

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

藤井英信*・河口信義**・石田廣史**・出口一郎***

長周期重力波は周期が長く振幅が小さいため、従来の観測方法では伝搬方向の精度良い計測が困難な場合がみられた。筆者らはシミュレーションにより、狭帯域信号とみなせる波の水面上下動変位をアレー配置した観測ブイと GPS を用い計測し、その計測結果に MUSIC 法を適用することで、波の伝搬方向の精度良い推定が可能なることをすでに示した。本研究は、シミュレーション結果を実験的に検証するため、台風からのうねりの伝搬方向を大阪湾内にて提案システムを用いて実測した。その結果、多方向から伝搬してくる同一周期のうねりの伝搬方向を高い分解能で推定できる可能性があり、本システムが長周期波浪の計測に有効であることを示す。

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（例えば、合田，1995；青木ら，1997，2002）。長周期重力波は周期が長く振幅が小さいため、従来の観測手法では精度の良い計測は困難である場合があった。そこで本論文では、はじめに長周期重力波の成因と特性を探索するため、その伝搬方向を、筆者らが先に提案しているアレー配置されたブイのシミュレーション結果（Fujii ら，2002）を用い、伝搬方向推定の精度面から実用上問題がないことを実験的に検証する。実験は、ブイ間隔と比較して狭帯域信号とみなせる台風からのうねりを対象として行う。

提案する観測システムは、アレー配置された複数のブイによって構成される。このシステムを設置する海域を通過する波の水面変位量が狭帯域信号と仮定出来れば、ブイの上下動と位置を GPS によって数 mm 単位で計測し、その計測結果に Multiple Signal Classification (MUSIC) 法を適用することで（菊間，1998；Fujii ら，2002）、波の正確な伝搬方向の推定が可能である。本研究では、このシステムを用いて四国沖の台風で生成されたうねりの伝搬方向および強度を大阪湾内での実測結果に基づいて推定すると同時にそれら推定精度および精度に及ぼす要因について検討する。

2. 実験概要

実験は、うねりが友が島水道から大阪湾に入ってきている平成 14 年 9 月 5 日 12 時 25 分から約 1 時間、GPS システムを装備した 5 隻の小型カッター（以下「ブイ」と言う。）を神戸港東水路沖の防波堤南側（沖側）に係留させ、リファレンス局を防波堤上に設置して行った。そ

れらのシステム配置の概要を図-1 に、また小型カッター、および防波堤上のリファレンス局における GPS アンテナの設置の様子を図-2(a)，(b) にそれぞれに示す。さらに、実験時における気象概況を表-1 に示す。

前報のシミュレーション結果（Fujii ら，2002）から、精度良い波の伝搬方向推定値を得るためには、ブイ間隔を波長の 0.1～1.0 倍程度とする必要があることが分かっている。本実験では、舶用レーダーを用いた実験結果（石田ら，1996）より、大阪湾内のうねりの波長を約 100 m と予測し、実験でのブイ間隔を予測波長の 0.5 倍である 50 m とした。

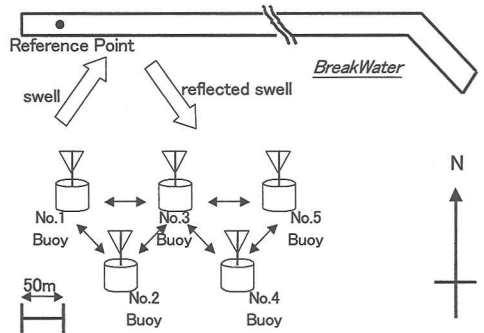


図-1 システム配置



図-2(a) 小型カッター上に装備した GPS システム

* 学(商船) 大島商船高等専門学校教授商船学科
** 博(工) 神戸商船大学助教授商船学部
*** 理 博 神戸商船大学教授商船学部
**** 正会員 工 博 大阪大学大学院教授工学研究科



図-2(b) 防波堤上のリファレンス局のGPSシステム

表-1 実験時における気象概況

天候	風向	風速(m/s)
晴	SW	4.6

3. 解析および考察

はじめにGPSシステムにより計測したブイの水面変位量をスペクトル解析し、解析対象である波の周期を計測する。次に、GPSにより計測する観測ブイ設置エリアの水深を求め、この波の周期と水深から波の波長を推定する。さらに、最尤推定法に基づく方法によって伝搬する波の数を推定し、次にMUSIC法を用いて伝搬する波の伝搬方向を推定する。最後に、伝搬する波の強度の推定を行い、その強度を基にシミュレーションを行って実測値と比較検証する。以下に各々の段階における解析方法およびその結果を述べる。

