

平成17年度（財）港湾空港建設技術サービスセンター  
研究開発助成報告書

助成番号：平成18年1月11日付第05-2号  
助成開発項目：(8) 公共施設の維持・管理に関するもの

港内周期波浪計測と港内作業・係留船警報システム構築

平成19年4月

神戸大学大学院海事科学研究科教授

河口 信義

# 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>実験方法</b>	<b>2</b>
2.1	実験概要 . . . . .	2
2.2	波浪観測ブイ . . . . .	5
2.3	港内係留船舶 . . . . .	6
<b>3</b>	<b>解析方法</b>	<b>10</b>
3.1	船体動揺計測 . . . . .	10
3.2	波浪情報計測 . . . . .	11
3.2.1	MUSIC法 . . . . .	11
<b>4</b>	<b>結果および考察</b>	<b>14</b>
4.1	船体動揺 . . . . .	14
4.1.1	直線動揺成分 . . . . .	14
4.2	回転動揺成分 . . . . .	17
4.3	GPSブイによる波浪情報 . . . . .	20
4.3.1	波浪のスペクトルと卓越周期 . . . . .	20
4.3.2	波向き . . . . .	21
4.4	港内波浪の波向きと船体動揺 . . . . .	21
<b>5</b>	<b>警報システム</b>	<b>24</b>
<b>6</b>	<b>まとめ</b>	<b>25</b>

# 1 はじめに

港湾内で発生する通常の重力波（周期約 0.1 秒～30 秒程度）が引き起こす問題は、ハード面から解決されつつあるが、周期が数十秒～数十分にわたる比較的長い周期の長周期波浪が定在性か進行性のなみであるかはまだ明らかにされていない。さらに、これらの長周期波浪は港に係留している船舶や錨泊している船舶にとって、非常に危険な大きな水平運動が誘発され、係留索の切断あるいは走錨など重大な支障をきたしている。そこで、我々は今までに長周期波浪の発生メカニズムを研究するために必要な計測システム構築およびその性能評価に重点を置き研究を進めてきた。

本研究テーマは我々が継続的に進めてきた研究の一要素的な課題として港内の長周期波浪の波向き・波高および係留船舶への影響を計測し、その結果を用いて港内における係留船舶および工事作業船舶の安全を確保することが目的であり、本テーマを実行することで港湾の建設・維持管理に係る技術およびそのためのシステム構築に多大な貢献ができるものとする。

本年度における研究は台風発生時に生じる長周期波による船体動揺計測をキネマティック GPS（以下 K-GPS）によって行う手法を検討し、その結果を評価することを目的とし、南方の外洋に開いている沖縄本島付近にある台風による長周期波浪によって船舶と岸壁が接触し、岸壁損傷による多大な損害が生じている鹿児島県志布志港において、港外ブイ・港内ブイおよび係留船舶のそれぞれにキネマティック GPS を設置し、港内外における長周期波浪情報（波高および波向き）およびそれら波浪が係留中の船舶の動揺に与える影響を実験的に調査し、次年度以降に計画している港内作業・係留船への警報システム構築のための基礎的な資料とする。さらに、警報システム構築に向けて警報表示画面の試作を行う。

## 2 実験方法

### 2.1 実験概要

実験は2006年9月13日11時から13時までの約2時間、志布志港港外に3個と港内係留船舶の近傍海域に3個のGPSブイを設置し、さらに係留船舶（フェリー：12,418トン）の船首、左舷、船尾の3カ所にK-GPS受信機を、また係留船舶から約3km離れた陸上にリファレンス局を設置した。図1に志布志港付近実験海域における港外および港内のブイ設置、図1に係留船舶の係留状態およびGPS受信機設置位置を示す。



図1: 実験海域とブイ・係留船配置



図 2: 港内係留船および付近設置ブイ配置

実験当日の天気図を図3に示す。天気図より、フィリピン東方海上に台風13号が発生しており、その台風からのうねりの影響を計測した。また、実験時における風向 South,



図 3: 実験当日の天気図

平均風速 2m/s, 天候晴れ, 目視による波高は約 10cm 程度であり, 実験時における港内の様子を図4に示す.



