

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

A PROPOSAL FOR ARRAYED BUOY GPS WAVE OBSERVATION SYSTEM AND
ACCURACY OF ESTIMATED WAVE PROPAGATIONAL DIRECTION

藤井英信¹・河口信義²・石田廣史³・出口一郎⁴

Hidenobu FUJII, Nobuyoshi KOUGUCHI, Hiroshi ISHIDA and Ichiro DEGUCHI

¹非会員 大島商船高等専門学校 商船学科 (〒742-2193 山口県大島郡大島町小松 1091-1)

²非会員 博士(工学) 神戸商船大学 商船学部 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

³非会員 理博 神戸商船大学 商船学部 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

⁴正会員 工博 大阪大学大学院 工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

The long-period gravity waves of which the period is from some tens seconds to some tens minutes do not induce only the big sway of a ship moored and berthed in the harbor but also strong exfoliated flow and vortices near the harbor entrance. They cause serious problems on the safety of vessels berthing in, entering into and leaving a harbor. However, these waves have not been researched sufficiently yet.

In this paper, the long-period gravity waves measurement system of arrayed buoys equipped with the kinematic GPS is proposed. Three forms of arrayed buoys were examined for the wave propagational direction analysis by the method of the Multiple Signal Classification (MUSIC). Based on the simulation, the double triangular form could analyze most precisely among the forms, and the half power directional width was less than 1.6 degrees for non-coherent waves. And if span distances between the buoys were selected longer than 0.1 wavelengths, the half power directional width was less than 7 degrees.

Key Words : *Safety navigation, Long-period Gravity Wave, Arrayed buoy, kinematic GPS, Wave direction*

1. はじめに

港湾計画および設計上, 周期0.1~30秒の一般的な重力波が原因となるさまざまな問題については, 海洋および土木工学の研究成果によってハード的な側面から対応策がとられ, かなりの部分が解決されているように見受けられる。しかし, その一方で, 周期が数十秒~数十分にあたる長周期重力波によっても, 港湾内に停泊している船舶は大きな動揺を受けるが, その対策についてはまだ十分とは言えず, 現在でも係留索の強度や荷役作業などで問題が発生している^{1), 2), 3)}。

長周期重力波は外洋から海岸部へ到来してくると考えられ, その長い水平水粒子運動は海底付近の流れを生じさせて海底砂や泥を搬送して港湾を埋め水深を浅めたり, 港湾口付近では強い剥離流や早い流れを発生させて, 付近の狭い航路を航行する船舶の安全運航に問題を起す。さらに, 波浪エネルギーの伝搬減衰が小さくて反射率が大きいので, 港湾への進入後もほとんど減衰せず, 港湾

内で反射を繰り返して港湾固有振動と共振する場合には波高を増大させ, 港内の停泊および係留船舶に危険で大きな動揺を生じさせる。このような長周期波浪による諸問題に対して, すでにいくつかの研究は行われているが^{4), 5), 6)}, その成因や特性については必ずしも, 明確に解明されたわけではない。

本研究の目的は長周期波浪の成因と特性を探求することを目的とし, 本論文では長周期重力波における生成要因の一つである自由進行波を対象とし, その波の情報の一つである波の到来方向を, アレー配置されたブイにより精度よく計測可能なシステムを提案し, 実用化に向けて本提案システムの推定精度をシミュレーションを用いて評価した結果を示す。

2. システム構成および原理

(1) システム構成

長周期重力波(周期数十秒~数十分)は通常の重力波

(周期0.1秒～約30秒)より周期が非常に長く振幅が小さいため、しばしば従来の観測技術では海域の制限から実測が不可能であったり、精度良い計測は困難である場合があった。しかし、観測ブイを設置した海域を通過する波の上下動が狭帯域信号と仮定できるならば、アレー配置したブイの上下動と位置を精密に計測し、その計測結果にMultiple Signal Classification (MUSIC) 法を適応することで、波の到来方向の精度良い推定が可能であると考えられる。

そこで、本研究では、複数の観測ブイをアレー状に配列し、Carrier Phase方式によるディファレンシャルGPS (キネマティックGPS方式) で、ブイの三次元移動量を数mmレベルで観測することにより、長周期重力波の到来方向を精度よく計測できるシステムを提案し、図-1にそのシステム構成を示す。

