で数cmのさざ波が発生する程度で、航走波の計測実験にとって外乱波の影響の少ない最適な気象・海象条件であると考えられる。実験海域の平均水深は約15mであり、航走波の波長から航走波を深水波とみなすことができる。

写真-1は供試船「ひかり」の概要、表-1は主要寸法を示す。供試船は広島商船高等専門学校の実習船であり、小型の高速艇に属する。主に学生用の小型船舶操縦実習や



写真-1 供試船「ひかり」

表-1 供試船「ひかり」の主要寸法

全長：L	17.40m
垂線間長：Lpp	14.98m
船幅：B	3.88m
船深：D	1.60m
総トン数	16t
船質	FRP
最大速力	26.4kt

1 正会員 工博 神戸大学教授自然科学系先端融合研究環
2 非会員 修(商船) 広島商船高等専門学校教授電子制御学科

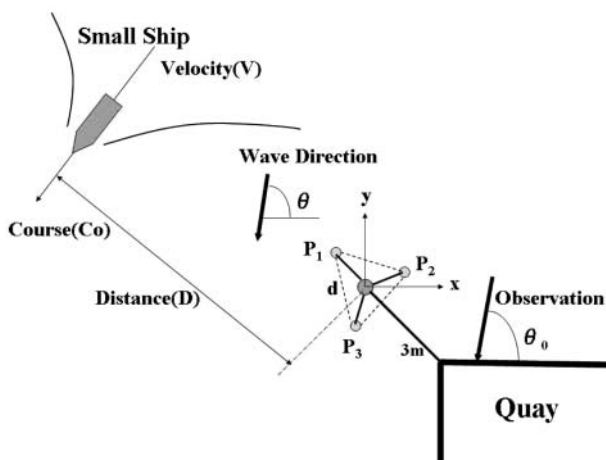


図-1 航走波の計測の概略

周辺海域の海洋調査等の研究用として利用されている。

図-1は航走波の計測実験の概略を示す。防波堤から海上に張り出した支柱の先端に、三角形形状に3個の波高計を固定した。

写真-2は波高計の三角形アレーを示す。三角形の大きさは一辺が $2\sqrt{3}\text{m}$ の正三角形である。波高計は超音波式水位計であり、この波高計アレーに到来する航走波を3点で同時計測した。

航走波理論のケルビン波では、伝搬中に航走波の波向は逐次変化する。しかし、波高計アレーに到来し通過する短時間では、航走波は局所的におよそ波板のような規則波に見えるので、本研究では波峯線に対し直角方向に伝搬する航走波の到来方位を波向(θ)と定義した。航走波の波向解析の検証として、防波堤上に設置の方位盤で波の到来方向(θ_0)を目視観測し、解析結果と比較した。

供試船は波高計アレーの沖合を一定速力で針路を維持して航行する。実験は、波高計アレーの中心と供試船が航走した航跡間の最短距離を一定にして速力を変えた場合と、速力を一定に保ち距離が変化した場合で実施した。波高計と航跡間の距離計測は船上からレーザー距離計で

行った。供試船の針路は航走波が伝搬し、防波堤で反射した波が波高計で計測中の航走波と重なり、波形が乱れないように調整した。波高計アレーの中心と航跡線間の距離は、高速艇が被対象物に接近航行し、航走波が危害を加える恐れのある状況を想定し、比較的短い距離の50m, 70mおよび100mの三種類に設定した。船速は5～26ノットの範囲で変えた。

3. 航走波の波向解析法

MUSIC法は複数点での波動信号の計測値を同時解析し、波源分布の推定や、強い妨害波に埋もれた弱い所望信号の検出等に利用され、高分解能で到来方向を推定する方法である(Schmidt, 1986 ; Sophocles, 1990)。本研究では、MUSIC法を航走波の波向推定に応用した。

波向が θ 、水面変位の時系列が $F_l(t) (l = 1 \dots L)$ で表される L 個の連続波が図-1に示すような波高計アレーに入射したとする。2個の波高計間の到来波の位相差は各波高計間の距離から得られるので、 $K (=3)$ 個の波高計からなる波高計アレーの各波高計への入射波を成分とする位相ベクトルは次式で表される(Kikuma, 1998)。

$$V_l = \left[1, \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{d}{2} \cos \theta_l + \frac{\sqrt{3}d}{2} \sin \theta_l \right) \right\} \right]^T, \dots (1)$$

$$\exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{d}{2} \cos \theta_l + \frac{\sqrt{3}d}{2} \sin \theta_l \right) \right\} \equiv a(\theta_l)$$

ここに、 j は複素記号、 d は各波高計間の距離、 θ_l は波高計への航走波の入射角、 λ は波長である。(1)式を用い、波高計アレーに航走波が伝搬するとき、各波高計への入射波ベクトルを表現すると次式で与えられる。

