

非対称係留特性を有する浮体の長周期動揺

LOW FREQUENCY MOTIONS OF FLOATING BODY WITH ASYMMETRIC MOORINGS

谷垣 信吉¹・尾崎 雅彦²

Shinkichi TANIGAKI and Masahiko OZAKI

¹正会員 工修 三菱重工業(株) 長崎研究所(〒851-0392 長崎市深堀町5-717-1)

²工博 三菱重工業(株) 長崎研究所(〒851-0392 長崎市深堀町5-717-1)

This paper treats the low frequency motions of floating body with asymmetric moorings. The phenomena could be grasped with use of the ready made numerical simulation code for the motions of floating body with arbitrary moorings or in the tank test. However the fundamental characteristics have not been clarified yet. By using a simple numerical model, the parametrical study of the appearance of sub-harmonic motion is done. As the results, it is found that the sub-harmonic motion appears depending on the degree of the mooring asymmetry, that is the ratio of the restoring force coefficient in one side to the other side. And then the chart for judging the possibility of low frequency motion is presented.

Key Words : Floating body, asymmetric moorings, sub-harmonic motion, low frequency motions, numerical simulation

1. 序論

港湾内が静穏であるにも拘わらず、係留された船舶が長周期の動揺(サージ or スウェイ)を起こす事例が報告されている¹⁾。この現象は港湾内に係留される大型の浮体構造物に対しても発生するおそれがあり、注意を要する。長周期動揺の原因としては港外から進入する長周期波や波群性に起因する変動波漂流力などが考えられているが、スウェイ方向の長周期動揺は、非対称係留特性に起因するサブハーモニックモーションが原因の一つであると考えることができる。船舶はフェンダーと係留索を用いて岸壁に係留されることが多く、大型浮体についてもフェンダーとラバーチェーンによる係留が予想される。この場合、スウェイ方向の係留復原力特性は強い非対称性を示す²⁾。また係留索のみによる係留でも、索の長さの制約などから左右で非対称性が生じる。このような非対称係留特性によりサブハーモニックモーションが発生しうることが知られているが、本研究ではその発生条件の明確化を行った。

2. 実験結果との比較

非対称係留特性により大型浮体構造物にサブハーモニックモーションが発生しうることを確認するために、三菱重工業(株)長崎研究所の耐航性能水槽

において浮体模型を用いた波浪中動揺実験を行うとともに、6自由度の運動応答計算シミュレーション計算^{3,4)}および1自由度系モデルによる計算結果と実験結果の比較を行った。

6自由度浮体運動シミュレーションプログラムは剛体浮体の運動計算を行うもので、メモリー影響を用いて流体力を推定する時刻歴計算プログラムである。

1自由度系モデルの運動方程式は次式で表される。復原力は図-1のようにバイリニア型でモデル化した。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + K(x) = F \sin \omega t + F' \quad (1)$$

$$K(x) = \begin{cases} K_1 x & (x \geq 0) \\ K_2 x & (x < 0) \end{cases}$$

$$C = 2\zeta \sqrt{MK_2}$$

M	: 質量	(ton)
F	: 動的外力 (振幅)	(KN)
F'	: 静的外力	(KN)
K_1, K_2	: バネ定数	(KN/m)
ζ	: 減衰定数	
x	: 変位	(m)
ω	: 角振動数	(rad/sec)
t	: 時間	(sec)

時刻歴計算法としてRunge Kutta法を使用し、原点に折れ点を有しているためタイムステップは $T_1/50$ 程度と十分小さくした。

(T_1 : M と K_1 から計算される固有周期)