陸上にリファレンス局、海上にアレー状にGPSを搭載したブイを配置し、各ブイの計測結果を無線でリファレンス局に送信することで、波向きの実時間計測が可能となる。

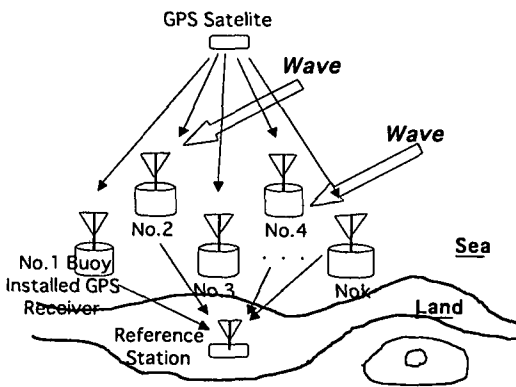


図-1 提案するシステム構成

(2) 到来方向推定の原理

a) MUSIC法

ここでは、アレー状に配置されたブイの上下および水平変位量を観測した結果を用いて、波の到来方向を精度良く推定するMUSIC法の原理^{7),8),9)}についてその概要を述べる。

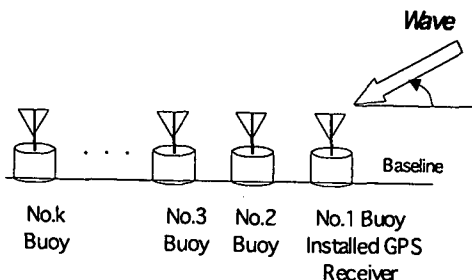


図-2 等間隔リニアアレー

図-2に基本的なアレーの一つである等間隔リニアアレー配置を示す。いま同図で、波長が λ である l 番目の波がベースラインに対して角度 θ_l の方向から到来するものとする。このとき、各ブイ (No. 1～No. k) の上下動には時間的に位相差が生じる。そこで、No. 1ブイを基準ブイ、各ブイの間隔を d とすると、到来する波の k 番目のブイにおける上下動の位相を示す方向ベクトルは次式となる。

$$\mathbf{V}_l = [1, \exp\{-j\frac{2\pi}{\lambda} d \cos\theta_l\}, \dots, \exp\{-j\frac{2\pi}{\lambda} d(k-1) \cos\theta_l\}]^T \equiv \mathbf{a}(\theta_l) \quad (1)$$

ここで、到来する波の数を L ($l = 1, \dots, L$) とすると、方向ベクトルを用いて各到来波に対する方向行列が

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_L)] \quad (2)$$

で与えられ、各ブイにおける上下変位量の観測値ベクトル \mathbf{X} は、方向行列を用いて次式で表される。

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_k(t)]^T = \mathbf{A}\mathbf{F}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (3)$$

ただし、 $\mathbf{F}(t)$ は基準ブイにおける各到来波の上下変位量で、

$$\mathbf{F}(t) = [F_1(t), F_2(t), \dots, F_L(t)]^T \quad (4)$$

であり、 $\mathbf{N}(t)$ は各ブイにおける正規分布する観測雑音ベクトルである。

これより \mathbf{X} の共分散行列 \mathbf{R}_{xx} が、

$$\mathbf{R}_{xx} = E[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)] = \mathbf{A}\mathbf{S}\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I} \quad (5)$$

で与えられる。ただし、 σ^2 は観測雑音の分散、 \mathbf{S} は信号(波源)相関行列で、次式で表される。

$$\mathbf{S} = E[\mathbf{F}(t)\mathbf{F}^H(t)] \quad (6)$$

ここで、 \mathbf{R}_{xx} はランク L のエルミート行列で非負定置行列となるので、 \mathbf{R}_{xx} の固有値から到来する波の数が得られ¹⁰⁾、 \mathbf{R}_{xx} の固有ベクトルから次式を用いて方向スペクトル $P_{MU}(\theta)$ が求まる。

$$P_{MU}(\theta) = \frac{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{E}_N\mathbf{E}_N^H\mathbf{a}(\theta)} \quad (7)$$

ここで、 \mathbf{E}_N は、 \mathbf{R}_{xx} の最小固有値に対応する固有ベクトルからなる行ベクトルである。

b) 空間平均法

ブイによる波の到来方向推定では防波堤等からの反射波に対して、コヒーレントな波（完全相関波）を考慮しておく必要がある。しかし、コヒーレント波は信号相関行列のランクが1となり、このままでは到来する波の方向を知ることが不可能である。このため、空間平均法により、アレーをいくつかのサブアレーに分け、各サブアレー毎の共分散行列 \mathbf{R}_{xx}^n をもとめ、次式で示されるように平均をとる。

$$\bar{\mathbf{R}}_{xx} = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \mathbf{R}_{xx}^n = \mathbf{A}\bar{\mathbf{S}}\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I} \quad (8)$$

