

波浪中のクレーン船の動揺に伴う吊荷の挙動

Dynamic Response of a Cargo Suspended by a Floating Crane under Sea Waves

秋 山 真 吾
福 山 貴 子
池 谷 毅

要 約

海上工事の施工計画を立てる上では、波浪中における作業船の動揺特性の評価が重要である。船上に置かれた積荷の動揺量は、船体の動揺量と両者の位置関係から求めることができる。しかし、クレーン等により吊られている場合は、吊荷と船体の間の相互作用により、船上に置かれた場合と同じ手法では動揺量を評価できない。そこで、積荷がクレーン船により吊られている場合を対象とし、ワイヤーを介して吊荷に作用する復元力をモデル化するとともに、吊荷の動揺特性について解析的に検討を行った。その結果、船体と吊荷の復元力は、吊荷の動揺量に大きな影響を与えることがわかった。

目 次

- I. はじめに
- II. 吊荷の動揺量
- III. 吊荷のモデル化
- IV. 解析結果
- V. おわりに

I. はじめに

海上工事における施工精度、作業の安全性を向上させることは重要な課題であり、そのためには波浪中における作業船の動揺特性を評価し、綿密な施工計画を立てる必要がある。船体の動揺量は、船体の諸元や各係数、作用する外力を算定し、船体に関する運動方程式を解くことで求めることができる。また、船上に置かれた積荷を対象とした場合は、船体の動揺量に両者の回転中心の位置関係を考慮して動揺量を求めることができる。一方、クレーン等によって吊られている積荷(Photo 1)を対象とした場合は、吊荷と船体の間に相互作用があり、ワイヤーを介して復元力が作用するため、船上に置かれた場合と同じ手法では動揺量を評価することができない。



Photo 1 クレーン船による積荷の据付
(Placing of Cargo by Floating Crane)

本報文では、クレーン船により積荷が吊られている場合を対象とし、複数浮体の考え方を適用した吊荷の動揺量の算定方法について説明する。続いて、ワイヤーを介して船体から吊荷に作用する復元力のモデル化について述べるとともに、本モデルを適用した場合の船体の動揺と吊荷の動揺特性の関係について説明する。

II. 吊荷の動揺量

1. 浮体の運動

海上工事で用いられる作業船は、波、流れ、風の影響を受けて動揺する。また、ケーソン、沈埋函等の海洋構造物も、様々な施工段階において浮遊状態となることがあり、このような浮体の挙動を予測評価するために、動揺解析技術の開発が行われている^{1), 2)}。

浮体の解析に用いられる記号とその定義を Fig.1 に示す。一般的に、解析では浮体を剛体として取り扱い、6自由度系の運動方程式により動揺量が求められる。運動方程式を立てる点 Q は、浮体の回転中心と呼ばれ、任意の点に選ぶことができる。点 Q に関する3軸方向の(x軸, y軸, z軸)の並進運動は、surging(η : x軸), swaying(ξ : y軸), heaving(ζ : z軸), 回転運動は、rolling(ϕ : x軸), pitching(θ : y軸), yawing(ψ : z軸)と呼ばれ、浮体の運動は6種類の運動モードの重ね合わせにより表される。

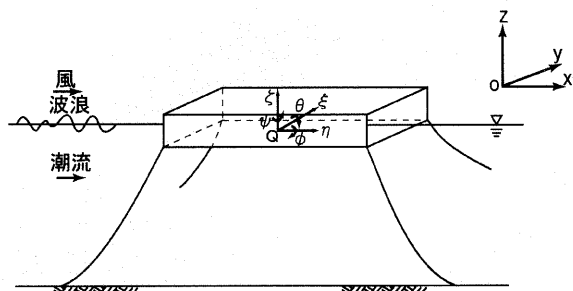


Fig.1 解析記号とその定義
(Definition Sketch and Coordinates of Analysis)