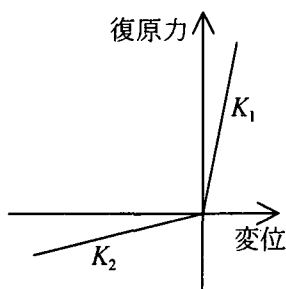


図-1 復原力特性

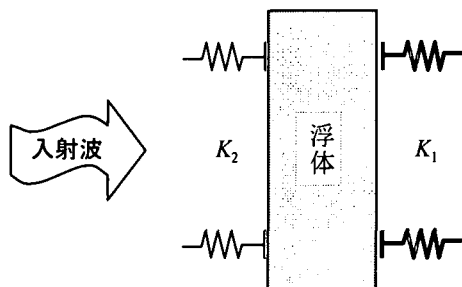


図-2 実験概略図

表-1に示すような諸元の箱形浮体を図-2のように左舷方向と右舷方向でバネ定数が異なる線形バネで係留し、真横から波を作用させた。波高5.35m、周

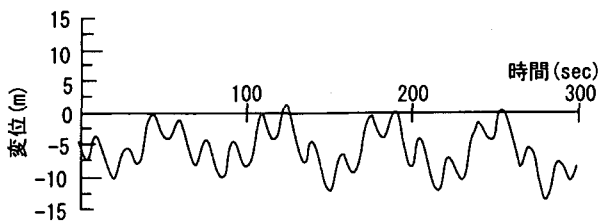


図-3 実験結果

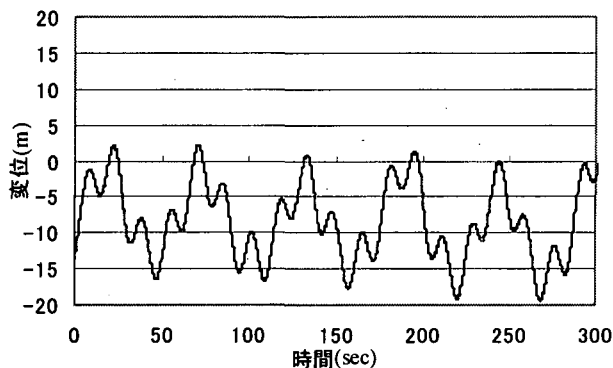


図-4 6自由度シミュレーション結果

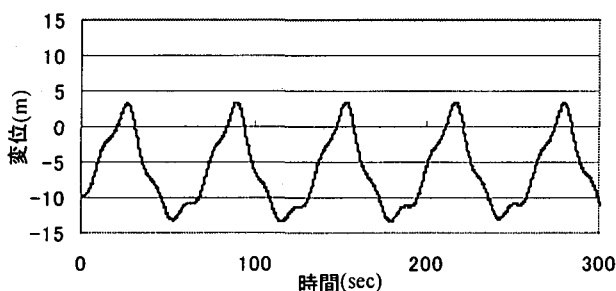


図-5 1自由度シミュレーション結果

表-1 浮体諸元

		模型	実機
長さ	L	2.5 m	390 m
幅	B	621.8 mm	98 m
深さ	D	300.0 mm	46.8 m
吃水	d	149.4 mm	23.3 m
排水量	Δ	232.2 kg	903,950 ton
バネ定数	K_1	4,448.3 N/m	108,255 KN/m
	K_2	211.8 N/m	5,155 KN/m
縮尺		1/156	1

期15.8secの規則波が入射した場合の応答の実験結果を図-3に、6自由度のシミュレーション結果を図-4に、1自由度モデルの計算結果を図-5に示す。なお1自由度系の計算では、固有周期付近の流体力を加え、波強制力を動的外力、漂流力を静的外力として計算を行った。

図-3, 4, 5のように、浮体に規則波を作用させているにも拘わらず、その周期の数倍の長周期で動揺（サブハーモニックモーション）が発生しており、既存の6自由度シミュレーション計算プログラム、さらには1自由度モデルでも定性的に現象をとらえられていることがわかる。

3. 1自由度モデルによる検討

(1) サブハーモニックモーションの発生

非対称復原力特性に起因するサブハーモニックモーションについて、基本的な特性を把握するために、2章で説明した1自由度モデルを使用して時刻歴シミュレーションを行い、サブハーモニックモーションの発生条件について調べることにした。

基本的な特性を調べるために静的外力 F を0とし、その他の諸元には、

$$M=10,000\text{ton} \quad K_1=4,000\text{KN/m} \quad K_2=100\text{KN/m} \\ \zeta=0.1 \quad F=1,000\text{KN}$$

を採用した。図-6に示すような周期9秒の規則的な外力を作用させた場合、サブハーモニックモーションが発生しない場合（ $K_1=1,000\text{KN/m}$ ：図-7）と発生する場合（ $K_1=4,000\text{KN/m}$ ：図-8）があった。

(2) 外力の影響

次にサブハーモニックモーションを発生した $K_1 = 4,000 \text{ KN/m}$ の場合に加振振幅を1,000KN, 2,000KNとし、周期を5～20secまで変化させた場合の変位応答応答計算結果の最大値、最小値を図-9に示す。

バネ定数の大小に応じて変位量（ K_1 側と K_2 側）に顕著な大小が生じているが、外力と応答は比例関係にあるという興味深い結果を得た。また系の固有周期が K_1 側における自由振動と K_2 側における自由振動の和としてして、

$$T_n = \frac{T_1 + T_2}{2} = \pi \left(\sqrt{\frac{M}{K_1}} + \sqrt{\frac{M}{K_2}} \right) \quad (2)$$