この操作によりランクを到来する波の数まで回復させ、コヒーレント波に対する方向スペクトルが(7)式から得られる。ただし、空間平均法を適応するためには同形をなす2つ以上のアレー配置（サブアレー）を必要とする。

3. シミュレーション条件とアレー配置

(1) ブイ観測システムの特徴

システムの実現性を考えると、本論文でシステムの特徴を考慮することは大切なことであると考える。本提案システムは数個のブイをアレー配置することで、波の到来方向を推定する。したがって、電磁波の到来方向推定とは異なる種々の特性が考えられ、以下にこれらの特徴を挙げる。

- ①推定対象である波の周波数は常に一定ではなくて、天候に依存して変動する。
- ②推定対象である波の到来速度は、水深に依存して変動する。
- ③様々な定数が線形理論により求められているが、現実には非線形性が大きく関与する場合も考えられる。
- ④防波堤等による反射などにより、コヒーレントな波が存在する可能性が多い。
- ⑤観測ブイ間隔は風浪や潮流の影響により変動する。
- ⑥ブイ間隔によって推定可能な波の周期が制限される。

(2) シミュレーション条件

シミュレーションの条件^{11), 12), 13)}を次のようにした。

- ①長周期重力波の振幅50mm, 周波数0.01Hzとする。
- ②観測雑音は白色性正規雑音とし、その振幅は既に行ったGPSの評価実験の結果より標準偏差で20mmとした。長

周期重力波の振幅との関係から、信号対雑音比は8dBとする。なお、本雑音はブイとリファレンス局間の距離が離れるに伴って大きくなる。

- ③到来する波の数は2, 到来方向はそれぞれ30°, 255°とする
- ④非コヒーレント波の周波数は0.015Hzとする。
- ⑤データ収録におけるサンプリング間隔は1秒, サンプル数は500とする。
- ⑥ブイの数は5個とする。
- ⑦ブイの間隔は到来する波の波長の0.5倍を基本とする。

(3) アレー配置

アレーの配置は様々なものが考えられるが、本論文では比較的簡単なリニア、サーキュラー、さらに空間平均法を適応するためにダブルトライアングュラーアレーの三つの配置を用い、各配置について上記シミュレーション条件で到来方向推定精度などを評価する。

a) リニアアレー

リニアアレーは既に2章に述べ、図-2に配置および(1)式に方向ベクトルを示す。本配置は空間平均法を適応できる。

b) サーキュラーアレー

サーキュラーアレーの配置を図-3に示す。円の中心を基準、円の半径を d , 全ブイ数を K とするとき方向ベクトルは次式で表される。

$$\mathbf{V}_\ell = [\exp(j\frac{2\pi}{\lambda}d\cos\theta_\ell), \dots, \exp(j\frac{2\pi}{\lambda}d\cos(\theta_\ell - \frac{2\pi}{K}(k-1)))]^T \quad (9)$$

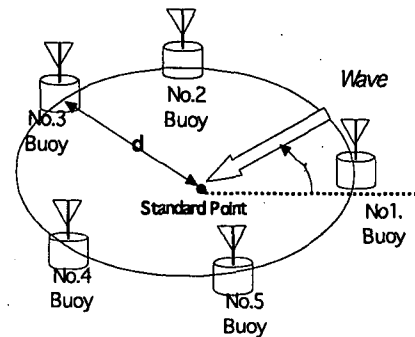


図-3 サーキュラー配置

c) ダブルトライアングュラーアレー

ダブルトライアングュラーは空間平均法を適応するために三角形のサブアレーを二つ組み合わせたものであり、配置を図-4に示す。

ただし、サブアレーのブイの数から、コヒーレント波は2波までしか推定できない。また、No.1ブイを基準にとり、三角形の辺の長さを d とすると、方向ベクトルは次のようになる。

$$\mathbf{V}_\ell = [1, \exp\{j \frac{2\pi}{\lambda} (\frac{d}{2} \cos \theta_\ell + \frac{\sqrt{3}}{2} d \sin \theta_\ell)\}, \dots, \exp\{j \frac{2\pi}{\lambda} (\frac{d(k-1)}{2} \cos \theta_\ell + \frac{\sqrt{3}d\{1+(-1)^k\}}{4} \sin \theta_\ell)\}]^T$$

(10)

