

箱型浮体に作用する波漂流力の実験的考察

上田 茂*・小熊康文**・白石 悟***

1. ま え が き

浮体がチェーンまたは係留ロープなどで弛緩係留されている場合には、浮体が波周期の数倍の周期のサージングまたはスウェイングをすることがあり、条件によっては、この周期成分の動揺が卓越する。この現象は浮体の長周期動揺現象またはスロードリフトオシレーションとして知られていて、不規則波中の浮体の長周期動揺を予測するための計算法がいままでにいくつか提案されている。それらを大別すると、浮体の長周期動揺は、浮体に作用する長周期の変動波漂流力に起因すると考えるものと、不規則波中の長周期成分波の周期が浮体を係留する係留システムの固有周期と一致することによる共振現象であると考えられるものである。筆者らは、近年、実海域において計測された箱型の浮体波堤のスウェイングの動揺記録を解析するに当たり、スウェイングの動揺に波周期の約 10 倍の周期の動揺成分が卓越して、かつ、この長周期動揺が規則的であることに注目し、この現象を解明するために水理模型実験を行い、浮体に作用する波漂流力を求め、かつ、この波漂流力と浮体の係留系の剛性との関係から長周期動揺が生ずることを確認し、動揺を予測するための計算法について考察した。

2. 模型実験

2.1 実験装置

縦 50 cm、横 250 cm、型深 20 cm、喫水 5 cm のアクリル製の箱型の模型浮体（以下浮体という）を用いて、港湾技術研究所の平面水槽（20 m×20 m×1 m）において動揺実験を行った。実験においては、浮体の長軸が波の進行方向に一致する場合（以下縦係留系という）と、浮体の長軸が波の進行方向と直角になる場合（以下横係留系という）の二つの配置について、浮体を十分な剛性をもつワイヤロープと重錘とからなる係留系（以下重錘係留系という）および極めて柔らかいばね係留系（以下ばね係留系という）の二つの係留系について、そ

れぞれ、規則波中および不規則波中における浮体の動揺量および係留力を計測した。

重錘係留系の実験の目的は浮体に作用する波漂流力の性質とその大きさを明らかにすることで、主として規則波中において、重錘の重量を徐々に増加しながら繰り返し行い、浮体が漂流しなくなったときの重錘の重量をもって波漂流力とした。このようにして、波周期および波高を変えて数ケースの実験を行った。波漂流力の値は波周期および波高によって異なるが、この実験の範囲では 200～400 gf と推定された。

つぎに、得られた波漂流力の値に基づいて、ばね係留系の実験に用いるばね定数として、先に求めた波漂流力を受けて浮体が有意な漂流をするように、適当な値をいくつか定め、これらのばね定数をもつコイルスプリングを用いたばね係留系について、規則波中および不規則波中での動揺実験を行った。有意な漂流とは六自由度計で測定できる範囲の動揺量であり、ここで用いた六自由度計の場合には 30 cm 程度を目安とした。したがって、ばね定数は 2～10 gf/cm となり、模型浮体はきわめて柔らかい変位復元力特性を有する係留系に係留されていることになる。ただし、図-1 に示すように、コイルスプリングの変位復元力特性はコイルスプリングの変形がある程度大きくなるとほぼ所定のばね定数となるが、変形がごく小さい間はばね定数がこれよりやや大きくその意味では非線形である。しかしながら、そもそもこの実験においては、ばね係留系といえども、浮体が実験開始前の位置を超えて波の進行方向に対して反対側に移動する

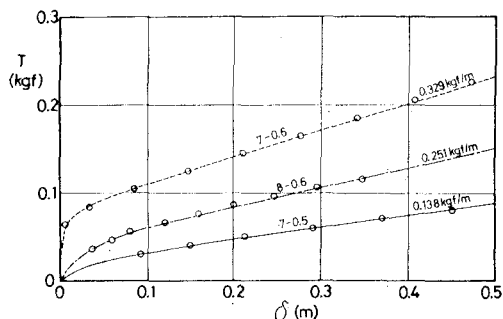


図-1 コイルスプリングの変位復元力特性

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 構造部海洋構造研究室長

** 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所

*** 正会員 運輸省港湾技術研究所 構造部主任研究官

場合には、係留系の拘束力が働かないいわゆる非対称な変位復元力特性を有する係留系である。したがって、実験結果の解析および計算においては、上記のばね係留系の非線形性について十分考慮するものとする。