と考えると、この計算例の固有周期は約36.4秒とな

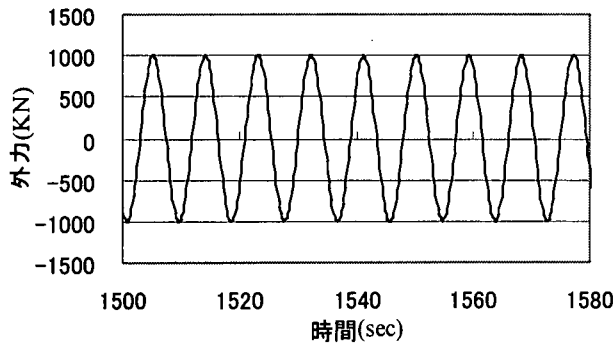


図-6 外力波形

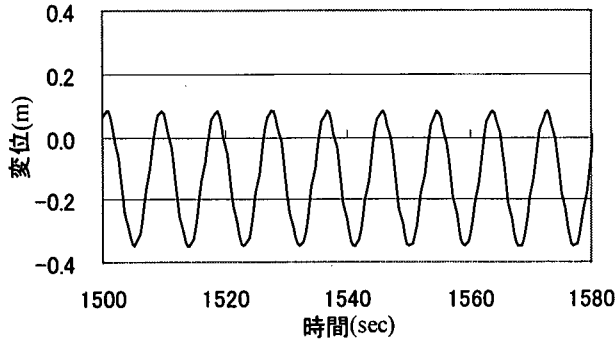


図-7 $K_1=1,000\text{KN/m}$ の場合の応答

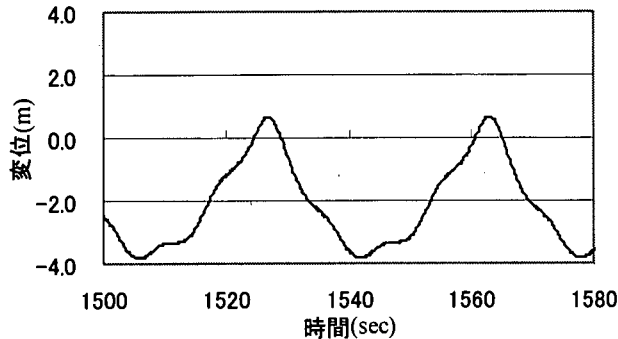


図-8 $K_1=4,000\text{KN/m}$ の場合の応答

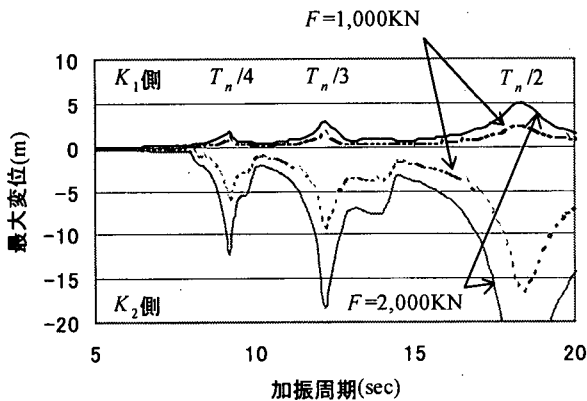


図-9 外力パラメータの影響

るが、応答が増幅されている周期は固有周期の $1/4$ 、 $1/3$ 、 $1/2$ の周期であることがわかる。つまり、加振周期が式(2)から計算される系の固有周期の整数分の1の時応答が増幅されており、現象がサブハーモニックモーシオンであることがわかる。

(3) バネ比の影響

加振周期をサブハーモニックモーシオンが顕著に現れる周期、すなわち固有周期の整数分の1の周期に設定すれば、サブハーモニックモーシオンの特性がとらえやすい。そこで、バネ定数 K_1 を100～10,000KNまで変化させ、加振周期は常に系の固有周期の整数分の1となるように調整し、前項と同様に応答の最大値、最小値を調べた。加振周期を固有周期の5分の1と設定した場合の結果を図-10に示す。

バネ定数比が55となる付近から応答が飛躍的に大きくなっている。バネ定数比が55、56の場合の応答波形を図-11、12に示すが、バネ定数比が55ではサブハーモニックモーシオンは発生しておらず、56では発生している。つまり、バネ比55付近にサブハーモニックモーシオン発生境界があると思われる。