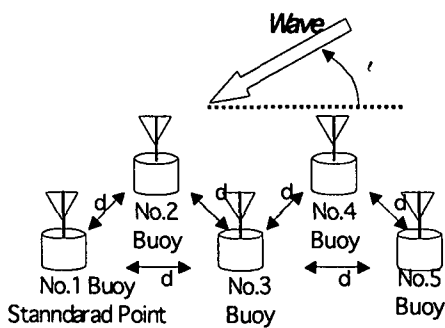


図-4 ダブルトライアングラー配置

4. 結果および考察

(1) リニアアレー

図-5にリニアアレーによる3つの結果を示す。まず、非コヒーレント波は、観測したい波の到来方向(30°, 225°)は顕著にMUSICスペクトラムが卓越しているが、30°方向から到来する波に対して330°, 255°に対しては105°にも卓越したスペクトラムが見られる。これらは、ベースラインに対して対称の方向であり、アレー配置に依存する方向ベクトルを表す(1)式において、余弦の項のみが存在するからである。波の到来方向は全方位から到来することを考えなくてはならないので、一般にはこの配置は波向き計測には向かないと考えられる。

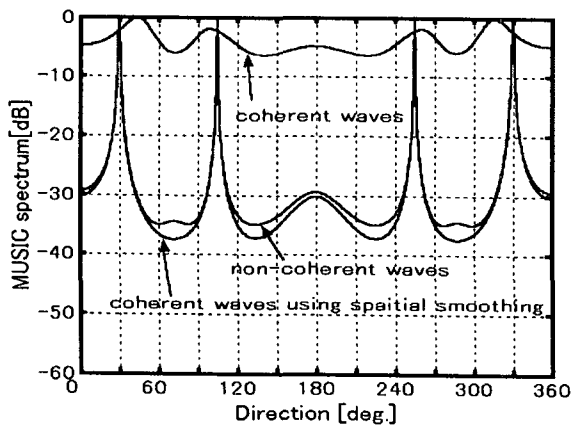


図-5 リニアアレー配置による推定結果

また、コヒーレント波に対しては、明らかに到来方向を特定することはできないが、空間平均法を施すと、対称の到来方向を含めて非コヒーレント波と同程度の方向推定精度となることがわかる。

(2) サーキュラーアレー

サーキュラーアレー配置による推定結果を図-6に示す。本配置では、リニアアレーのように対称的な方向に卓越したスペクトラムは見られず、精度良く観測したい波の方向に卓越したスペクトラムが見られる。ただし、サーキュラー配置一つでは、サブアレーに分割することはできないので空間平均法を適用することが出来ない。したがって、空間平均法を行うにはさらに同じ円配置が必要となり、本配置でコヒーレント波の処理を行うためにはさらに多くのブイを要する。

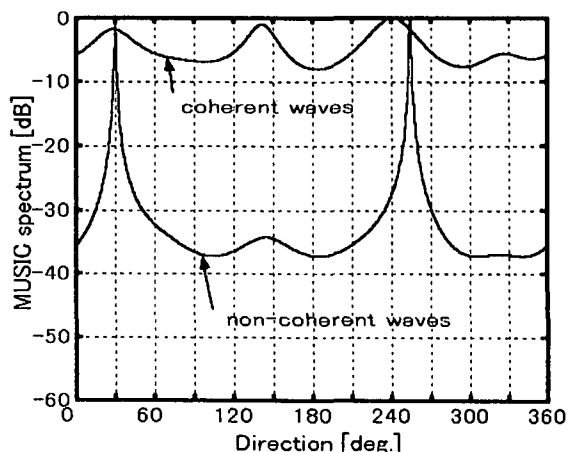


図-6 サーキュラーアレー配置による推定結果

(3) ダブルトライアングラーアレー

ダブルトライアングラー配置による推定結果を図-7に示す。本配置も、リニアアレーのように対称的な方向に卓越したスペクトラムは見られず、精度良く観測したい波の方向に卓越したスペクトラムが見られる。さら

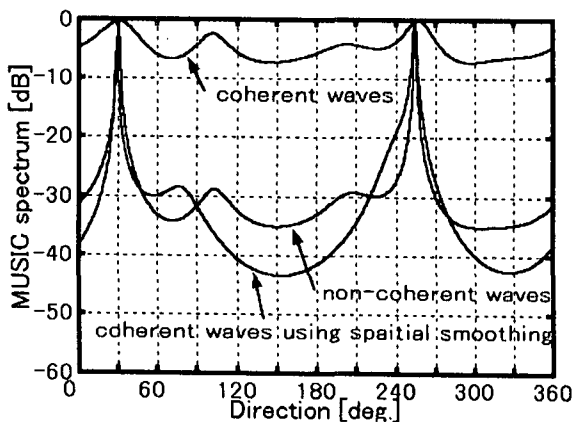


図-7 ダブルトライアングラー配置による推定結果

に、空間平均法を適応することによりコヒーレント波も非コヒーレント波と同様の方向推定精度を示している。ただし、本アレー配置はサブアレーのブイの数から、コヒーレント波は2波までしか推定できない。