図 4: 実験時における港内の様子

## 2.2 波浪観測ブイ

本実験は港外波浪と港内波浪の違いを調べるために、同時に港内および港外に波浪観測ブイを設置して波浪情報（波高および波向き）を計測した。MUSIC法による精密波向き計測を行なうために、港外および港内ブイは3個のブイを1辺約100m間隔で正三角形配置とした。

港外ブイは気象条件が悪くならない限り常時係留状態とし、ブイに設置したGPS受信機による情報は無線LANを用いて、港外ブイ設置付近にある陸上のリファレンス局へのデータ伝送を行なった。設置時における港外ブイおよび近傍の陸上に有るリファレンス局を図5および図6に示す。



図 5: 港外設置ブイ



図 6: 陸上リファレンス局

また、港内設置ブイは無線によるデータ伝送では無く、ブイに設置した小型パーソナルコンピュータに GPS 受信機からのデータを記録し、実験後にデータ解析を行なう。港内ブイを図7に示す。



図 7: 港内設置ブイ

## 2.3 港内係留船舶

港内係留船舶は株式会社「ブルーハイウェイライン西日本」所有のサンフラワー（総トン数12,418トン，全長186m，船幅25.5m）を計測対象船舶とした。船舶の運航スケジュールに従って，志布志港における係留時刻が10時から18時の間であることから実験は11時から13時までの2時間とした。計測対象船舶の全景を図8に示す。

また，係留船舶の動揺を計測するために3つのGPS受信機を設置した。一般的に，陸上リファレンス局と移動局間の距離は20km以内であれば，キネマティックGPSによる精密計測を行なうことが可能であり，本実験における陸上リファレンス局と係留船舶間の距離は約3 km程度であることから，受信したGPSデータをキネマティック処理を行なうための条件は十分満足している。係留船舶へのGPS受信機配置および係留索状態の概要を図9に示す。また船首，船尾および舷側の3カ所に設置したGPS受信機を図10，11，12，船首および船尾における係留索の状態を図13，14に示す。



図 8: 計測対象船舶

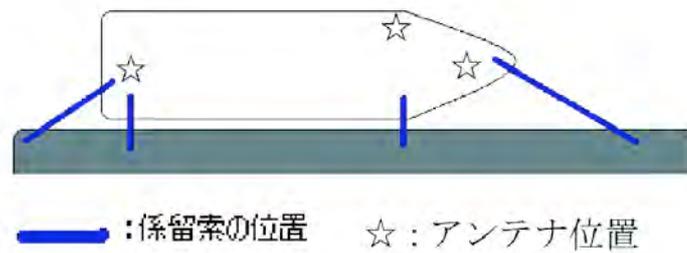


図 9: 係留船舶上の GPS 受信機配置および係留索状態



図 10: 船首配置した GPS 受信機



図 11: 船尾配置した GPS 受信機



図 12: 舷側配置した GPS 受信機



図 13: 船首係留索の状態



図 14: 船尾係留索の状態

### 3 解析方法

#### 3.1 船体動揺計測

係留中の求めたい船体動揺を次の6成分 (sway 左右移動:  $X$ , surge 前後移動:  $Y$ , heave 上下移動:  $Z$ , pitch 前後揺角:  $\psi$ , roll 横揺角:  $\phi$ , yaw 左右揺角:  $\theta$ ) とし, これらを表すために直線運動を表すベクトル  $\mathbf{S}(X, Y, Z)$  と三次元移動体における位置を表すためのオイラー回転角を用いて回転マトリックス  $\mathbf{R}(\psi, \phi, \theta)$  を以下の2つの式で定義する.

$$\mathbf{S}(X, Y, Z) = [X, Y, Z]^T \quad (1)$$

ここで,  $T$  は転置を表す.  
次に

$$\mathbf{R}(\psi, \phi, \theta) = \begin{vmatrix} \cos(\psi)\cos(\theta) & \cos(\psi)\cos(\theta) & -\sin(\psi)\cos(\phi) \\ -\sin(\psi)\sin(\phi)\sin(\theta) & +\sin(\psi)\sin(\phi)\sin(\theta) & \\ -\cos(\phi)\sin(\theta) & \cos(\phi)\cos(\theta) & \sin(\phi) \\ \sin(\psi)\cos(\theta) & \sin(\psi)\sin(\theta) & \cos(\psi)\cos(\phi) \\ +\cos(\psi)\sin(\phi)\sin(\theta) & -\cos(\psi)\sin(\phi)\cos(\theta) & \end{vmatrix} \quad (2)$$

次に, 船体固定直交座標系による3つのGPS受信機位置の中で  $i$  番目の船体固定受信機位置ベクトルを  $\mathbf{P}_{\mathbf{Fi}}(x_{Fi}, y_{Fi}, z_{Fi})$  とする. また, 船上に設置した3台のGPS受信機によって計測した計測受信機位置ベクトルを  $\mathbf{P}_{\mathbf{Gi}}(x_{Gi}, y_{Gi}, z_{Gi})$  とすると

$$\mathbf{P}_{\mathbf{Fi}} = \mathbf{S} + \mathbf{R} \cdot \mathbf{P}_{\mathbf{Gi}} \quad (3)$$