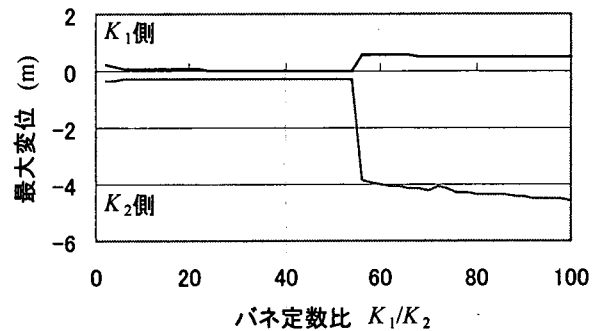


図-10 バネ定数比の影響

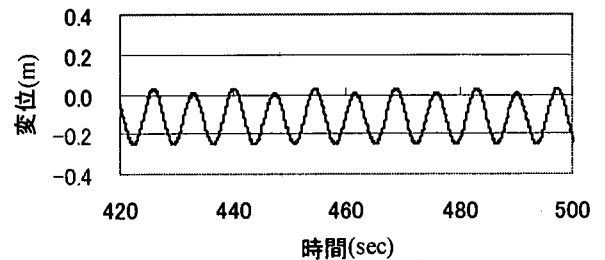


図-11 バネ定数比が55の時の波形

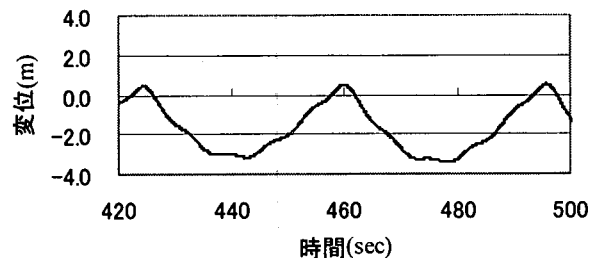


図-12 バネ定数比が56の時の波形

そこで、各サブハーモニックモーシオンの次数毎にサブハーモニックモーシオン発生境界になるバネ定数比を調べた。まず K_2 と ξ を固定し、 $M=1,000$ 、10,000、100,000 ton の3ケースでサブハーモニックモーシオンの発生バネ定数比を調べた。計算結果を図-13に示す。

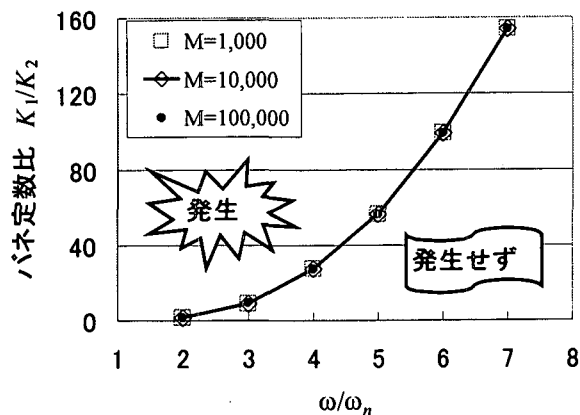


図-13 発生バネ定数比（質量の影響）

質量に拘わらず、発生するバネ定数比は各次数において一定値となる。これは、バネ定数・質量から計算された固有周期をもとに加振周期を決定しているが、サブハーモニックモーションの発生はバネ定数比と、固有周期／加振周期の比で決まることを表している。

次に M を10,000tonで固定し、減衰定数を0.03～0.3まで変化させたときのサブハーモニックモーション発生バネ定数比を図-14に示す。

減衰定数によって多少の変動はあるが、この程度の範囲では、サブハーモニックモーション発生バネ定数比はほとんど変化しない。大型浮体のサブハーモニックモーションは低周波数領域の現象であり、減衰は大きくないと考えられるため、減衰定数の影響はほとんどないと考えても差し支えないと考えられる。