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_k(t)]^T = AF(t) + N(t) \dots (2)$$

ここに、 $F(t)$ は入射波のベクトル、 $N(t)$ は各波高計で発

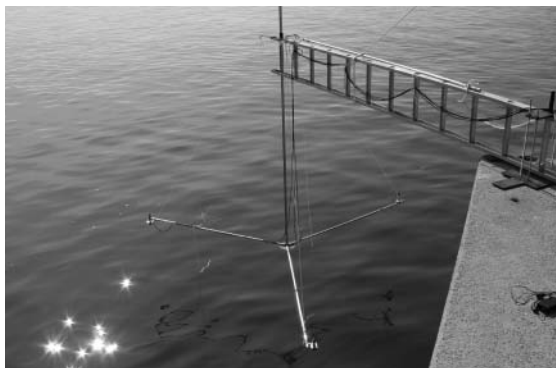


写真-2 波高計の三角形アレー

生ずる雑音ベクトルであり、行列 A は次式で与えられる。

$$A = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_L)] \dots\dots\dots (3)$$

(2) 式の入射波ベクトル $X(t)$ の相関行列 R_{xx} は次式で与えられる。

$$R_{xx} = E[X(t)X^H(t)] = ASA^H + \sigma^2 I \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 E は期待値、 σ^2 は雑音ベクトルの分散、 S は入射波の振幅相関行列と呼ばれ、次式で定義される。

$$S = E[F(t)F^H(t)] \dots\dots\dots (5)$$

もし、雑音がなく L 個の入射波が互いに無相関である場合、(5)式は次式で表される。

$$S = \begin{bmatrix} P_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & P_L \end{bmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $P_l (l = 1, \dots, L)$ は入射波エネルギーである。また、相関行列 R_{xx} はランクが L の非負定値のエルミート行列になる。

(4)式において、エルミート行列 R_{xx} の固有値を $\mu_i (i=1, 2, 3, \dots, k)$ 、固有値に対する固有ベクトルを $e_i (i=L+1, \dots, K)$ で表すと、次式で表される。

$$R_{xx} e_i = (ASA^H + \sigma^2 I) e_i \dots\dots\dots (7)$$

MUSIC法による方向スペクトルPMUは(7)式から得られた固有ベクトル e_i と位相ベクトル $a(\theta_i)$ の2乗積であるパワーの逆数として次式で表される。

$$P_{MU_i}(\theta) = \frac{1}{|e_i^H a(\theta)|^2} \quad (i=1, 2, \dots, K-L; i=L+1, L+2, \dots, K) \dots\dots (8)$$

次に、MUSIC法では各 i で得られたスペクトルの単純和をとらず、次式のような合成和で求める。

$$P_{MU}(\theta) = \frac{1}{\frac{1}{P_{MU_1}} + \frac{1}{P_{MU_2}} + \dots + \frac{1}{P_{MU_{K-L}}}} \dots\dots\dots (9)$$

さらに次式のように正規化する。

$$P_{MU}(\theta) = \frac{1}{\sum_{i=L+1}^K |e_i^H a(\theta)|^2} a^H(\theta) a(\theta) \dots\dots\dots (10)$$

$$= \frac{a^H(\theta) a(\theta)}{a^H(\theta) E_N E_N^H a(\theta)}$$

したがって、(10)式で得られた方向スペクトルは正規化された相対値を示す。ここに、 E_N は次式で表される。

$$E_N = [e_{L+1}, \dots, e_K] \dots\dots\dots (11)$$

4. 波向解析のアルゴリズム

図-2はMUSIC法による航走波の波向解析のアルゴリズムである。航走波のサンプリングタイムは $\Delta t=0.05s$ 、データ数は2000である。航走波は波高計アレーを短時間に伝搬するため、記録データをそのまま解析するのではなく、波時系列の中央部に航走波群があるように前後の風浪部分を削除し、データ数を524あるいは1024個に短縮した。

図-3は加工された航走波の時系列の一例である。図の中央部の数個の大きな波群が航走波であり、その前後の小さな波が風浪である。航走波の特色である、平穏な海面に突然数個の大きな波群が到来する様子が確認できる。波群は包絡線状に伝搬する。波数は航走船舶との距離が短い場合は2~4個、距離が長くなると6~9個程度となり、包絡線の形状が長くなって、波高が減衰する。

次に、加工データを、FFT法でスペクトル解析する。図-4は波のスペクトルを示す。スペクトルのピーク値の周波数成分波を、船首部分で生成された航走波の時系列の中で最大波高を示す波として、解析対象波に選択する。これは図-4に示すスペクトルのピーク周波数が4.15秒に対