(1) 周期、波長および伝搬速度

本実験において対象とする波は、波長約100m、周期約10秒程度の比較的低い周波数成分をもったうねりであり、このうねりの到来方向をMUSIC法により精度良く推定するためには、うねりによるブイの上下動変位がブイ間隔に比べて狭帯域信号である必要がある。そこで、まずGPSシステムにより計測したブイの上下動変位をスペクトル解析し、解析対象であるうねりの周期を求め、このうねりがアレーブイの間隔に対して狭帯域信号となることを示す。

図-3にNo.1ブイの上下動変位の計測結果を示す。本実験を行う前に、陸上において実施した本GPSシステムの観測誤差の評価結果では、標準偏差において8.7mm程度であった。ブイとリファレンス局間の距離が約200mと近距離であることから、計測結果における誤差量も同程度と考えられるので、GPS測定誤差の影響は少なく、本計測結果は妥当であり信頼できると考えられる。

図-4にNo.1ブイの上下動変位の計測結果をFFTして、サンプル数の二乗で規格化したパワースペクトルを示す。この結果より0.08Hz付近に最も低い周波数を

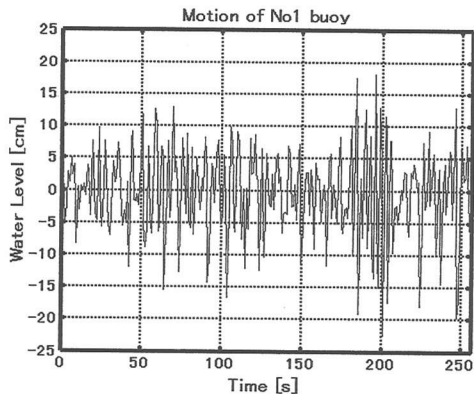


図-3 GPSシステムによるNo.1ブイの上下動変位

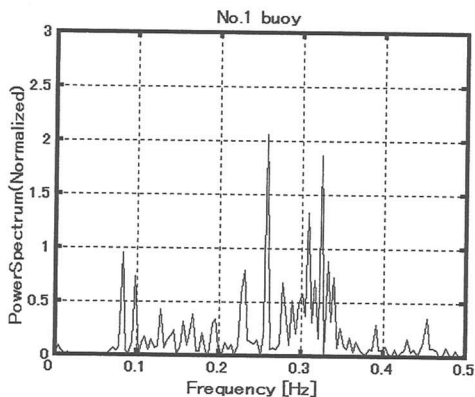


図-4 No.1ブイの上下動変位のパワースペクトル

有するうねりのスペクトルピークがあり、5個のブイの観測結果と横軸の刻み（基本周波数）から、解析対象とするうねりの周波数を0.082Hz、周期を12.2秒とした。これより、各ブイで得られた計測値に対してフィルタリング処理を行って解析用のデータとして総数295個を得た。

また、計測対象であるうねりの周期と水深から、このうねりは浅海波と見なされるので、波の伝搬速度 C (m/s) と波長 L (m) は、次式で与えられる（淵ら、1976）。

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}} = \frac{L}{T} \dots \dots \dots (1)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 g は重力の加速度、 L は波長、 T は周期、 h は水深である。実験海域の水深は約12～14mであり、実験実施時刻における潮高は約20cm程度の低潮時であったことから、水深を13m程度とすると、波長は約130mと推定される。

(2) 狭帯域条件

次に、アレーブイの間隔に対してこのうねりが狭帯域信号となるための条件を次式に示す (菊間, 1998)。

$$2\pi\Delta f \frac{|\Delta d_k|}{C} \ll 1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 Δf はうねりの帯域幅、 Δd_k は基準ブイと k 番目のブイの間隔、 C はうねりの伝搬速度とする。

図-4 より、うねりの帯域幅は約 0.005 Hz、ブイ間隔は最大で 100 m、伝搬速度 10.6 m/s より、(3) 式の左辺は約 0.3 となり右辺の 1 に比べて十分小さいことから、狭帯域信号の条件を満足していることがわかる。