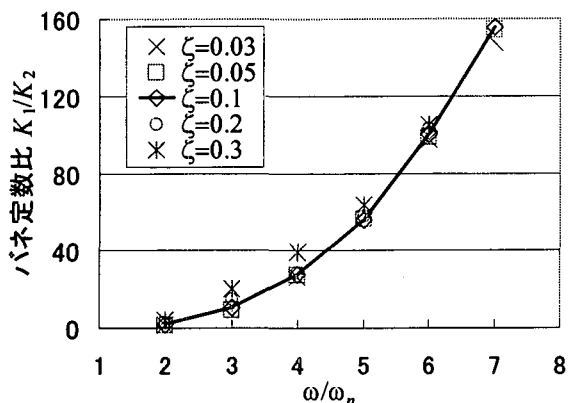


図-14 発生バネ定数比（減衰定数の影響）

(4) 静的外力の影響

ここまでは静的な外力が作用していない状態における応答特性について調べたが、実際の浮体には波浪外力のほかに定常的な波漂流力や風による抗力などが作用する。従って、静的な釣合位置は必ずしも折れ点ではなく、どちらかに少し動いた位置となる。静的な外力によって釣合位置が硬い方へ移動する場合につき調べてみる。

静的外力 F' を

$$f' = \frac{F'/K_1}{\sqrt{F/(K_1 - \omega^2 M)}} \quad (3)$$

で無次元化し、無次元パラメータ $f'=0.0, 0.01, 0.05, 0.1$ の場合の発生バネ定数比を図-15に示す。

静的外力の割合が大きくなると、サブハーモニックモーションを発生するバネ定数比の範囲が広がる。また釣合位置がほんの少しずれただけでサブハーモニックモーションはかなり発生しやすくなるため、注意が必要である。

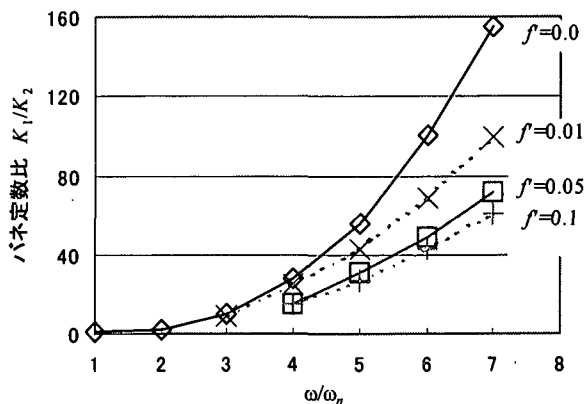


図-15 発生バネ定数比（静的外力の影響）

4. 浮体への適用

(1) 6自由度のシミュレーション計算との比較

ここまでは簡易化した1自由度系モデルによる検討であったが、実海域に係留される船舶や海洋構造物は6自由度の運動成分を有しているため、この1自由度系モデルで得られた結果をそのまま適用できるかどうかを検討する必要がある。

そこで2章で使用したモデルを用いて、1自由度系の簡易化モデルと6自由度の浮体運動シミュレーションの結果を比較した。

浮体モデルは表-1と同じもので、付加質量、造波減衰についても考慮されている。加振周期については、浮体質量、付加質量、バネ定数から概算した固有周期をもとに設定した。また計算を行ったバネ定数比は表-2の5ケースである。

表-2 バネ定数

K_1 (KN/m)	K_2 (KN/m)	K_1/K_2
108,250	5,155	21
206,200	5,155	40
309,300	5,155	60
412,400	5,155	80
618,600	5,155	120

漂流力や風抗力等の静的外力については波浪条件、気象条件により異なるため、まずは考慮せず計算を行った。サブハーモニックの発生の有無を図-16に

(できるだけ対称係留にする)

2. 固有周期を長くする

なる対策を行うことが効果的である。

例えば排水量50,000tonの浮体を6,000KN/mのフェンダー2個と係留索(復原力係数200KN/m)で係留する場合を考える。入射する波の代表周期は12秒以下とする。バネ定数比は60なので、図-13より $\omega/\omega_n=5$ 以下のサブハーモニックモーション考慮する必要がある。系の固有周期が(2)式より56.1secであることから、11.2, 14.0, 18.7, 28.0 secの波に対する注意が必要ということになり、この場合 $\omega/\omega_n=5$ に相当する11.2secが入射波領域にはいる。 K_2 を小さくし固有周期を長くしてこれを回避しようとする、バネ定数比が大きくなるためより低次のサブハーモニックモーションが発生しやすくなる。上記1., 2.を満足するためには K_1 を小さくすることが効果的であると思われる。そこでフェンダーをバネ定数4,000KN/mのものと交換すると、固有周期は57.5secとそれほど長くないものの、バネ定数比が40で、 $\omega/\omega_n=4$ 以下のサブハーモニックモーションを考慮すればいいことになり、周期14.3 sec以上の波について注意すればよく、入射波領域からはずれる。フェンダーの大きさはバネ定数で一義的に決められるものではないが、過大なフェンダーは逆効果になりうる。