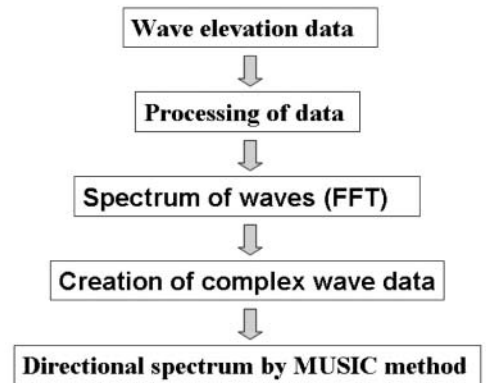


図-2 MUSIC法のアルゴリズム

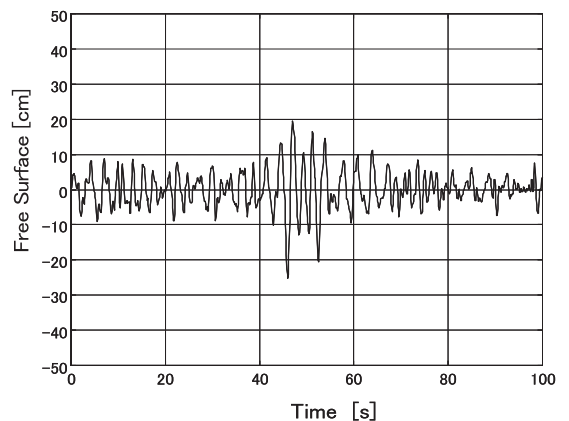


図-3 航走波の波形時系列

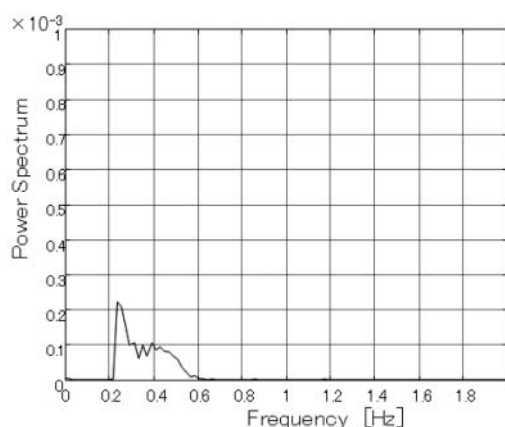


図-4 航走波のスペクトル

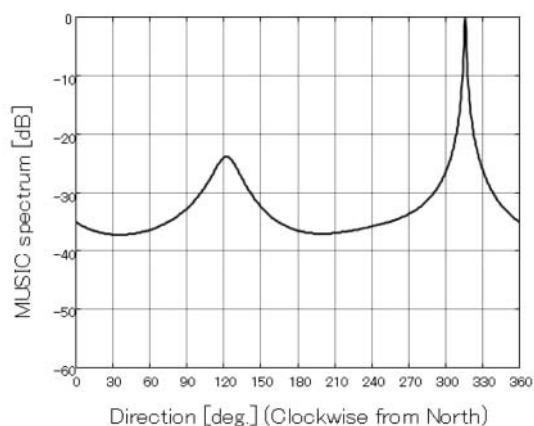


図-5 航走波の方向スペクトル

し、図-3の最大波高の読み取り周期が約4秒であり、概ね一致することから、妥当である。最後に、解析対象波を複素数表示に変換後、MUSIC解析を行うと、波の正規化方向スペクトルが求まる。

図-5はMUSIC法で得られた航走波の方向スペクトルの一例を示す。横軸が航走波の波向(°)、縦軸が(10)式から得られた正規化方向スペクトル(dB単位)である。方向スペクトルは航走波の到来方向に鋭いピークを示し、高分解能の波向が得られた。波向120°付近の小さなピークは小さな風浪によるものと考えられる。

5. 波向の解析結果

MUSIC法による航走波の波向解析の精度検定は、方位盤での波向の目視観測との比較によって行った。波向の目視観測は必ずしも厳密な方法でないが、前述の通り、波高計アレーを通過時の航走波が概ね規則波であるため、波向の目視計測は比較的容易である。

表-2は波高計アレーと航行船舶の航跡間の距離を一定に保ち船速が変化した場合での、航走波の波向解析と目

表-2 航走波の波向の目視観測と解析結果の比較

(Distance 50m)			
Ship speed (k't)	Observation (θ_0)	Measurement (θ)	Error ($ \theta - \theta_0 $)
5	300	—	—
8	310	310	0
10	325	315	10
12	310	300	10
14	310	300	10
20	320	320	0
22	320	320	0
24	320	320	0
26	320	320	0

(Distance 70m)			
Ship speed (k't)	Observation (θ_0)	Measurement (θ)	Error ($ \theta - \theta_0 $)
5	310	—	—
8	320	310	10
10	320	310	10
12	320	310	10
14	320	305	15
20	320	315	5
22	320	320	0
26	320	320	10

