横波中における係留浮体の長周期運動 (その 1)

正員 井 上 義 行*

Slowly Varying Oscillations of Moored Vessels in Beam Seas (Part I)

by Yoshiyuki Inoue, *Member*

Summary

This paper is mainly aimed to study the phenomena of slowly varying oscillations of moored vessels and to state the procedures for predicting their values in wind and waves.

Model tests were conducted at IHI's ship model basin on the motions of a floating vessel moored by coil springs in regular and transient water waves, and theoretical calculations of dynamic behaviors of a moored vessel including slowly varying transient sway motions were also carried out. As a result of the studies, the following conclusions were reached;

1. Slowly varying oscillations of moored vessels exist as transient sway motions for a long period in regular beam seas, which are directly proportional to the steady-state displacement due to the wave drifting forces.

2. The calculation and the test results are in fairly good agreement showing the procedures for predicting slowly varying transient sway motions in regular beam seas.

3. Slowly varying transient sway motions also exist in transient water waves after the time when the transient water waves pass through.

1 緒 言

浮遊式海洋構造物の係留設計に際して、係留ラインに生じる最大張力をいかに的確に推定するかは、設計者の重大関心事項の一つである¹⁾。

波浪中におかれた係留浮体の変動張力は、浮体運動による係留点の変位を求めて、係留点変位に追従する係留ライン張力の変動として求めるのが実用的である²⁻⁴⁾。

ところで、係留浮体の運動を大別すると、①線形波浪強制力による浮体動揺と、②高次の波浪強制力および振動系自体の原因などによって起こる長周期運動、の categories に分けられる。これらに関する多くの研究があるが、②に属する研究はいずれも“仮定”の域を脱していない現状である^{5), 6)}。

長周期運動に関する代表的な研究として Pinkster の理論があり⁷⁾、同理論によれば波浪漂流力の長周期成分によって長周期運動が誘起されることになるが^{7), 4)}、著者はそのような高次の変動外力を無視しても過渡運動として長周期運動が長時間残存することを示した⁸⁾。

しかし、過渡運動の大きさが初期条件によって定まると考えた先の解釈では^{9), 8)}、過渡的な長周期運動を定量的に推定することは困難であった。

そこで、過渡運動の大きさを定量的に把握する目的

で、波高を変えた規則波中での実験を行なったところ、過渡運動の初期の振幅は波浪漂流力による定常変位に比例していることが認められた。さらに、多くの周波数成分を含む点で不規則波の一種と考えられる過渡水波中の実験⁹⁾によっても、過渡水波が通過した後の状態（理想的には静水面に戻る状態¹⁰⁾）において、長周期運動の残存を確認した。さらに、過渡水波中の実験から求めた周波数振幅応答が規則波中の実験から求めたそれと実的に大差ないことがわかった。

ここに、その概要を報告する。

2 水槽実験

水槽実験は、IHI 技術研究所（横浜）水理実験場内の回流式長水路³⁾を使用して行なった。

実験に使用した模型は矩形断面の柱状浮体で、水槽幅

Fig. 1 Model support instrument

* 石川島播磨重工業(株)運搬機鉄構事業部海洋設計部

Table 1 Principal particulars of tank test model

Length (L)	:	2,470 mm
Breadth (B)	:	500 mm
Depth (D)	:	320 mm
draft (d)	:	250 mm
Displacement (V)	:	308 Kg
center of gravity (KG)	:	135 mm
metacentric height (GM)	:	77 mm
radius of gyration (K _t)	:	178 mm
spring constant of coil spring	:	(11.25 + 10.74)
 (39.60 + 38.46) Kg/m

2.5m に対して模型長さを 2.47m とし, beam sea 中における二次元的な実験とした。浮体の係留は係留ラインに代わって線形性のあるばねを用い, Fig.1 のように模型を支持した。Table 1 に供試模型(浮体およびばね)の主要目を示す。

供試模型は長水路の中央よりやや造波機寄りに Fig.2 のようにセットし, sway のみをばね係留する状態で, 規則波中および過渡水波中の実験を行なった。

実験における計測項目は, 横波中における浮体動揺(sway, heave, roll), 入射波および透過波であり, いずれもカットオフ周波数 10Hz のローパスフィルタを通して A/D 変換し, 磁気テープに記録(岩通 DATAC-1500)するとともに, モニタとして直記式電磁オシロに記録した。磁気テープへのデータ収録は, 横浜国立大学での標準⁹⁾に合わせて, 25Hz/ch とした。