5. 結論および今後の課題

本研究では非対称な係留特性に起因する浮体の長周期動揺(サブハーモニックモーション)の発生条件について調査を行った。以下に本論文の結論を示す。

1. サブハーモニックモーションは(2)式で算定される固有周期の整数分の1の周期で加振したときに応答が顕著に現れる現象である。
2. 係留特性の非対称性が強いほどより低次でサブハーモニックモーションは発生しやすい。サブハーモニックモーションの発生は、図-13を使用すれば簡単に検討できる。
3. 漂流力などの静的な外力が作用した場合、サブハーモニックモーションの発生領域は図-13より広がる。

今後の課題としては次のようなことがあげられる。

1. 静的な外力が作用した場合のサブハーモニックモーションの判定方法
2. サブハーモニックモーションが発生した場合の応答の大きさ推定の簡便法
3. フェンダーで係留される場合で係留特性の原点付近にクリアランスがある場合の応答についての検討

参考文献

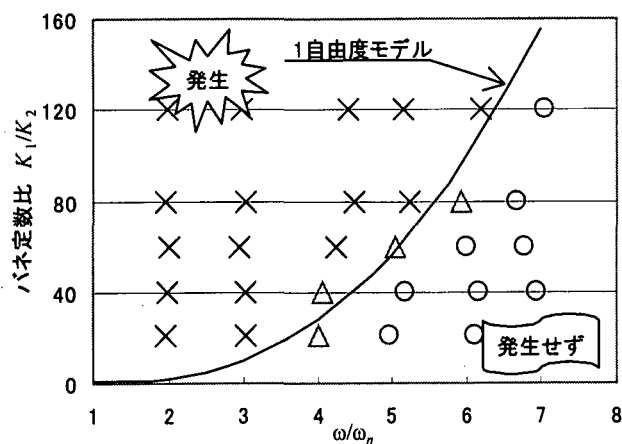


図-16 6自由度シミュレーション計算との比較

示す。

サブハーモニックモーション発生の判定はシミュレーションで得られた時系列データに基づき行ったため、多少の曖昧な点はあるが、 $\times$ は明らかにサブハーモニックモーションと思われる長周期の振動が発生している場合で、 $\circ$ は加振周期と同じ周期での調和振動が発生している場合を示している。 $\triangle$ はどちらとも判定できない場合である。発生の限界線付近でどちらともいえない応答があったものの、1自由度系の計算で得られた限界線と、6自由度のシミュレーション計算の結果は良好に一致している。

次に漂流力による静的外力を考慮した場合の計算結果を図-17に示す。

1自由度系のシミュレーションと同様に、サブハーモニックモーションの領域が広がっていることがわかる。しかし、それほどかけ離れていないため、1次検討用に使用することが可能であると思われる。

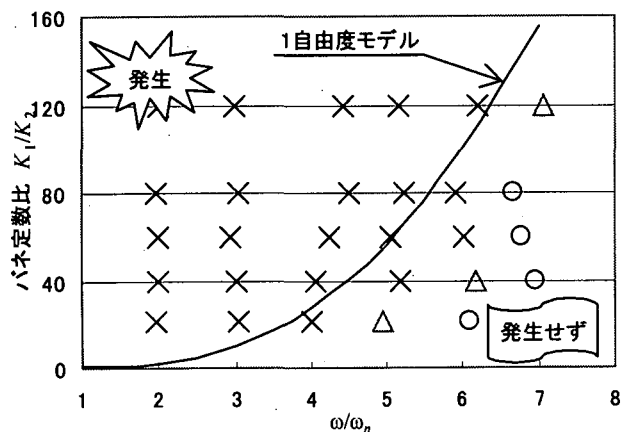


図-17 漂流力を考慮した6自由度シミュレーション結果との比較

(2) サブハーモニックモーションの対策

以上のことから、サブハーモニックモーションを防ぐには、

1. バネ定数比を下げる

- 1)白石悟, 永松宏一, 海原敏明 : 外洋性港湾における波浪特性が船舶係留時の防舷材の変形量に及ぼす影響分析, 海岸工学論文集, 第45巻, pp791-795, 1998.11.
- 2)上田茂 : 係岸船舶の動的解析手法とその応用に関する研究, 港湾技研資料, No. 504, 1984.12.
- 3)Ikegami, K. and Matsuura, M. : Study on Motions of Floating Body under Composite External Loads, 日本造船学会論文集, Vol. 144, 1978. 12.
- 4)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. 7.

(1999. 4. 19受付)