ばね係留系の規則波中における実験の目的は、重錘係留系の実験と同様に浮体に作用する波漂流力の性質とその大きさを明らかにすることである。また、不規則波中の実験においては、規則波中の実験結果に加えて、さらに、不規則波中の変動波漂流力の計算法および浮体の動揺計算法の確立のために必要な情報を得ることを目的とした。動揺実験においては、浮体の動揺量を六自由度変位測定装置で、また、ばねの張力をひずみゲージ式張力計によって測定した。これらの測定値はデータレコーダによって記録し、AD 変換ののち港湾技術研究所の大型

電子計算機 ACOS 1000 によって処理した。

以上に述べた実験ケースを表-1 に取りまとめて示す。なお、この他にも数ケースの実験を行ってはいるが、動揺量が大きく六自由度計の測定範囲を超えたものや、ヨウイングが大きくなって係留索の張力に及ぼす影響が大きいと判断したものなどは省略している。また、図-2 は実験における模型および計測装置の配置を、図-3 は重錘係留系およびばね係留系の場合の波漂流力および張力の測定装置の概略を示したものである。

2.2 実験結果

a) 規則波中の実験結果

重錘係留系の実験においては、上述したように各実験ケースにおいて重錘の重量を徐々に増加して、浮体が漂流をしなくなったときの重錘の重量をもって波漂流力とした。たとえば、縦係留系で、波周期 $T=0.92\text{ s}$ 、波高 $H=6\text{ cm}$ のときには、重錘の重量が $W=75\text{ gf}$ では浮体は漂流しないが、重錘の重量が $W=70\text{ gf}$ では浮体は次第に漂流する。浮体は2本のワイヤロープで係留されているので、波漂流力は $F_D=140\sim 150\text{ gf}$ と推定される。重錘係留系の場合には、波漂流力はこのようにして求めたが、重錘の重量を 5 gf づつ増加したので波漂流力の推定値の誤差は各実験ケースの最大波漂流力に対し縦係留系については $5\sim 6\%$ 、横係留系については $2\sim 3\%$ となる。

つぎに、ばね係留系の実験においては、浮体が漂流しかつその位置で停止していたので、浮体に作用している波漂流力とコイルスプリングの張力とが釣り合っているものとみなし、この張力の値を波漂流力とした。

図-4 は横係留系について、規則波中の重錘係留系とばね係留系の浮体の動揺の時刻歴を不規則波中のそれらと比較して示したものである。重錘係留系では波漂流力が重錘の重量を超えたときに浮体は漂流を始めるが、波漂流力と重錘の重量との差が定常力として作用し続けるため、浮体は徐々に波の進行方向に漂流していくのに対し、ばね係留系では浮体は波漂流力に等しいばね張力に対応する変位をしてそこで停止する。以上の重錘係留系およびばね係留系の規則波中の実験結果から判断して、

表-1 実験ケースの一覧

波周期 (s)	縦 係 留 系				横 係 留 系				
	2.74	1.5	0.92	0.73	2.72	1.5	0.92	0.73	0.62
重錘係留系	○	○	○	○		○	○	○	
ばね係留系					○	○	○	○	
8-0.6		○	○	○	○	○	○	○	
7-0.6	○	○	○	○	○	○	○	○	
7-0.5				○	○	○	○	○	○
6-0.6					○	○	○	○	
6-0.5	○	○	○	○	○	○	○	○	
5-0.5	○	○	○	○	○	○	○	○	
5-0.4	○	○	○	○	○	○	○	○	

○: 規則波 ○: 不規則波

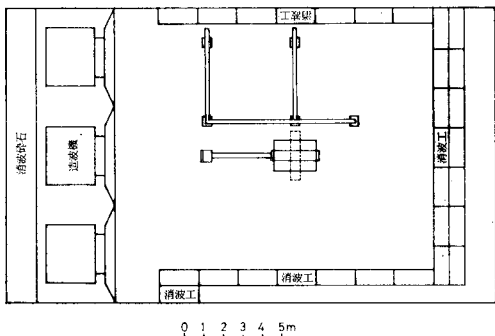


図-2 模型および計測装置の配置

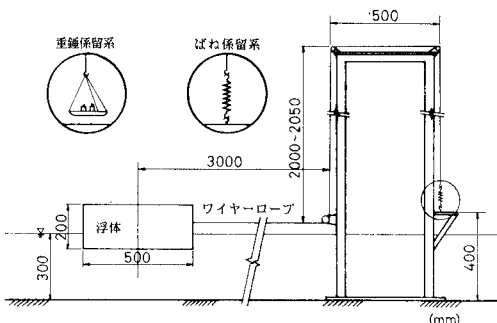


図-3 波漂流力および張力の測定装置

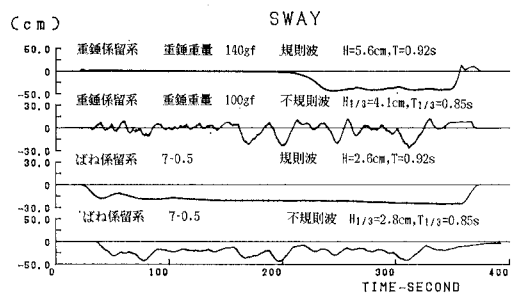


図-4 浮体の動揺時刻歴 (重錘およびばね係留系)