造波すべき規則波の条件は, 設定波高を 2, 3, 4, 5cm とし, $\xi_B = 0.2 \sim 3.0$ (0.45~1.73Hz) の周波数領域とした。係留のばね定数の小さい状態 (11.25+10.74=22 kgf/m) ではこれらの波をすべて造波し, 延べ約 100 波での実験をし, ばね定数の大きい状態 (39.60+38.46=78 kgf/m) では設定波高を 3cm に限定し, 延べ約 20 波での実験を行なった。

過渡水波の条件は, 波傾斜一定の過渡水波¹⁰⁾としてその傾斜を(波高)/(波長)比で, 1/30, 1/40, 1/50, 1/60 とし, 円周波数 3~9rad/s の範囲でその比を保ち, その外側で直線的に零(0)に減少するようなスペクトル

分布とした。波の集中点は造波機後面より 20m の位置(模型中央より 1m 下流側)にくるようにした。

過渡水波の造波装置への入力信号は UNIVAC-1110 システムによって以下に示す計算で求め¹⁰⁾, D/A 変換(DATAC-1500)してアナログ信号を作成した。

$$v(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \frac{A_{hx}(\omega)}{H_c(\omega) \cdot H_w(\omega)} \cos \left\{ \psi_{hx}(\omega) - \phi_c(\omega) - \phi_w(\omega) + \frac{\omega^2}{g} x + \omega t \right\} d\omega \quad (1)$$

ただし,

$v(t)$: 造波信号*1 の time history

$A_{hx}(\omega)$: 過渡水波の Fourier spectrum の振幅部分

$\psi_{hx}(\omega)$: 過渡水波の Fourier spectrum の位相部分

$H_c(\omega)$: 信号*1 と stroke*2 の伝達関数(振幅部分)

$\phi_c(\omega)$: 信号と stroke の伝達関数(位相部分)

$H_w(\omega)$: stroke*2 と波高*3 の伝達関数(振幅部分)

$\phi_w(\omega)$: stroke と波高の伝達関数(位相部分)

ω : 円周波数, g : 重力の加速度

x : 過渡水波の集中点, t : 時間

である。なお, $\psi_{hx}(\omega) = 0$ として過渡水波を集中($x = 20m$)させた。

3 実験結果

3.1 規則波中実験

規則波中における sway, heave, roll および波の透過率に関する周波数振幅応答を Fig.3, 4 に示す。Fig.3 は係留のばね定数 22kgf/m の状態のものであり, Fig.4 は 78kgf/m のものである。

Fig.3 より浮体動揺も波浪漂流力と密接な関係にある波の透過率²⁾も入射波高に対してほぼ線形性が保たれていることがわかる。また, 係留のばね定数を約 4 倍に上げた Fig.4 と比較すれば, heave は当然であるが, 他の応答もあまり変化していないことがわかる。

過渡的な sway の長周期運動を調べる目的で, 規則波中実験での電磁オシロ記録と, 定常外力を与えたときの free sway の記録を併記し, Fig.5 に示す。

Fig.5 の実験記録より, 過渡的な長周期運動は定常波浪漂流力が作用したときの sway 運動であると仮定し,

(2)式の運動方程式で表わせるものとする²⁾。

$$(M + K_{22})\ddot{y} + N_{22}\dot{y} + a_{22}y = E_{02} \quad (2)$$

ただし,

M : 浮体の質量, K_{22} : 付加質量,

N_{22} : 減衰係数, a_{22} : 復原力係数,

*1: 造波装置に入力される造波信号

*2: 造波機の plunger stroke

*3: 模型セット位置における波高

Fig. 2 Setting of tank test model

Fig. 3 Test results of 22 kgf/m coil spring mooring in regular waves

Fig. 4 Test results of 78 kgf/m coil spring mooring in regular waves

Fig. 5 Record example of forced oscillation in regular waves and free sway

Table 2 Test results of free oscillations

	22 Kgf/m		78 Kgf/m	
	T_0	α	T_0	α
Sway	11.35 s	0.059	6.15 s	0.041
Heave	1.32	0.60	1.32	0.60
Roll	1.44	0.30	1.44	0.30

Fig. 7 Slowly varying transient sway in regular waves (78 kgf/m spring)

Fig. 6 Slowly varying transient sway in regular waves (22 kgf/m spring)

E_{02} : 定常波漂流力

である。 $t=0$ で、 $y=0$ とすれば (2) 式の解は、

$$y = \frac{E_{02}}{a_{22}} (1 - e^{-\alpha t} \cos \omega_d t) \quad (3)$$

ただし、

$$\alpha = N_{22}/2(M + K_{22}) : \text{対数減衰係数}$$

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$$

$$\omega_0 = \sqrt{a_{22}/(M + K_{22})}$$

で与えられる。したがって、transient sway の初期振

幅 y_t (Fig.5 参照) を (4) 式で定めることにする。

$$y_t = \frac{E_{02}}{a_{22}} e^{-\alpha T_0/2} \quad (4)$$

ただし、

$$T_0 = 2\pi/\omega_d : \text{減衰振動周期}$$

である。

規則波中実験の Fig.5 のようなオシロ記録から transient sway の初期振幅 y_t (transient sway の下流側への最大変位振幅) を求め、(4)式の計算値と比較したものを無次元化し、Fig.6 および Fig.7 に示す。