キーワード: 複合浮体, クレーン船, 吊荷, 復元力, 動揺解析, 共振

2. 浮体の運動方程式

k を運動成分の方向 (1~6) とすると, 係留された浮体の規則波中における運動方程式は, 次式で表される。

$$\begin{aligned} & [M_{kl} + m_{kl}]\{X_k''\} + [N_{kl}]\{X_k'\} + [N_{kl}']\{X_k'\} + [C_{kl}]\{X_k\} + \{F_k^M(X_1, \dots, X_6)\} \\ & = \{F_k^E\} + \{F_k^D\} + \{F_k^W\} + \{F_k^C\} \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

ここで, M_{kl} : 慣性力係数, m_{kl} : 付加質量係数, N_{kl} : 造波減衰力係数, N_{kl}' : 造渦減衰力係数, C_{kl} : 静水圧による復元力係数, F_k^M : 係留反力, F_k^E : 波強制力, F_k^D : 波漂流力, F_k^W : 風力, F_k^C : 潮流力, X_k'' , X_k' , X_k : 浮体の回転中心の加速度, 速度, 変位をそれぞれ表す。また, 単一浮体の場合には, $[]$: 6×6 の係数マトリックス, $\{ \}$: 6 元のベクトルである。ただし, マトリックスの成分は, l 方向運動成分が k 方向に及ぼす寄与分に関する量を表す。

浮体は回転中心のまわりに微小振幅運動をするとし, さらに非線形項を無視して波強制力のみを外力として考慮すると, 式(1)は次式で表される。

$$X_k = \tilde{X}_k e^{i\omega t} \dots \dots \dots (2)$$

$$F_k^E = \tilde{F}_k^E e^{i\omega t} \dots \dots \dots (3)$$

$$(-\omega^2[M_{kl} + m_{kl}] + i\omega[N_{kl}] + [C_{kl}] + [K_{kl}])\tilde{X}_k e^{i\omega t} = \tilde{F}_k^E e^{i\omega t} \dots (4)$$

ここで, ω : 規則波の各周波数, $\tilde{X}_k$, $\tilde{F}_k^E$: 運動, 波強制力の複素振幅, K_{kl} : 係留反力による復元力係数をそれぞれ表す。また, 運動方程式の係数マトリックスについて整理すると, 式(4)は次式で表される。

$$D = -\omega^2[M_{kl} + m_{kl}] + i\omega[N_{kl}] + [C_{kl}] + [K_{kl}] \dots \dots \dots (5)$$

$$D\tilde{X}_k = \tilde{F}_k^E \dots \dots \dots (6)$$

3. 複合浮体の運動方程式³⁾

Fig.2 に連結かつ係留された複合浮体のイメージを示す。これら複数の浮体に関する運動方程式は, 浮体が単独の場合の式(6)を用いて次式で表される。

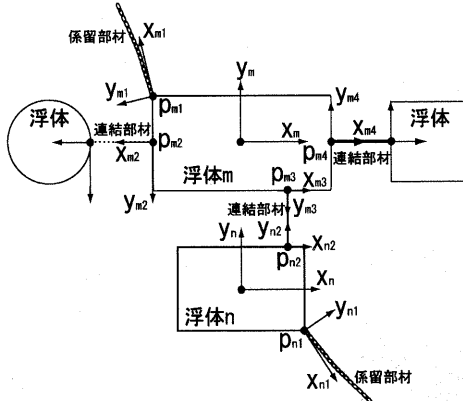


Fig.2 複合浮体のイメージ
(Image of Composite Floating Bodies)

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \vdots & \vdots \\ \dots & D_m + D_{mm} + E_{mm} + H_m & \dots & D_{mn} + E_{mn} & \dots \\ \vdots & \vdots \\ \dots & D_{nm} + E_{nm} & \dots & D_n + D_{nn} + E_{nn} + H_n & \dots \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \\ & \times \begin{bmatrix} \vdots \\ \tilde{X}_m \\ \vdots \\ \tilde{X}_n \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \tilde{F}_m \\ \vdots \\ \tilde{F}_n \\ \vdots \end{bmatrix} \dots \dots \dots (7) \end{aligned}$$