波漂流力は規則波中では一定であると考えてよい。波漂流力の値は波周期によって当然異なるが、縦係留系では130~150 gf、また、横係留系では300~500 gfであった。なお、実験においては、規則波中および不規則波中のいずれについても、造波開始から数波の間は浮体を固定しておいて、しかるのちに解放して動揺量および張力の測定を行った。これは、造波初期の波の非線形性の影響を除去するためであるが、その結果、井上が長周期動揺の原因としてあげている過渡現象は見られなかった。

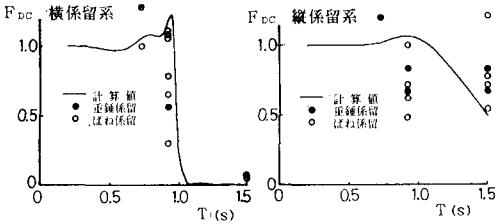


図-5 漂流力係数の実験値と計算値

図-5は、伊藤による矩形断面浮体の動揺に関する近似理論によって波の透過率を求め、この値を用いて丸尾の理論によって求めた波漂流力係数を計算した結果と、実験で得られた波漂流力から求めた波漂流力係数とを比較して示したものである。これを見ると、横係留系については波漂流力係数の計算値と実験値とはよく合っている。しかし、縦係留系の場合には、波の進行方向に対する浮体の幅が50 cm、長さが250 cmであるから、 $B/L=0.25$ となるので、二次元理論に基づく計算値は実験値に対して過大になると予測されたが、実験値と計算値とを比較した結果、計算値が実験値より大きいことがわかる。

b) 不規則波中の実験結果

重錘係留系およびばね係留系について不規則波中の動揺実験を行った。ただし、実験の多くはばね係留系におけるものである。すでに図-4に示したように不規則波中の浮体の動揺は重錘係留系およびばね係留系のいずれの場合にも規則波中の場合とは異なっており、浮体は20 s前後の周期で動揺をしているが、これは波周期の20倍前後の長い周期である。

不規則波中における重錘係留系とばね係留系の動揺の時刻歴にはやや相違点が見られる。図-6は二つの係留系の力の

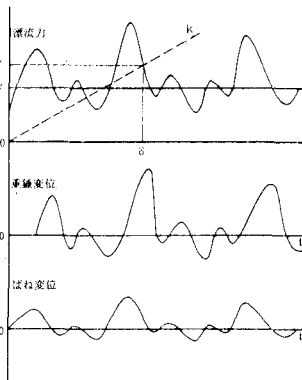


図-6 重錘係留系とばね係留系の動揺の模式図

作用状況の相違を模式的に示したものである。ばね係留系においては浮体は波漂流力に等しいばね張力に対応する変位をするが、重錘係留系の場合においては、{(波漂流力)-(重錘の重量)}の正負によって浮体の動揺が決まる。

図-7は有義波周期がおおよそ0.85 sおよび1.25 sの不規則波中の浮体の動揺の時刻歴を、重錘係留系およびばね係留系について比較して示したものである。図中、ばね係留系については種々のばね定数のばねを用いた場合の結果を比較して示している。ただし、波高は実験ケースごとに異なっているので注意を要する。

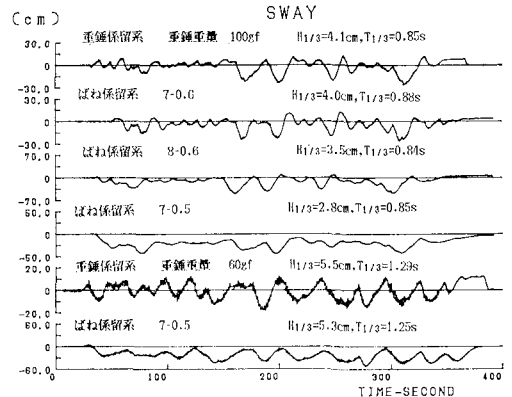


図-7 浮体の動揺の時刻歴 ($T_{1/3}=0.9\text{ s}, 1.5\text{ s}$)