(4) 式の計算において、定常波漂流力 E_{02} は (5) 式によって、波の透過率の実験値からも求められるが、ここでは線形理論の計算値を用い、減衰振動周期 T_0 および対数減衰係数 α は、free sway の実験から求めたもの (Table 2 参照) を使用した。

$$\begin{aligned} E_{02} &= \frac{1}{2} \rho g \zeta_I^2 \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \cdot L \\ &= \frac{1}{2} \rho g \zeta_I^2 \left\{ 1 - \left(\frac{\zeta_T}{\zeta_I} \right)^2 \right\} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \cdot L \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、

ρ : 水の密度、 ζ_I : 入射波の振幅、 ζ_R : 反射波の振幅、 ζ_T : 透過波の振幅、 $k=2\pi/\lambda$: 波数、 λ : 波長、 h : 水深、 L : 浮体長さ

である。

以上の計算に必要な流体力係数、波浪強制力などは矩形断面に対する領域分割法^{2),11)}で求め、通常行なわれている roll damping の修正^{4),12)}は行なわず、線形解とし

ての浮体動揺、波の透過率、および定常波浪漂流力の理論計算を行なった。使用した計算プログラムは文献(2), 3)で紹介したものである。

波高 3cm の規則波中実験における長周期の transient sway と forced sway の比を文献(8)の例にならって、Fig. 8 に示す。

ところで、定常波浪漂流力の実験値と計算値を比較した類似の実験状態のものを見ると^{(4), (12)}、高周波数領域において実験値の方が 2~3 割大きくなっている。また、波浪漂流力に急激なピークの出るような計算値であっても、実験値では顕著に現われていない^{(12), (13)}。

このような波浪漂流力の特性⁽¹⁴⁾をふまえて、Fig. 6~Fig. 8 の結果を見ると、“係留浮体の規則波中実験において、定常波浪漂流によって長周期の transient sway が生じる”と考えられる。

3.2 過渡水波中実験

波くずれが起きにくいとされている⁽¹⁰⁾波傾斜一定の過渡水波中の実験に使用した入射波の Fourier spectrum およびそれに対する sway (固有円周波数 1.02 rad/s) の応答 spectrum を Fig. 9 に示す。

spectrum 解析は FFT 法 (Fast Fourier Transform) で行ない、ウィンドウによる平滑化はせず、使用計算機は IBM-1130 にて実行した。データ総数は 1ch あたり (解析データ時間約 30s) × (サンプリング周波数 25Hz)

Fig. 8 Slowly varying transient sway ratio in regular waves

≒700~800 である。

データ解析は全 channel 同時に行ない、入射波に対する各々の周波数応答を求め、その結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 は規則波中実験での Fig. 4 に対応するものであり、Fig. 4 と同一の理論値と比較してある。

Fig. 9 Fourier spectral density of incident waves and sways

Fig. 10 Tests results in transient waves (78 kgf/m spring)

Fig. 9 で入射波の Fourier spectral density がほとんど $\omega=2\text{ rad/s}$ ($\xi_B=0.1$) 以下, および $\omega=9\text{ rad/s}$ ($\xi_B=2.1$) 以上においては Fig. 10 の実験から求めた応答値は誤差が大きいため、それらの周波数領域を除いて見ると、“過渡水波中実験から求めた周波数振幅応答は実用上差支えない実験精度である”といえる。

Fig. 9 および Fig. 10 のデータ処理は Fig. 11 の start から A 点までの区間を Fourier 解析したものである。過渡水波は B 点でほとんど通過した状態であり、C 点は消波装置からの反射波の影響が現われ始める点である。こ

のような解析区間の相違によって結果にどの程度の影響があるか調査したが、その差は Fig. 12 に見られるように、ほとんど無視できる程度である。

ところで、過渡水波中における sway の長周期運動がどの程度であるかについては、以上に示したような周波数領域での検討では実験およびデータ解析の誤差範囲内に留まってしまうきらいがある。したがって、それを時間領域で見るため、同一ゲインで電磁オシロに記録した結果を Fig. 13 に示す。

Fig. 13 の入射波は、模型がない状態での模型の位置

Fig. 11 Record example of tank tests in transient waves and periods of Fourier analysis