ここで, D_m : 自由浮体の運動に関する係数, D_{mn} : 浮体相互の流体力学的な干渉に基づく付加流体力係数, E_{mn} : 連結部材による付加係数, H_m : 係留部材による付加係数をそれぞれ表す。また, 各係数の添字 m , n は浮体の番号であり, 係数 D_{mn} , E_{mn} は n 番目の浮体が単位振幅の強制動揺した場合に, m 番目の浮体を受ける流体力学的な干渉に基づく力と連結部材からの反力を表す。

4. 吊荷の動揺量

本検討で対象としたのは, クレーン船により積荷が吊られている状態である。吊荷はワイヤーによって船体と連結され, とともに振幅運動すると仮定すると, 両者の動揺量を算定するには式(7)の連結部材と係留部材に関する付加係数を算定すればいい。Fig.2 に示した連結, 係留点 (p 点) において, 各座標系で定義される運動と力をそれぞれ $\tilde{X}_p$, $\tilde{F}_p$ とすると, 係留, 連結部材の付加係数は次式で表される。

$$\tilde{X}_p = T_m \tilde{X}_m \dots \dots \dots (8)$$

$$\tilde{F}_m = T_m^t \tilde{F}_p \dots \dots \dots (9)$$

$$H_m = T_m^t K T_m \dots \dots \dots (10)$$

$$E_{mm} = T_m^t K T_m, \quad E_{mn} = -T_m^t K T_n (m \neq n) \dots \dots \dots (11)$$

ここで, T_m : m 番目の浮体の座標系と連結, 係留点の各座標系の変換マトリックス, T_m^t : T_m の転置マトリックス, K : 係留部材あるいは連結部材の剛性マトリックスをそれぞれ表す。また, 浮体の座標系と連結, 係留部材の各座標系との変換マトリックス T と, 変換マトリックス T 内の係数は次式で表される。

$$T = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} & 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_p & -y_p \\ 0 & 1 & 0 & -z_p & 0 & x_p \\ 0 & 0 & 1 & y_p & -x_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots (12)$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma_p & \sin \gamma_p \\ 0 & -\sin \gamma_p & \cos \gamma_p \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \beta_p & 0 & -\sin \beta_p \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta_p & 0 & \cos \beta_p \end{bmatrix} \\ & \times \begin{bmatrix} \cos \alpha_p & \sin \alpha_p & 0 \\ -\sin \alpha_p & \cos \alpha_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (13) \end{aligned}$$

ここで、 (x_p, y_p, z_p) : 浮体の座標系における連結、係留点 (p 点) の各座標、 $(\alpha_p, \beta_p, \gamma_p)$: 浮体の座標系から見た連結、係留部材の各座標系の回転角をそれぞれ表す。

つまり、船体と吊荷の関係をモデル化し、連結部材に関する剛性マトリックスを設定することにより、船体の動揺に伴う吊荷の動揺量を算定することができる。

5. 船体と一体化した吊荷の動揺量

吊荷が船上に置かれ、船体と一体となって動揺する場合、船体と積荷の全体系の回転中心と吊荷の回転中心の位置関係により、吊荷の位置での動揺量を算定することができる。それぞれの回転中心における変位量を $\tilde{X}_q = (x_q, y_q, z_q, \alpha_q, \beta_q, \gamma_q)$, $\tilde{X}_s = (x_s, y_s, z_s, \alpha_s, \beta_s, \gamma_s)$ とすると、式(8)と同様の関係が成り立つ。また、船体と吊荷が一体の場合、両者は剛体として運動するため、どの点においても回転角は等しい。つまり、全体系から見た吊荷の位置での回転角がゼロになることから $\cos \alpha_p = \cos \beta_p = \cos \gamma_p = 1$, $\sin \alpha_p = \sin \beta_p = \sin \gamma_p = 0$ となり、式(12), (13)に代入すると変換行列は次式で表される。

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_p & -y_p \\ 0 & 1 & 0 & -z_p & 0 & x_p \\ 0 & 0 & 1 & y_p & -x_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots (14)$$