図-6の動揺の模式図と図-7の動揺の時刻歴とから、波漂流力の作用による浮体の動揺特性に影響を及ぼす要因は、波周期と浮体の形状、およびこれに加えて、重錘係留系では重錘の重量と波高、また、ばね係留系ではばね定数および波高であることがわかる。ただし、ここで用いたばねがかなり柔らかいので、ばね定数が動揺に及ぼす影響はほとんどない。しかし、ばね定数がこの実験で用いたものの数十倍にもなるとその影響が一次の波強制力に対する動揺に現れて来る。この点については、のちに計算を行って検討する。なお、このほかに浮体の動揺に伴う造波減衰係数が浮体の長周期動揺の特性に大きな影響を及ぼすことがのちに計算を行った結果明らかになっている。

3. 動揺計算および実験値との比較

3.1 動揺計算の方法

すでに述べたように、規則波中の浮体は波漂流力の作用を受けて漂流するが、ばね係留系の実験結果から判断して、規則波中においては波漂流力はほぼ一定と考えられる。したがって、不規則波中においては、ゼロアップクロス法で求めた個々の波をそれぞれの周期と波高とをもつ単一の規則波とみなし、不規則波をこれらの規則波の連なりと考え、個々の波が浮体に作用している間は

表-2 実験結果と計算結果との比較

実験条件		ス ウ ェ イ ン グ					ばね張力 最大 (gf)	減衰定数 (kgf $\cdot$ m $^{-1}$ s)
		最大 (cm)	最小 (cm)	平均 (cm)	$A_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)		
ばね係留系 7-0.6 $H_{1/3}=3.99$ cm $T_{1/3}=0.88$ s	実験値	-25.4	12.1	-5.02	24.8	27.6	230	
	計算値	-17.9	1.34	-5.64	6.40	7.03	133	9.47
	計算値	-28.7	5.11	-7.61	19.6	19.8	175	3.13
	計算値	-40.9	11.9	-8.60	30.8	14.8	205	1.89
ばね係留系 8-0.6 $H_{1/3}=3.45$ cm $T_{1/3}=0.84$ s	実験値	-49.6	9.79	-14.9	45.9	46.7	186	
	計算値	-21.2	-5.66	-12.3	4.95	8.98	95.0	9.47
	計算値	-29.5	-0.14	-12.8	18.6	24.3	111	3.13
	計算値	-37.0	4.30	-13.7	29.9	22.4	131	1.89
ばね係留系 7-0.5 $H_{1/3}=2.78$ cm $T_{1/3}=0.85$ s	実験値	-43.2	-8.07	-22.7	24.1	21.9	98.1	
	計算値	-23.8	-12.9	-17.9	2.92	7.03	53.0	9.47
	計算値	-31.3	-7.14	-18.0	10.8	19.7	63.3	3.13
	計算値	-36.2	-4.15	-18.2	21.7	25.8	69.3	1.89
ばね係留系 7-0.5 $H_{1/3}=5.27$ cm $T_{1/3}=1.25$ s	実験値	-52.1	-2.23	-25.7	35.3	36.5	101	
	計算値	-48.6	-17.7	-30.6	9.31	10.5	86.8	5.04
	計算値	-56.9	-6.85	-31.1	28.9	28.8	97.8	1.66
	計算値	-63.9	2.02	-31.6	57.4	34.1	107	1.01
重錘係留系 100 gf $H_{1/3}=4.08$ cm $T_{1/3}=0.85$ s	実験値	-26.4	11.8	-3.47	30.7	35.5	—	
	計算値	-22.1	1.43	-7.83	7.58	13.0	—	9.47
	計算値	-59.9	4.36	-22.5	24.6	27.7	—	3.13
	計算値	-92.5	7.30	-40.3	58.7	46.5	—	1.89

定の波漂流力が作用するものと考えて不規則波中の変動波漂流力を算定することとした。この変動波漂流力の時刻歴をあらかじめ計算しておいて、すでに港湾技術研究所において開発した係留浮体の動揺の数値シミュレーション手法の運動方程式の数値積分の各ステップに強制力として与えた。個々の波に対する波漂流力は、まず、伊藤による矩形断面浮体の動揺に関する近似理論によって波の透過率を求め、この値を用いて丸尾の理論によって計算した。その場合、ここで検討の対象とする係留系のばね定数は、係留系の固有周期が 20~30 s となるような、かなり柔らかいものであるから、波の透過率は自由浮体に対して計算しても、ばね係留系として計算した結果とはほとんど変りがない。以下に実験結果と計算結果とを比較して検討を行うが、先に述べたように、縦係留系については $B/L=0.25$ であるために、二次元理論に基づく規則波中における波漂流力係数の実験値が計算値とかなり相違していたので、ここでは横係留系についてのみ実験結果と計算結果とを比較することにする。また、規則波中の計算結果は上の仮定から実験結果と一致することが明らかであるので省略する。