が成り立つ. ここで, 上式は非線形方程式となり, 直接解を求めることが困難であるために各回転角  $\psi, \phi, \theta$  それぞれが5度程度以下の微小角として線形近似を行なうと回転マトリックス  $\mathbf{R}$  は, 次式のように線形近似できる.

$$\mathbf{R}(\psi, \phi, \theta) = \begin{vmatrix} 1 & 1 & -\psi \\ -\theta & 1 & \phi \\ \psi & \phi & 1 \end{vmatrix} \quad (4)$$

そこで、(3)式は6つの未知数  $X, Y, Z, \psi, \phi, \theta$  を持ち、3カ所のGPSアンテナ位置において  $x, y, z$  の3つの位置情報から合計9つの線形方程式が得られ最小二乗法を用いて係留船舶における船体動揺を表す6つの未知数が決定できる。

## 3.2 波浪情報計測

本研究で解析する波浪情報は波高および波向きとする。はじめにキネマティックGPSによるブイ位置のセンチメートル精度での精密測定を実施する。次にGPSブイの高さ方向の計測結果から、その高さ方向における移動量を周波数解析により計測対象波浪の周波数および波高さを決定する。最後に、この周波数を対象とする波浪における波向きをMUSIC法により精度良く推定する。

### 3.2.1 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法の原理についてその概要を述べる。図15に基本的なアレーの一つである三角形アレー配置を示す。

今同図で、波長が  $\lambda$  である  $l$  番目の波がベースラインに対して角度  $\theta_l$  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。

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_1 &= [1, \exp\{-j\frac{2\pi}{\lambda}d\cos\theta_l\}, \dots, \exp\{-j\frac{2\pi}{\lambda}d(k-1)\cos\theta_l\}]^T \\ &= \mathbf{a}(\theta_l) \end{aligned} \quad (5)$$

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

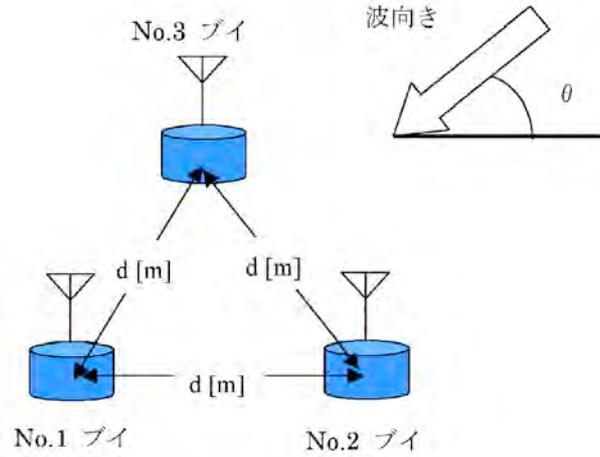


図 15: ブイ配置と波向き計測

対する方向行列が

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_L)] \quad (6)$$

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。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{(t)} &= [x_1(t), x_2(t), \dots, x_k(t)]^T \\ &= \mathbf{A}\mathbf{F}(t) + \mathbf{N}(t) \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、 $\mathbf{F}(t)$  は基準ブイにおける到来する各波の上下動変位量で、本実験ではキネマティック GPS により計測する。また、 $\mathbf{N}(t)$  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、 $\mathbf{X}$  のきょう分散行列  $\mathbf{R}_{xx}$  が

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{xx} &= E[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)] \\ &= \mathbf{A}\mathbf{S}\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I} \end{aligned} \quad (8)$$

で与えられ,  $\sigma^2$  は観測雑音の分散,  $E$  は期待値を表し,  $\mathbf{S}$  は信号 (波) の相関行列は次式で表される.

$$\mathbf{S} = E[\mathbf{F}(t)\mathbf{F}^H(t)] \quad (9)$$

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,  $\mathbf{R}_{xx}$  の固有ベクトルから次式を用いて MUSIC スペクトル  $P_{MUSIC}(\theta)$  が求まる.

$$P_{MUSIC}(\theta) = \frac{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{E}_N\mathbf{E}_N^H\mathbf{a}(\theta)} \quad (10)$$

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.