回転角を $(\alpha_s, \beta_s, \gamma_s) = (\alpha_q, \beta_q, \gamma_q) = (\alpha, \beta, \gamma)$ とし、全体系と吊荷の回転中心の位置関係を $x_p = x_s - x_q$, $y_p = y_s - y_q$, $z_p = z_s - z_q$ とすると、式(8), (14)から吊荷の回転中心での並進量は次式で表される。

$$\tilde{X}_s = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_q + \beta z_p - \gamma y_p \\ y_q - \alpha z_p + \gamma x_p \\ z_q + \alpha y_p - \beta x_p \end{bmatrix} \quad \dots (15)$$

Ⅲ. 吊荷の動揺解析

1. 解析対象

Fig.3 に解析対象としたクレーン船と吊荷の概略図を、Table 1 に船体と吊荷の諸元を示す。船体の重心位置は、デッキに搭載された構造物から算定した。y 軸方向は左右対称であるが、x 軸方向は船体の中心より船首側に若干ずれた構造となっている。一方、吊荷は材質が均質と仮定し、重心位置は中心とした。

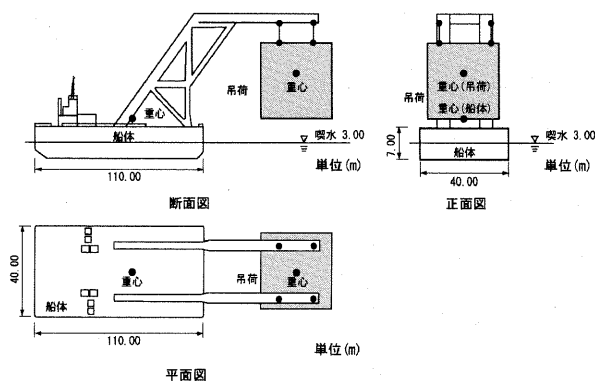


Fig.3 クレーン船と吊荷
(Sketch of Floating Crane and Cargo)

Table 1 船体と吊荷の諸元
(Properties of Floating Body and Cargo)

部位	質量(t)	浮体部寸法			喫水(m)
		X(m)	Y(m)	Z(m)	
船体	10,000	110.00	40.00	7.00	3.00
吊荷	2,000	---	---	---	---

また、吊荷は船体のクレーンから、長さ 9.5m のワイヤー 4 本で吊られているとし、さらに船体は船首側、船尾側を弾性係数 1,000N/mm² のワイヤー 8 本で係留されているとした。

2. 解析定義

Fig.4 に本解析の座標の定義と波向きの関係を示す。船尾側に X 軸、右舷側に y 軸、鉛直上向きに z 軸を取り、船尾側から来襲する波を 0 度、右舷側から来襲する波を 90 度とした。また、座標軸の原点は、対象としている浮体の回転中心とした。

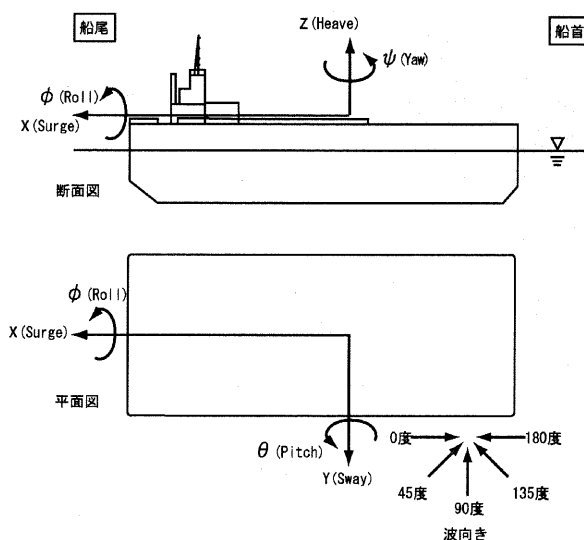


Fig.4 解析の定義
(Definition of Coordinates and Wave Direction)

3. 解析条件

Table 2 に解析条件を示す。入射波高は 2.0m で一定とし、周期は 3.0 秒から 15.0 秒まで、1 秒ずつ変化させて計算した。また、波向きの定義は Fig.4 に示すとおりとし、船尾側から船首側にかけて、45 度ずつ 5 種類に変化させた。