(Distance 100m)			
Ship speed (k't)	Observation (θ_0)	Measurement (θ)	Error ($ \theta - \theta_0 $)
5	320	—	—
8	320	320	0
10	320	310	10
12	320	310	10
14	320	310	10
20	330	320	10
22	330	330	0
24	330	330	0
26	330	330	0

視観測結果との比較を示す。供試船の機関出力の性能面から、船速5ノット以下の低速時で、一定速力維持の航走は困難であった。低速時、航走波の波高が小さく、必ずしも波形が明確でないが、波向の目視観測は概ね可能である。しかし、計測した波時系列では、航走波の波高が小さく、風浪と航走波の波高の区別ができなくなり、スペクトル解析すると図-4に示すような、顕著なピーク値が見られない。結果として、航走波の正確な周波数が抽出できず、方向スペクトルに複数個の小さなサイドローブが現れ、分解能低下や、解析不良となった。供試船の速力が速くなると、航走波の波高が増加し、目視観測で

も航走波の波向の確認ができるようになり、スペクトルに顕著なピーク値が現れ、航走波の周波数が求まる。その結果、目視観測と解析の波向との差が最大で 15° 以内、さらに高速では、両者の波向が一致するようになる。

以上から、航行速度8ノット以上では波向の差が小さく、MUSIC法による航走波の波向予測は十分優れていることがわかった。さらに、図-5に示す通り方向スペクトルは鋭いピークとなり、高分解能であることを示した。航走波の波長は船速から推定でき、波長と波高計アレーの大きさの比率が解析結果に影響を与えることが予想される。表-2の全計測及び解析結果において、波長(λ)と三角形アレーの一辺(d)との比 λ/d を計算すると $0.4\sim 2.8$ で高分解能の波向計測が可能であることが解った。

6. 結論

電波信号の波向解析に応用されているMUSIC法により、高速小型船舶が造る航走波の波向解析を行った。実船による航走波の波向計測の実験を行い、解析と目視観測結果との比較から解析波向の精度検定を行った結果、以下の主要な結論を得た。

- 1) MUSIC法による航走波の正規化方向スペクトルは鋭いピーク値を示し、高分解能の波向が得られる。
- 2) 小型船舶の速力が8ノット以上では、MUSIC法による解析と目視観測による航走波の波向との差は最大 15° 以内であり、MUSIC法は優れた波向の解析が可能である。
- 3) 供試船の速力が $8\sim 26$ ノットの範囲では、波高計アレーの形状大きさが航走波の波向解析に影響しない。

以上の結果、MUSIC法による高速小型船舶が造る航走波の波向解析は優れた高分解能を示し、有効であることがわかった。本研究では、MUSIC解析法の精度の検定が

主目的であり、比較対象とした目視観測が容易に可能であることを主眼に、岸壁から張り出した支柱に設置の波高計アレーで計測を行った。今後、筏や生け簀などが点在する海岸から離れた沖合の任意地点において、航走波の波向計測が可能なシステムの開発を行う予定である。

最後に、本研究の実船実験に際し、多大なご協力を頂いた、広島商船高等専門学校の練習船「ひかり」の船長及び乗組員ならびに技術職員に対し、深く感謝致します。

参 考 文 献

- 塩谷茂明・藤富信之・石田廣史・山里重将(1996): 三種類の小型実船による航走波の特性. 水産工学, 33号, pp.123-134.
- 塩谷茂明・斎藤勝彦・藤富信之(1998): 航走波中の小型船舶の動揺特性について. 水産工学, 35号, pp.9-16.
- 塩谷茂明・藤富信之・斎藤勝彦(1998): 実海域における滑走艇による航走波の特性について. 日本航海学会論文集, 第98号, pp.17-26.
- 塩谷茂明(2001): 有限体積法を用いた数値計算による小型船舶の航走波の推定について. 水産工学, 38号, pp.43-51.
- Hertzberg, R. (1954): Wave-Wash Control on Mississippi River Levees, Transactions ASCE, 119, Paper 2688, pp.628-638.
- Kikuma N. (1998): Adaptive Signal Processing with Array Antenna, Science and Technology Publishing Company Inc., pp.174-178.
- Schmidt R.O. (1986): Multiple emitter location and signal parameter estimation, IEEE Transaction of Acoustics, Speech & Signal Process, ASSP-33, 2, pp.276-280.
- Shiotani S., N. Fujitomi, K. Saito, and H. Ishida, (1996): Measurements and Simplified Estimation Methods of Ship Waves due to Small Vessel, Proceedings of Techno-Ocean '96 International Symposium, pp.663-668.
- Sophocles J.O. (1990): Optimum Signal Processing. An Introduction. McGraw-Hill Book Co., pp.358-370.
- Sorensen R. M. (1967): Waves Generated by a Moving Ship, Shore and Beach, 35, No.1, pp.21-30.