Fig. 12 Difference of sway responses due to various periods of Fourier analysis

における記録であって、実験中のものではないが、再現性は良好であるので、実験中に模型に当たった波と想定できる波である。Fig. 13 の上から順に波傾斜一定の過渡水波のゲインを上げ、wave slope 1/60 から 1/30 ままで変えたものである。

Fig. 13 より、過渡水波が浮体模型を通過したあとでも、長周期の transient sway (固有周期 6.15s) が残存することがわかる。

過渡水波中における長周期運動の特性に関しては、ここでは実験解析が不十分であり、Fig. 10 に示した振幅応答のみならず位相応答の検討⁹⁾、および simulation 計算プログラム⁸⁾の修正などを現在進めており、本報告の(その2)としてそれらの結果をふまえて改めて考えてい。

4 結 言

係留浮体の長周期運動の一因として、transient sway

Fig. 13 Record examples of tank tests in transient waves

が存在することを示し得た。

海洋構造物の係留設計において、transient sway の影響を考慮することは容易であって、Fig.5 でも明らかのように、定常波浪漂流力をたかだか2倍見込んでおけばよいことになる。

これに反して、Pinkster⁷⁾ のような長周期の変動外力に対しては、sway の低周波数領域での動揺特性を的確に把握しなければ定量的に係留ライン張力を推定できない⁴⁾ ことになる。

巨大船の single point mooring のように波浪に対して浮体の大きい(ξ_B の大きい)場合は Fig.8 などでも明らかのように長周期運動は無視できない設計要素となる⁵⁾。一方、波浪に対して小型な浮体となる浮桟橋、浮消波堤などは、波と同一周期の forced oscillation で係留設計が定まることが多い¹⁾。

したがって、係留浮体の長周期運動そのものの特性をより明確にすると同時に、係留設計にどのように反映すべきかについて先輩諸兄のご指導、ご批判を仰ぐしたいである。

おわりに、本研究は九州大学応用力学研究所 田才福造教授の貴重な示唆に基づくものであり、横浜国立大学工学部 竹沢誠二教授から懇切なご指導を受けました。また本研究に対して、IHI 海洋設計部 古村 滋部長をはじめ関係者の方々から細かな配慮をいただき、水槽実験に際して IHI 技術研究所 三田重雄氏および長谷川政和氏から多くのご協力をいただきました。多くの方々のご厚

誼に対して深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 井上義行：浮遊式海洋構造物の係留設計，作業船第115号（昭和53年1月）。
- 2) 井上義行：浮遊式海洋構造物の波浪中における運動および係留特性，石川島播磨技報，第17巻第2号，（昭和52年3月），あるいは Y. Inoue: Behavior of Moored Marine Structures in Waves, IHI Engineering Review, Vol.10, No.3 (1977)。
- 3) 井上義行：横波中における係留浮体の動揺と係留ライン張力，石川島播磨技報，第17巻第5号，（昭和52年9月）。あるいは Y. Inoue: Dynamic Behavior of Multi-moored Vessels in Beam Seas, IHI Engineering Review, Vol.11, No.1 (1978)。
- 4) 新井信一，根角幸明，高木又男：不規則波中の係留浮体の運動に関する研究，日本造船学会論文集第140号，（昭和51年12月）。
- 5) Ir. J. P. Hooft: Dynamic Behaviour of Moored Structures in Waves, The 4th International Ocean Development Conference, (1976)。
- 6) M. Takagi, S. Arai: On the Mooring Force on the Floating Vessels among the Irregular Sea, 14th ITTC, Vol.4 (1977)。
- 7) J. A. Pinkster: Low Frequency Phenomena Associated with Vessels Moored at Sea, Soc. of Petroleum Engineers of AIME, SPE Paper No.4837 (1974)。
- 8) Y. Inoue: Slowly Varying Oscillations of Moored Vessels, An international conference on the Behaviour of Off-Shore Structures, BOSS'76, Vol.II (1976)。
- 9) 竹沢誠二：Transient Water Wave 中の船型試験法，日本造船学会論文集，第128号，（昭和45年12月）。
- 10) 竹沢誠二，平山次清：任意過渡水波の発生について，日本造船学会論文集，第129号，（昭和46年6月）。
- 11) 井島武士，田淵幹修，湯村やす：有限水深の波による矩形断面物体の運動と波の変形，土木学会論文報告集，第202号，（昭和47年6月）。
- 12) 小寺山 亘：係留浮体の運動と係留鎖張力について，西部造船会会報，第53号（昭和52年3月）。
- 13) 野尻信弘，村山敬一：規則波中の2次元浮体に働く漂流力に関する研究，西部造船会会報，第51号（昭和51年3月）。
- 14) 水野俊明：横漂流力に及ぼす粘性影響に関する一考察，関西造船協会誌，第163号，（昭和51年12月）。