(3) 波数の推定

一般的には陸上付近に伝搬する波は防波堤、岸壁などの人工物あるいは海岸などから反射せられるために、同一周波数の波が複数存在する。本研究で提案する GPS ブイアレー波浪観測システムは、同時に存在する同一周波数の複数の波の数と伝搬方向を精度良く推定可能である。まず、ここでは波の数の推定法およびその結果について述べる。

本実験におけるブイの数は 5 個としていることから、MUSIC 法を用いて推定できる到来波は最大 4 個に限定される。到来波の推定は最尤推定法をもとにした AIC および Minimum Description Length (MDL) の 2 指標を用いる (Wax ら, 1985)。AIC と MDL は、ブイの数を p とすると次式で与えられ、 $k=0, \dots, p-1$ に対して、 $AIC(k)$ あるいは $MDL(k)$ が最小値となる k の値を伝搬波の数と推定する。

$$AIC(k) = -2 \log \left(\frac{\prod_{i=k+1}^p l_i^{1/(p-k)}}{\frac{1}{p-k} \sum_{i=k+1}^p l_i} \right)^{(p-k)N} + 2k(2p-k) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$MDL(k) = -\log \left(\frac{\prod_{i=k+1}^p l_i^{1/(p-k)}}{\frac{1}{p-k} \sum_{i=k+1}^p l_i} \right)^{(p-k)N} + \frac{1}{2} k(2p-k) \log N \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 l_i は観測データの共分散行列の固有値、 N はデータ数とする。

共分散行列の固有値から、データ数 295、 $k=0 \sim 4$ における AIC, MDL をもとめた結果を表-2 に示す。同表の結果から AIC, MDL とともに k の値が 4 の時に最小値となることから、伝搬波の数を 4 とする。表中の Inf. は値が大きくて定まらないことを表す。

ただし、本実験ではブイの個数を 5 としたことから k が $0 \sim 4$ に限定されたが、大阪湾内におけるうねりの正しい伝搬波の数を推定するためにはブイの数をもう少し多

表-2 伝搬波数の推定結果

k	0	1	2	3	4
AIC	Inf.	Inf.	1014.8	353.2	48.0
MDL	Inf.	Inf.	536.9	215.3	68.2

表中の Inf. は、値が無限に大きくなることを示す。

くする必要がある。

(4) ブイ位置の変動

ブイは錨によって係留されているが、各ブイは海上における風や潮流によって絶えず移動している。図-5 に実験時のブイ位置と変動を示す。

また、表-3 にブイ位置の変動を評価するために各ブイの平均位置からのずれを標準偏差 (σ_x , σ_y) で示す。前報 (Fujii ら, 2002) におけるシミュレーションによる評価結果および本結果から各ブイ位置の変動がうねりの伝搬方向推定に及ぼす影響は少ないと考えられる。

(5) 伝搬方向の推定

以上の結果から、うねりの周期 12.2 秒、波長 129.6 m、伝搬波の数 4 が決定されたので、ここで MUSIC 法により伝搬方向を推定した結果を図-6 に示す。

図-6 において卓越した MUSIC スペクトルを持つうねりは主に 85, 226, 315 (度) の 3 方向である。ここで、各 MUSIC スペクトル値は正確にはうねりの強度を表してはいないことに注意を要する。うねりの成因は、226 度のものは友が島水道から侵入、伝搬してくるうねりで、315 度のものは防波堤からのそのうねりの反射波と考えられる。85 度のものは、観測海域東方の大阪港埋立て護