## 4 結果および考察

### 4.1 船体動揺

#### 4.1.1 直線動揺成分

上記に示した方法により係留時における各動揺成分における直線動揺の時系列を求め、解析した結果を sway, surge, heave 別に図 16, 17 および 18 に示す。

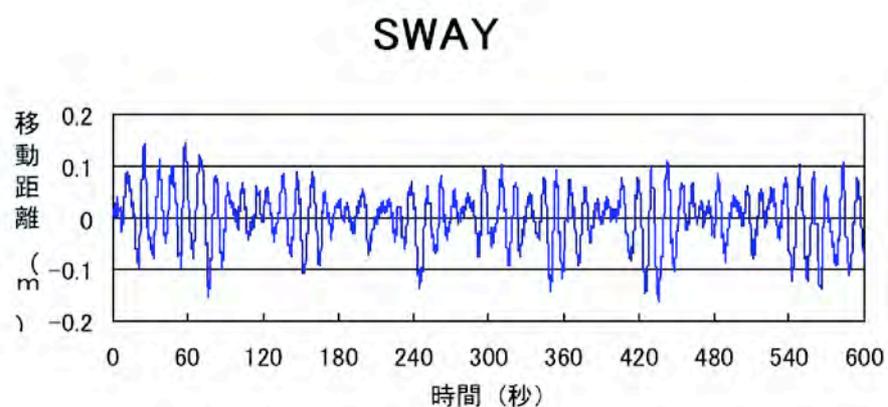


図 16: 係留船舶動揺 sway 成分の時系列変動

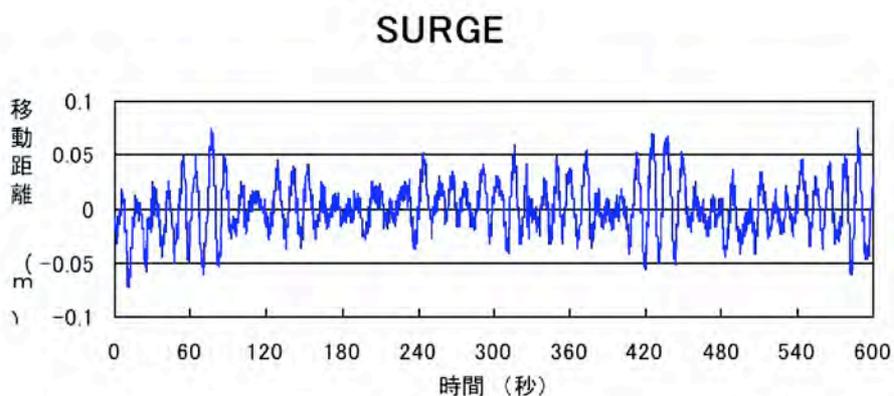


図 17: 係留船舶動揺 surge 成分の時系列変動

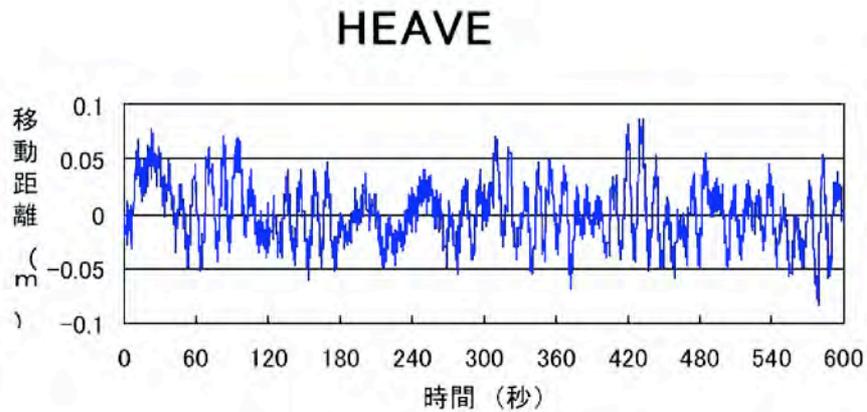


図 18: 係留船舶動揺 heave 成分の時系列変動

また，図 19 に係留船舶動揺 surge 成分における実験結果の中から計測時間の 330 秒から 470 秒までを抽出して拡大した結果を示す。

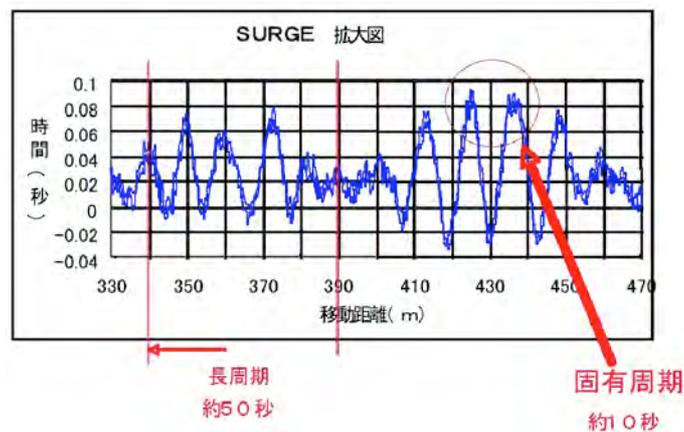


図 19: 係留船舶動揺 surge 成分時系列変動の時間軸拡大

これらの結果から，約 10 秒周期の短い動揺に加えて，約 50 秒の比較的長い周期による動揺成分が見受けられる。そこで，これら各直線動揺成分を周波数分析することにより周波数スペクトルを求めた結果を図 20，21 および 22 に示す。