Table 2 解析条件
(Summary of Analytical Conditions)

項目	諸元
波高	2.0m
周期	3.0 秒～15.0 秒 (1 秒毎)
波向き	0.0 度～180.0 度 (45 度毎)

4. 吊荷の復元力のモデル化

Ⅱ で説明したとおり、複合浮体の動揺特性を求める場合には、係留部材や連結部材による付加係数を設定する必要がある。係留部材

については、弾性係数 $1,000\text{N/mm}^2$ のワイヤーとし、ワイヤーの長さや径、船体の係留位置により H_m を算定した。一方、連結部材については、船体と吊荷を繋ぐワイヤーに相当するが、吊荷が自由に動くため、両者に作用する復元力は運動モードによって変化する。そこで、復元力を運動モードに応じて定義し、 E_m を算定した。

Table 3 に各運動モードに応じて吊荷に作用する復元力を示す。船体と吊荷の動きを考えた場合、吊りワイヤーは係留ワイヤーに比べ長さが短く、船体や吊荷はゆっくり動く。そのため、船体の鉛直変位 (Heaving) は、吊荷の鉛直変位にほぼ等しいと仮定した。また、吊荷は4本のワイヤーにより船体と繋がっており、動揺の周期も短いことから、簡単のため吊荷の x 軸周りの回転 (Rolling) と y 軸周りの回転 (Pitching) は、船体のそれぞれの回転にほぼ等しいと仮定した。なお、Yawing を算定する際の回転半径 r ($=10.0\text{m}$) は、吊荷の重心位置と吊ワイヤーの位置から設定した。また、表中の添字 1 は船体を、添字 2 は吊荷をそれぞれ表す。

IV. 解析結果

Fig.5 は、計算を行った5種類の波向きのうち、波向き0度、45度、90度の3ケースについて、吊荷の回転中心における6種類の運動モードの動揺量をプロットしたものである。図の横軸は入射波の周期、縦軸は動揺量とし、吊荷と船体の動きをモデル化した場合の結果 (Δ 印+実線: 以下、吊下げ) とともに、II で説明した吊荷が船体と一体化して動く場合の結果 ($\bigcirc$ 印+破線: 以下、一体) も表示した。各運動モードの主な特徴をまとめる。

(1) Surging

波向き0度、45度の場合、周期13秒付近に係留部材の固有周期があり、動揺量が大きくなっているが、吊下げについては船体に吊り荷の動きが加わり、周期が延びる傾向が見られる。また、吊荷が自由に動けるため、一体に比べ短周期側でも動揺量が大きくなっている。

(2) Swaying

波向き45度、90度の場合、周期11秒付近に係留部材の固有周期があり、動揺量が大きくなっているが、吊下げについては船体に吊り荷の動きが加わり、周期が延びる傾向が見られるとともに、船体の Yawing に吊り荷が共振し、動揺量がさらに大きくなっている。また、周期7秒付近に船体の固有周期があるが、吊下げの動揺量は一体に比べ小さくなっている。

(3) Heaving

船体の復元力が吊荷にそのまま伝わると仮定したため、両者の動揺特性はほぼ一致している。

(4) Rolling

波向き90度の場合、周期7秒付近に船体の固有周期があり、吊下げについては周期が延びる傾向が見られるが、動揺量は一体に比べ小さくなっている。また、長周期側では船体の Yawing に吊荷が共振し、吊下げの動揺量が大きくなっている。

(5) Pitching

船体の復元力が吊荷にそのまま伝わると仮定したため、両者の動揺特性はほぼ一致している。

(6) Yawing

波向き45度、90度の場合、周期7秒付近に船体の固有周期があ

るが、吊下げについては吊荷が共振し、特に波向き90度の場合に動揺量が非常に大きくなっている。また、周期11秒付近に係留部材の固有周期があるが、吊下げについては吊り荷が共振し、周期が延びるとともに動揺量がさらに大きくなっている。