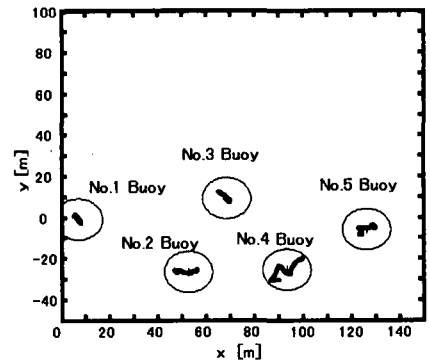


図-5 実験時のブイ位置と変動

表-3 各ブイ位置の変動

ブイ番号	1	2	3	4	5
σ_x (m)	0.83	2.98	1.42	3.16	2.49
σ_y (m)	1.20	0.55	1.56	2.62	1.53

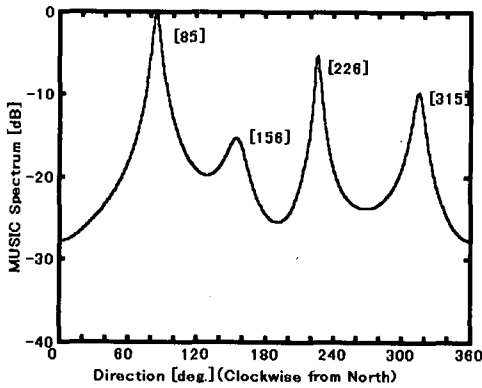


図-6 MUSIC法による伝搬方向の推定結果

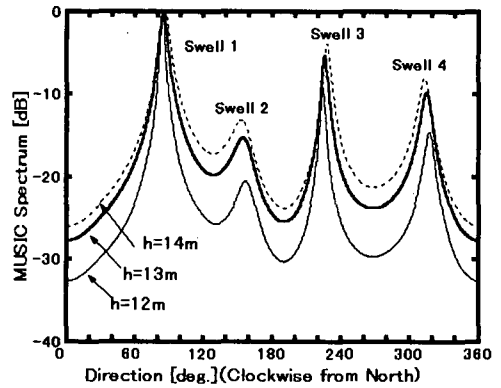


図-8 3波長による MUSIC スペクトラム

岸からの反射波とも考えられるが、距離関係から 315 度の防波堤反射波より強い強度を有するとは考え難く、反射波であるかどうかは、さらに調査が必要と考えられる。

(6) 伝搬波の強度

伝搬方向が求まると、次式 (Schmidt, 1986) を用いて到来波の強度が得られる。

$$S = (A^H A)^{-1} A^H (R_{xx} - \sigma^2 I) A (A^H A)^{-1} \dots \dots (6)$$

ただし、 S は信号相関行列、 A は方向行列、 R_{xx} は観測ベクトルの相関行列、 σ^2 は観測雑音の分散値とする。

(6) 式から求まる行列 S の対角成分が伝搬波の強度を示す。この式から、各うねりの強度 (cm) を求めると 1.6 (85 度)、1.8 (226 度)、0.8 (315 度) であり、226 度方向からのうねりの強度がもっとも大きかった。

次に推定された 4 つの到来方向と (6) 式から得られた各うねりの強度に基づいてうねりを再生する。その再生されたうねりによって各ブイで観測される上下動変位をシミュレーションし、図-6 に書き加えた結果を図-7 に示す。その結果から、実測および再生による MUSIC スペクトルは非常に近い値を示していることがわかる。

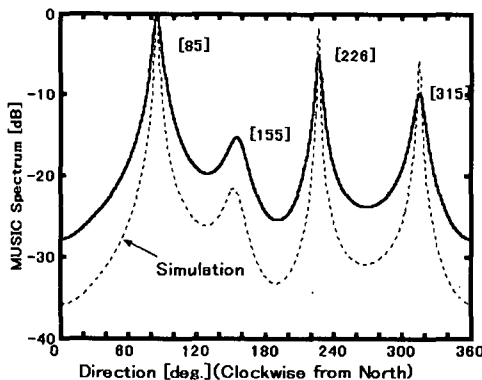


図-7 実測と再生による MUSIC スペクトルの比較

4. 検 討

3.(1)で述べたように、うねりの周期は観測データの FFT 結果から得られるが、波長および伝搬速度は水深と周期を基にした単調調和波の理論式から得られる推定値である。本解析ではこの推定値をある値に決定し、その値を基に伝搬方向の推定を行う。したがって、ここでは異なる 3 種類の推定波長に基づき伝搬方向の推定を行うことで、得られた結果の妥当性の検討を行う。

異なる波長は観測したうねりの周期と水深から推定される。したがって、ここでは 3 種類 (12, 13, 14 m) の水深を用いた場合、どの程度、伝搬方向の推定結果に違いが現れるか検討する。上記 3 種類の水深 (h) から得られるうねりの波長はそれぞれ 125.1, 129.6, 133.8 m であり、これらの波長により得られた MUSIC スペクトラムを図-8 に示す。