これらの結果からも，明らかに係留船舶における動揺の直線変動成分に約 10 秒の短周期動揺成分と約 50 秒の長周期動揺成分が見られることがわかる。

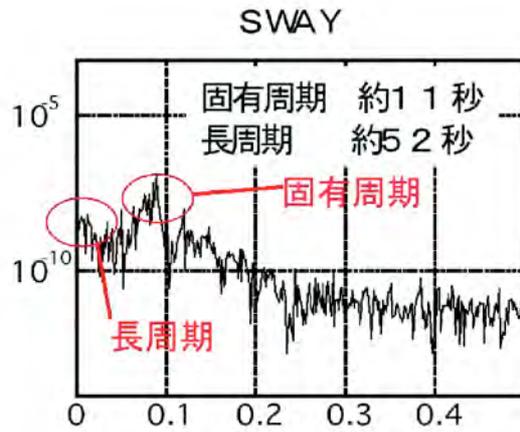


図 20: 係留船舶動揺 sway の周波数スペクトル

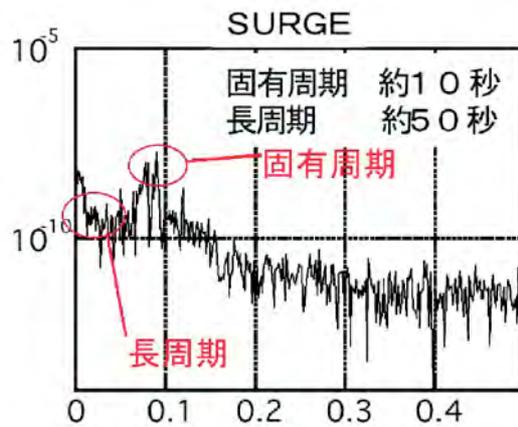


図 21: 係留船舶動揺 surge の周波数スペクトル

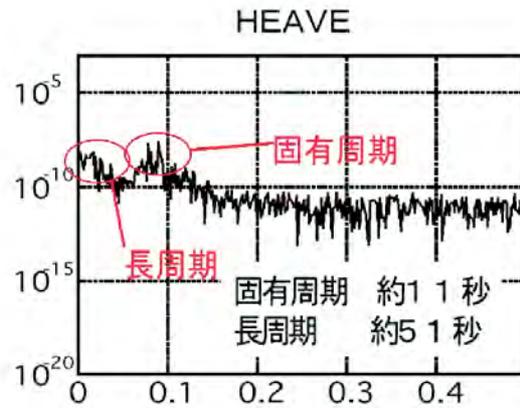


図 22: 係留船舶動揺 heave の周波数スペクトル

## 4.2 回転動揺成分

次に直線動揺成分と動揺に回転動揺成分として pitch, roll, yaw における船体動揺の時系列解析結果を図 23, 24 および 25 に, また周波数解析結果を図 26, 27 および 28 に示す.

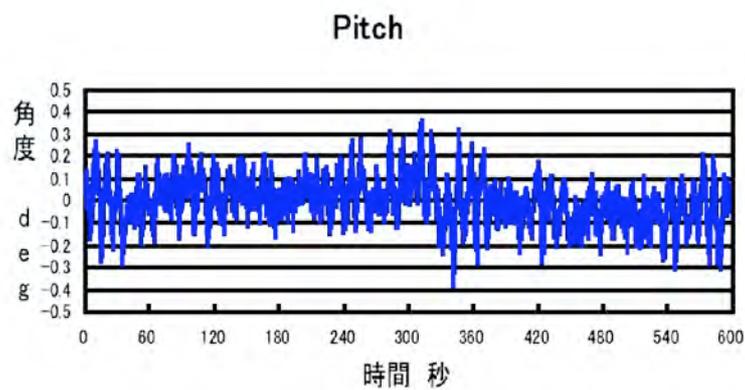


図 23: 係留船舶動揺 pitch 成分の時系列変動

船体直線動揺における結果と同様に, 回転動揺成分においても約 10 秒程度の短周期と約 50 秒程度の比較的長周期な動揺成分が見られる.