なお、対象とした作業船の重心位置は x 軸方向に非対称であるが、波向き135度のケースは45度の結果と、波向き180度のケースは0度の結果とそれぞれ近い傾向が見られた。

V. おわりに

1. 結論

クレーン船により積荷が吊られている状態を対象に、吊荷に作用する復元力をモデル化するとともに、波浪中における船体の動揺に伴う吊荷の動揺量を求めた。得られた知見は以下のとおりである。

- 船体の動揺に吊荷が共振する現象が見られ、特に船体に対し横方向から波が来襲した場合には、船体と吊荷を一体として考えた場合に比べて吊荷の動揺量は大きくなる傾向がある。
- 船体と吊荷の間の復元力は、吊荷の動揺量に大きく影響するとともに、動揺特性も複雑に変化している。

2. 今後の課題

(1) 吊荷のモデル化の改良

吊荷の運動モードのうち、Heaving, Rolling, Pitching の三つについては、簡単のために連結部材の復元力係数を大きくし、船体の変位が吊荷にそのまま伝わると仮定した。このうち、Rolling と Pitching については船体と吊荷の動きは必ずしも一致せず、さらに並進運動に比べて動きが複雑であることから、両者の関係についてより詳細な検討とモデル化の改良が必要である。

(2) 吊荷のモデル化の拡張

今回のモデル化では吊荷が気中にある状態を想定したが、実際の施工では吊荷は水中に設置・据え付けられるケースもある。そのため、施工条件に応じて吊荷に作用する復元力が変化するモデルへの拡張が必要である。

(3) 吊荷の挙動の検証

吊荷の挙動を解析した事例は少なく、また本手法の適用も今回が初めてである。そのため、作業船のクレーンにより積荷が吊られている状態を対象とした水理模型実験や、実際の作業船を対象とした現地計測を行い、船体の動きと吊荷の動きについてモデルの精度を検証することが望まれる。

今後、より厳しい条件下において海上工事を行う場合、大型の船舶による作業も予想される。その場合、施工精度や作業の安全性を考慮し、綿密な施工計画を立てる上で、今回の手法は有益な情報を提供するものと考えられる。

参考文献

- 1) 今井貫爾, 利穂吉彦; 浮体動揺解析の現況, 鹿島建設技術研究所年報, 第33号, (1985), pp.49-56.
- 2) 小林正典, 島田潔; 海洋構造物の波浪中応答計算システム "DREAMS", 三井造船技報 第126号, (1985), 別冊.
- 3) 松浦正己, 池上国広; 係留・連結された複数浮体の波浪中挙動解析法, 三菱重工技報, Vol.31, No.4, (1994), pp.266-269.

Table 3 吊荷の復元力のモデル化
(Model of Restoring Force of Suspended Cargo)

	概念図	復元力
Surging		x 軸方向の復元力係数を M/l $F_1 = M/l * X_1$ $F_2 = M/l * X_2$ $F_x = M/l * (X_1 - X_2)$
Swaying		y 軸方向の復元力係数を M/l $F_1 = M/l * Y_1$ $F_2 = M/l * Y_2$ $F_y = M/l * (Y_1 - Y_2)$
Heaving		z 軸方向の鉛直変位は吊荷にそのまま伝わる (復元力係数 k_z 大) $F_z = k_z * (Z_1 - Z_2)$
Rolling		x 軸周りの回転は吊荷にそのまま伝わる (復元力係数 k_{xx} 大) $F_{xx} = k_{xx} * (\phi_1 - \phi_2)$
Pitching		y 軸周りの回転は吊荷にそのまま伝わる (復元力係数 k_{yy} 大) $F_{yy} = k_{yy} * (\theta_1 - \theta_2)$
Yawing		z 軸周りの復元力係数を $M/l * r^2$ $F_1 = M/l * r^2 * \psi_1$ $F_2 = M/l * r^2 * \psi_2$ $F_{zz} = M/l * r^2 * (\psi_1 - \psi_2)$

M : 吊荷質量 (=2,000t), l : 吊りワイヤー長さ (=10.0m), r : 回転半径 (=10.0m)