以上の結果から、ブイ個数を5個およびコヒーレント波を2波に限定する場合、ダブルトライアングラー配置が望ましい配置と考えられる。

(4) 半値幅による評価

到来方向の半値幅を調べるにより各配置における分解能を調べた。ここでいう半値幅とは到来方向のピークより3dB少ない方向の角度差をいう。表-1は各アレー配置におけるモンテカルロ法によるシミュレーションを30回行ったときの、半値幅の平均値と標準偏差である。多少の差は見られるものの、平均値で1.6°以下という非常に高い精度であった。

表-1 配置別方向スペクトル半値幅

Half Power Width	Geometry		
	Linear	Circular	Double triangular
mean[deg.]	1.1	1.6	1.4
σ [deg.]	0.2	0.5	0.5

(5) ブイ間隔の変位量に伴う評価

ブイの間隔が、ブイの位置変動やGPSの測定誤差のために変化するとき、到来方向に対してどの程度影響するか、ダブルトライアングラー配置の場合について調べた。図-8に示すように、ランダムな水平変位量をdx, dyとして、半値幅により評価した。

ここでも、30回のモンテカルロ法によるシミュレーションを行い、方向スペクトルの半値幅を測った。表-2に、半値幅の変動結果を示す。水平変位量dx, dyが標準偏差0.01 λ (λ :波長)においては、到来方向推定におけるスペクトル半値幅の平均値と標準偏差はそれぞれ1.4°と0.4°であった。同様に、変位量が0.05 λ , 0.10 λ の結果から、変位量が標準偏差で波長の0.05倍

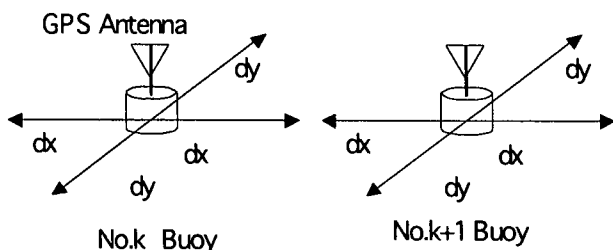


図-8 ブイ位置の変動

表-2 ブイ間隔変動に伴う方向スペクトル半値幅

Half Power Width	Displacement from Span Distance Inequality [$\times \lambda$]			
	dx=0.0 dy=0.0	dx=0.01 dy=0.01	dx=0.05 dy=0.05	dx=0.10 dy=0.10
mean[deg.]	1.4	1.4	1.6	3.0
σ [deg.]	0.5	0.4	0.4	0.9

までは、半値幅の平均値と標準偏差はほとんど同じ値を示すが、0.1倍では平均値、標準偏差共に約2倍となった。そこで、仮説検定によりブイが移動していない場合の平均値と同じであるという仮説で検定を行った結果、0.05 λ までは5%で有意差はなかったが、0.1 λ の場合は有意差が生じた。しかしながら、ブイ位置が波長の0.1倍程度変動する場合においても、方向スペクトルの半値幅の平均値において3.0°、標準偏差において0.9°であり、ほとんど到来方向の推定に影響を及ぼさないと考えることができる。

(6) ブイ間隔と到来する波の波長

長周期重力波になると波長は数千mにも達するので、測定のために理想的なブイ間隔にすることは困難になる。ここでは、波長に対するブイ間隔の違いによってどの程度、差が現れるか半値幅を用いて検討する。ブイの水平位置変動がないという条件下で、波長の0.05倍から1倍までブイ間隔を変えて到来方向の半値幅を求めた。各ブイ間隔に対して30回のシミュレーションを行い、その結果を図-9に示す。同図より、ブイ間隔が波長の0.1倍になっても半値幅の平均値は7°で、標準偏差は1.2°であった。したがって、10°程度の半値幅精度が要求される場合においても、波長の0.1倍程度のブイ間隔であれば到来方向を解析する上で、方位推定精度の観点から十分に要求を満足できると考えられる。