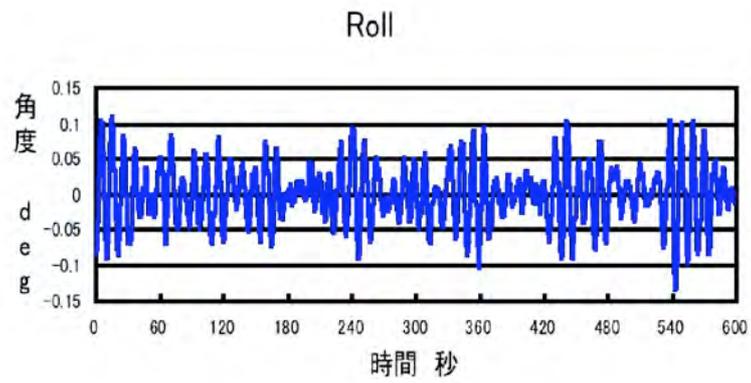


図 24: 係留船舶動揺 roll 成分の時系列変動

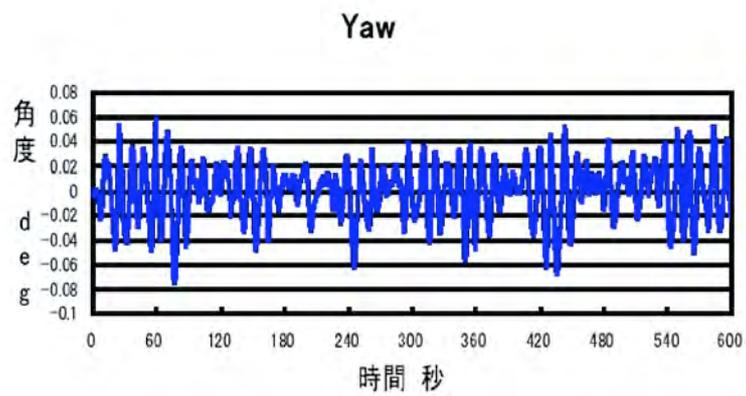


図 25: 係留船舶動揺 yaw 成分の時系列変動

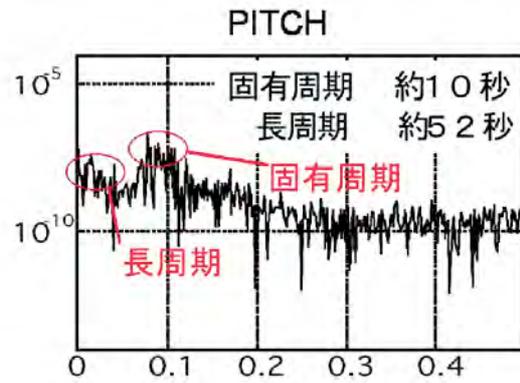


図 26: 係留船舶動揺 pitch の周波数スペクトル

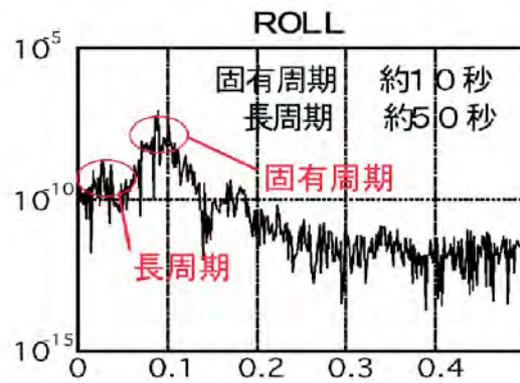


図 27: 係留船舶動揺 roll の周波数スペクトル

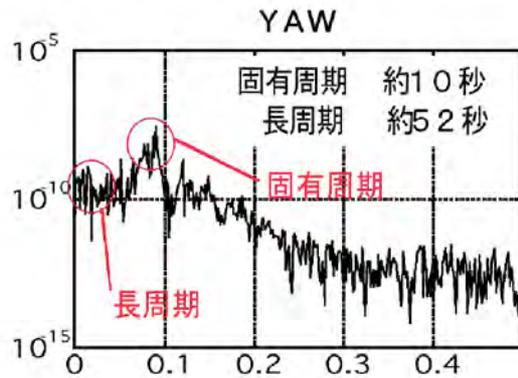


図 28: 係留船舶動揺 yaw の周波数スペクトル

### 4.3 GPS ブイによる波浪情報

#### 4.3.1 波浪のスペクトルと卓越周期

図 29 に港内および港外に設置したブイの垂直変位量から得られた波浪のスペクトルを示す。

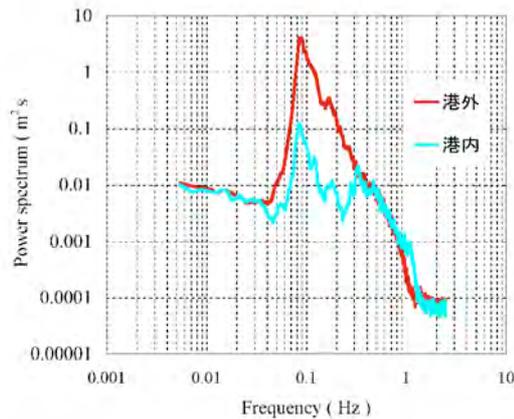


図 29: 港内・港外ブイによる波浪スペクトル

港内および港内の波浪スペクトルともに 0.09Hz 付近にピークが見られ、0.04Hz から 0.4Hz までの波浪スペクトルが港外に比べて港内では減衰していることがわかる。そこで、本研究では解析対象波浪の周波数を 0.086Hz (波周期：11.6 秒)、波長は港内約 93m (係留船舶全長の約 1/2)、港外約 121m とする。