また、卓越している 4 つの MUSIC スペクトラムの方向を、各波長に対して求めた結果を表-4 に示す。さらに、各波長に対する各スペクトラムの推定伝搬方向の半値幅の違いを表-5 に示す。

これらの結果から、推定波長が多少ずれても推定伝搬方向においては最大 4.0 度、およびそのスペクトラムの半値幅においては最大 3.8 度の違いであり、異なる 3 種類の推定波長に基づき計算される伝搬方向の推定結果への影響は比較的少ないと考えられる。したがって、本提案システムを用いて行う、うねりの伝搬方向推定結果に対する波長の推定誤差の影響は少ないと考えられる。

5. ま と め

本論文では、長周期重力波の伝搬方向を精度良く計測するために、アレー配置されたブイにより精度良く計測可能なシステムを提案した。また、推定精度の面から実用上問題がないことを実験的に検証するために、大阪湾

表-4 波長と推定伝搬方向の違い

水深 (m)	波長 (m)	うねりの伝搬方向 (度)			
		1	2	3	4
12	125.1	84.0	157.0	224.2	317.2
13	129.6	85.0	155.0	226.2	315.2
14	133.8	86.0	153.0	228.0	313.2

表-5 波長と推定伝搬方向の半値幅の違い

水深 (m)	波長 (m)	うねりの伝搬方向 (度)			
		1	2	3	4
12	125.1	3.8	20.8	3.9	7.5
13	129.6	5.6	22.5	4.3	7.7
14	133.8	7.6	24.0	5.1	8.2

内にてアレー配置されたブイ間隔に対して狭帯域信号とみなせる台風からのうねりの伝搬方向を提案システムによって測定し、その推定結果を検証することでシステムの有効性を示した。

はじめにブイ上下動変位データをスペクトル解析し、最も低い周波数成分をうねりの周波数成分と推測した。その結果、うねりの周波数は0.082 Hz、周期12.2秒であった。また、実験海域の水深が約13 mであることからうねりの波長を129.6 mと推定し、MUSIC法を用いてその伝搬方向の推定を行い、その結果を示した。

今回の実験結果でみられた大阪湾内における卓越したMUSICスペクトルを持つうねりは主に、85、226、315 (度)の3方向であり、各うねりの強度 (cm) を求めると1.6 (85度)、1.8 (226度)、0.8 (315度)であった。うねりの成因は、226度のものは友が島水道から侵入、伝搬してくるうねりで、強度が最も大きかった。315度のものは防波堤からの反射波と考えられる。85度のものは観測海域東方の大阪港埋立て護岸からの反射波と考えられるが、位置関係から85度のうねりが315度の防波堤反射

波より強い強度を有するとは考え難く、さらに調査が必要と考えられる。

これらの結果から、本提案のGPSブイアレー波浪観測システムは、多方向から伝搬してくる同一周期のうねりの伝搬方向を高い分解能で推定できる可能性があると考えられる。

謝辞： 本実験を実施するにあたり、K-GPS計測システム (古野電気株式会社 GPSメジャー) の使用を快く了承下さいました古野電気株式会社、およびその取り扱いと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岡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

- 青木伸一・喜岡 渉・山村易見・舟橋 香・相川久紀 (1997): 台風通過に伴う沿岸長周期波の増幅と伝播に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 216-220.
- 青木伸一・岡辺拓巳・出口一郎 (2002): 波浪条件の異なる2つの海岸での長周期波の増幅と港内副振動の特性比較, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 231-235.
- 石田廣史・井上篤次郎・塩谷茂明・市川義文・細田竜介 (1996): 船用レーダーによる波浪観測と解析II. 一実船実験一, 日本航海学会論文集, 第96号, pp. 47-52.
- 合田良実 (1995): 不規則波浪に伴う長周期波の諸研究について, 第31回水工学に関する夏季研修会講義集, Bコース, pp. B-6-1-20.
- 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.
- 淵 秀隆・松本次男・斎藤 晃 (1976): 海の波, 地人書館, pp. 17-23.
- 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.
- Schmidt, R. O. (1986): Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation, IEEE Trans., vol. AP-34, No. 3, pp. 276-280.
- Wax, M. and T. Kailath (1985): Detection of Signal by Information Theoretic Criteria, IEEE Trans., vol. ASSP-33, No. 2, pp. 387-39.