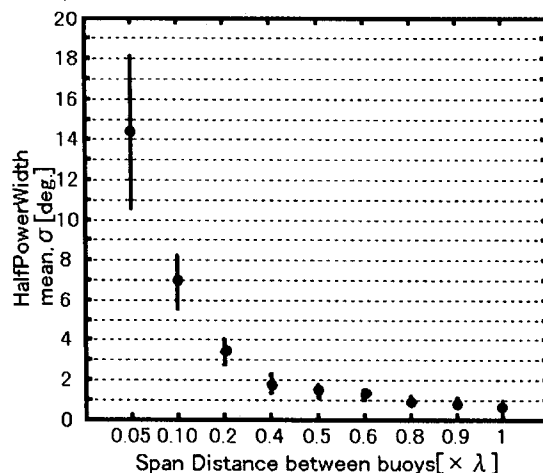


図-9 ブイ間隔と到来方向半値幅

5. まとめ

本論文では、長周期重力波の到来方向を高精度に推定するために、キネマティックGPSによってブイの3次元の変位量を測定する、アレー配置ブイによる観測システムを提案した。提案システムについて、シミュレーションを実施した結果、システムの実現に向けてつぎの結論を得た。

- ①リニア配置は、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対称方向に卓越スペクトラムが生じる。
- ②サーキュラー配置は到来方向の分解能は良好で、ベースラインに対して対称方向に卓越スペクトラムは生じないが、空間平均法によるコヒーレント波に対する処置を行えない。
- ③限定された5個のブイで、2つの波の到来方向の推定を行う場合には、推定精度および空間平均法による対処を考慮し、ダブルトライアングラー配置が適している。
- ④どの配置においても半値幅による評価から、平均値で 1.6° 以下の精度が得られた。
- ⑤ブイの水平位置が波長の0.1倍程度変動しても到来方向の推定に影響を及ぼさないと考えられる。
- ⑥ブイの水平位置変動がないという条件下では、半値幅精度 10° において、波長の0.1倍程度のブイ間隔であれば十分要求を満足できる。

参考文献

- 1) Sakakibara, S., Saito, K. and Kubo, M.: A Study on Long-Period Moored Ship Motions in a Harbor Induced by a Resonant Large Roll Motion under Long-Period Waves, the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 326-333, 2001.
- 2) Sasa, K., Kubo, M., Shirashi, S. and Nagai, N.: Basic Research on Frequency Properties of Long-Period Waves at Harbors Facing to the Pacific Ocean, the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 593-600, 2001.
- 3) 笹健児, 久保雅義, 白石悟, 永井紀彦: 台風時における港内係留船の係留限界予測に関する研究 (第2報) - 予測モデルの精度向上および拡張 -, 海岸工学論文集, 第49号, pp. 1421 - 1425, 2002.
- 4) 合田良実: 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, 1995.
- 5) 青木伸一, 喜岡渉, 山村易見, 舟橋香, 相川久紀: 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, 1997.
- 6) 青木伸一, 岡辺拓巳, 出口一郎: 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号, pp. 231-235, 2002.
- 7) 菊間信良: アレーアンテナによる適応信号処理, 科学技術出版, pp. 174-178, pp. 194-198, 1998.
- 8) Schmidt, R.O.: Multiple emitter location and signal parameter estimation, IEEE Trans. Acoust. Speech & Signal Process, Vol. ASSP-33, No. 2, pp. 276-280, 1986.
- 9) Orfanidis, J.S.: Optimum signal Processing: An Introduction, McGraw-Hill Book Co., pp. 358-370, 1990.
- 10) Wax, M. and Kailath, T.: Detection of Signals by information Theoretic Criteria, IEEE trans., Vol. ASSP-33, No. 2, pp. 387-392, 1985.
- 11) Fujii, H., Kouguchi, N., Ishida, H. and Deguchi, I.: A Basic Study on Arrayed Buoys GPS Wave Observation System, Proceedings of Asia Navigation Conference (CIN-JIN-KIN Joint Symposium 2002), Shanghai, China, pp. 59-67, 2002.
- 12) Fujii, H., Kouguchi, N., Ishida, H. and Deguchi, I.: GPS Wave Observation System with Arrayed Buoys, Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, ION GPS 2002, Oregon, U.S.A., pp. 2733-2740, 2002.
- 13) Fujii, H., Kouguchi, N., Ishida, H. and Deguchi, I.: Long Period Gravity Wave Observation System with GPS Arrayed Buoys, Techno-Ocean 2002, Proceedings, pp.4, 2002.