### 4.3.2 波向き

図 30 に港内および港外のアレー配置されたブイの位置変位から求められた MUSIC スペクトルを示す。アレー配置されたブイの個数から 2 つまでの波浪の波向きが分解可能であり、港外では 132 度に MUSIC スペクトルの第一ピークが見られ、238 度に第二ピークが見られる。港内では 108 度に第一ピーク、192 度に第二ピークが見られた。

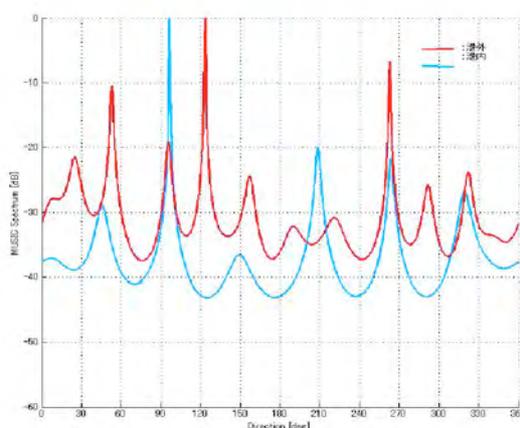


図 30: 港内・港外ブイによる MUSIC スペクトル

## 4.4 港内波浪の波向きと船体動揺

図 31 に係留船舶の垂直変位を港内設置ブイのスペクトルと比較結果を、図 32 に係留船舶上に設置した GPS アンテナ水平変位を示す。

図 31 より付近海面の垂直変位と係留船舶の垂直変位のスペクトルの違いが見られるが、どちらのスペクトルにも 0.86Hz 付近にピークが見られ、この周波数成分を含む波浪が港外から港内に入り、そして係留船舶を動揺させている原因であることがわかる。また図 32 より港内の係留船舶付近の海域において計測された 108 度方向からの波浪による船体横方向移動状態がわかる。

次に、港内の防波堤、係留船舶および波向きを同時に図 33 に示す。

この図より、MUSIC スペクトル第一ピークから求めた波向きは防波堤開口部から港内波浪ブイを經由して係留船舶に向かっていることがわかる。また、第二ピークである 192 度方向には複雑な構造をした岸壁が存在しており、その反射の程度はここからは判断できない。