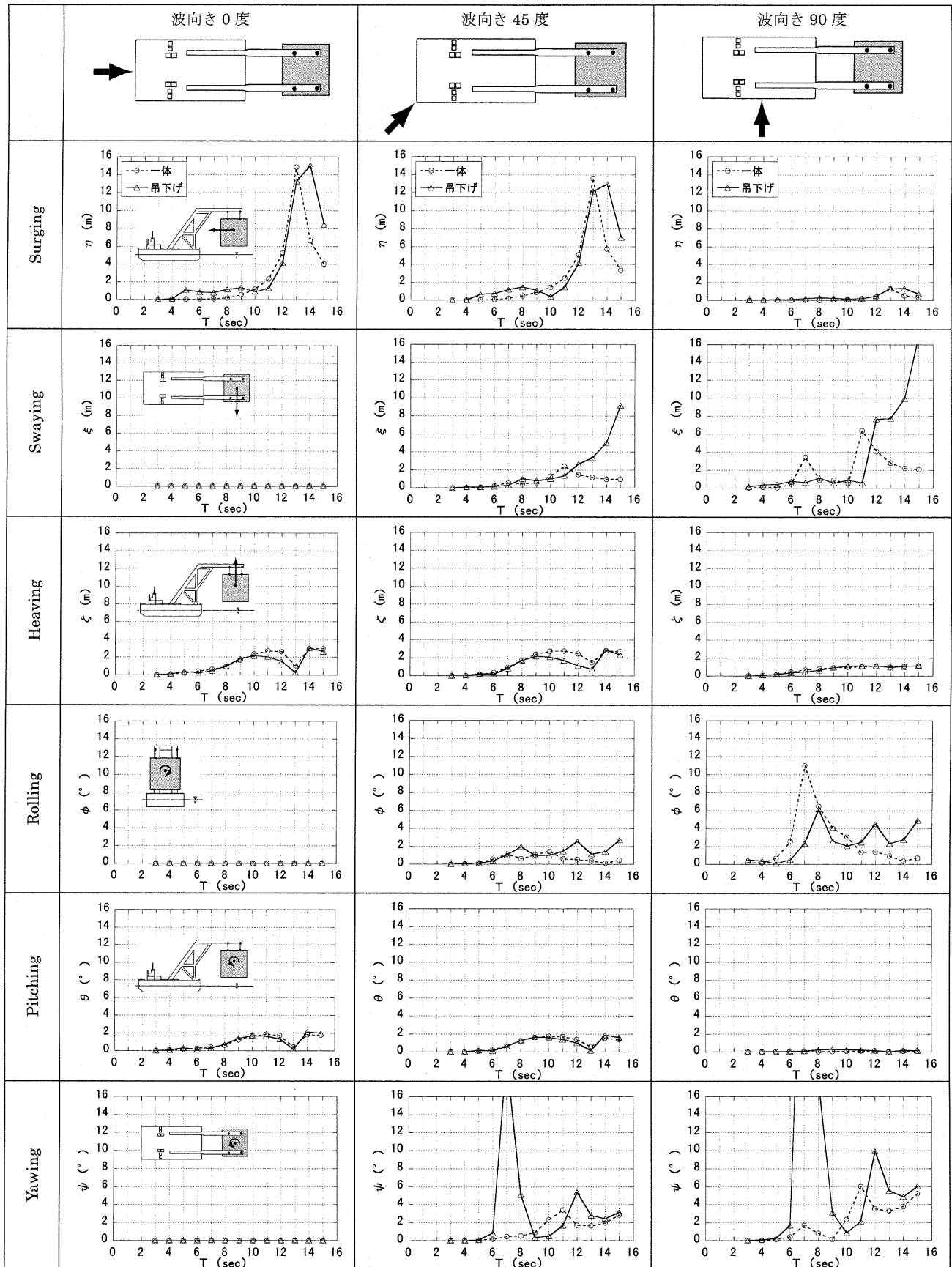


Fig.5 動揺量解析結果
(Result of Dynamic Response of Cargo)