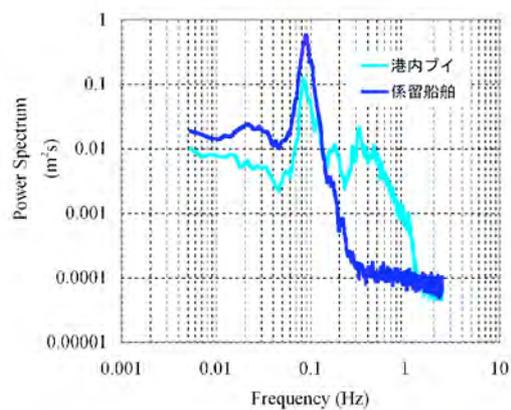


図 31: 港内ブイと係留船舶動揺の周波数スペクトル

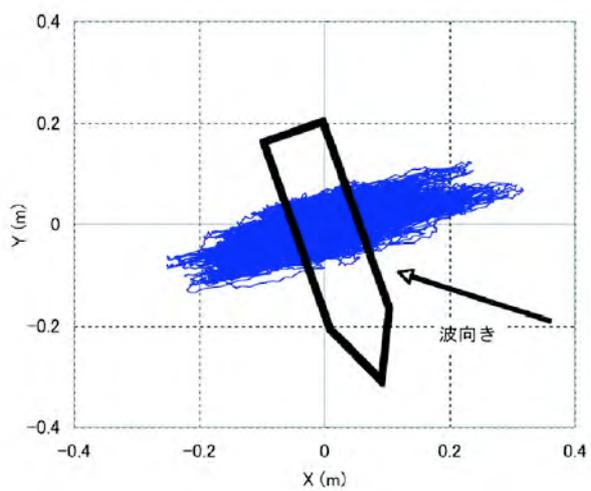


図 32: 波向きと係留船舶の垂直動揺



図 33: 港内防波堤, 係留船舶および波向き

## 5 警報システム

上記の様々な波浪情報および係留船舶における動揺特性を考慮して、港内における作業・係留船舶に対する警報システムの構築を考える。本報告では、警報システムの基となる警報表示画面の一試作を図 34 に示す。

港内作業船および係留船舶にとって最も重要な情報は、港内波浪が過去どのように変化して、現在どのような状況であり、そして近い将来どのように変わって行くかである。その時間的な港内波浪情報の変化に従って、現在作業を継続すべきか、あるいは暫くの間作業を中止し係留対策を施すべきかを判断および決定する。そこで、港内を幾つかの地域に分けて、それぞれに長周期波浪における周期と波高の警報開始値と限界値を設ける。各地域において、その開始値と限界値を超えた場合に開始値を超えた場合には黄色で、限界値の場合には赤色で表示する。また、各地域の黄色と赤色のマークをクリックすることで、過去数時間の波向および波高の時系列データが表示され、この時系列データにより今後どのように変化するかを予測するために用いる。さらに、その時に観測された卓越した波周期情報および気象に関する情報（図以外には風向、風速の時系列データ）などを表示できるものとする。

ただし、本表示画面の試作は現在までの解析結果に基づいた成果であり、今後解析を進めることにより、さらに充実した警報システムとして改善が可能である。そこで、このような実験を様々な港湾において長期に実施することで、係留船舶の長周期波浪による動揺特性が解明され、荷役中の動揺、悪天候時の風波が船舶に与える影響を予測することができる。

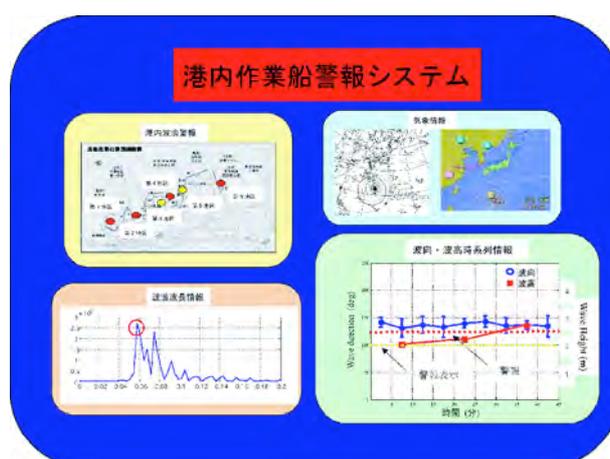


図 34: 港内作業船警報システム

## 6 まとめ

本実験は停泊フェリー付近および港外の2カ所において、GPS 装備ブイアレーによる波浪情報を同時に計測した。港外ブイによる波浪情報計測の結果から約 10 秒の短周期波浪が、港内ブイによる波浪情報計測の結果から、短周期約 10 秒および長周期約 50 秒の長周期波浪が観測され、それらの結果から 50 秒の長周期波は港固有の共振周期による波浪であることが推測された。また、係留船舶の動揺計測による解析結果にも 10 秒と 50 秒による動揺が現れており、今後さらに実験を実施し解析を進めることで長周期波浪がどのように係留船舶に影響するかが詳細にわかると考える。

本年度の実験においては、残念ながらスケジュール的に台風発生とともに実験を終了せざるを得なかったが、次年度も引き続き実験および解析を継続し、港内作業・係留船への警報システムの構築を行うことで港内作業船および係留船舶の長周期波浪による海難事故防止につながることをおおいに期待される。

## 参考文献

- [1] Hidenobu Fujii, Nobuyoshi Kouguchi, Hiroshi Ishida and Ichiro Deguchi; GPS Wave Observation System with Arrayed Buoys, Proceedings of the Institute of Navigation GPS Meeting, 2002.
- [2] 藤井英信, 河口信義, 石田廣史, 出口一郎, “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 卷, pp857-862, 2003.
- [3] 柳潤子, 河口信義, 石田廣史, 出口一郎, “GPS ブイアレーによる波浪情報観測システム”, 土木学会海洋開発論文集, 第 20 卷, pp.635-639, 2004.