3.2 実験値と計算値との比較

ここでは、上記の仮定によって計算した変動波漂流力を与え、また、同時に一次の波強制力が浮体に作用するものとして、上記の浮体の動揺の数値シミュレーション手法を用いて浮体の動揺を計算した。その結果、運動方程式の中の減衰定数が浮体の長周期動揺に及ぼす影響が非常に大きいことがわかったので、のちに減衰定数を変更して計算を行い動揺計算に用いる減衰定数について検

討した。また、ばね定数を変えて計算を行い浮体の動揺に及ぼす係留系のばね定数の影響を調べた。ここでは、まず、不規則波中の浮体の動揺による造波減衰定数として有義波周期を周期とする規則波に対する計算値を用いて動揺計算を行った結果を示す。なお、計算結果の一覧を表-2に示すので、以下の図-8~10の説明において参照されたい。

図-8 は上記の条件で計算した浮体の動揺量の時刻歴と実験のそれとを比較して示したものである。これらを比較すると、動揺量および動揺周期のいづれについても計算値が実験値に比べてかなり小さいことがわかる。

この原因を検討した結果、浮体の動揺の運動方程式の中の減衰定数が実験における値よりもかなり大きいことがわかった。すなわち、図-8 に示した動揺計算におい

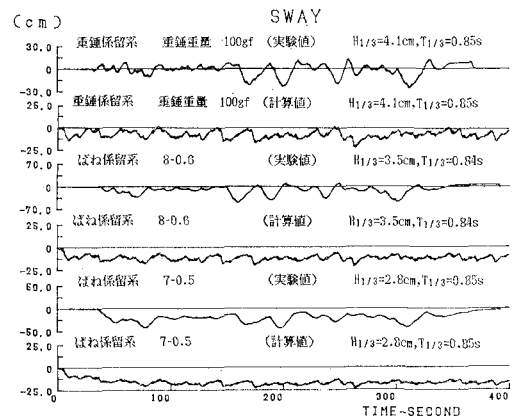


図-8 実験結果と計算結果との比較 (動揺の時刻歴)

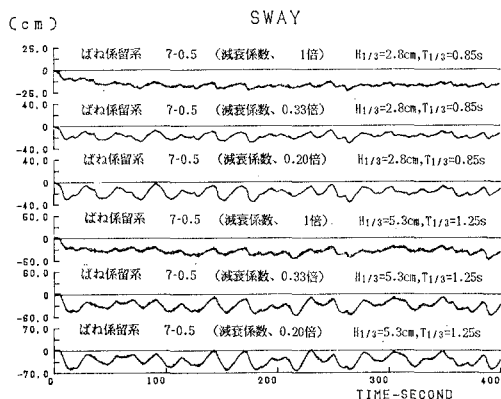


図-9 実験結果と計算結果との比較(減衰定数の影響)

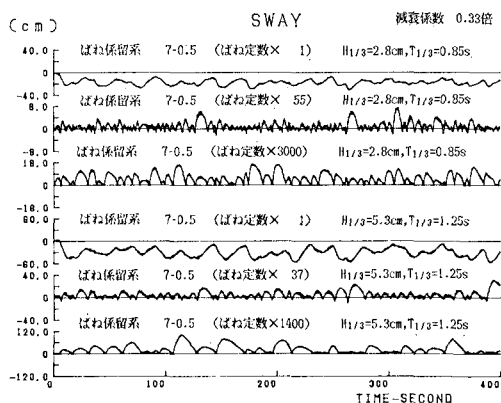


図-10 実験結果と計算結果との比較(ばね定数の影響)

ては造波減衰定数として有義波周期に対する値を用いるが、実際には浮体は一次の波強制力に対してはほとんど動揺せず、むしろ、この周期の20倍もの周期の動揺をしているわけであるから、有義波周期に対する造波減衰定数を用いるのは適当ではない。したがって、浮体の動揺周期に対する造波減衰定数を用いるほうが良い結果を与えるものと考え、斎藤らは静水中および規則波中において、長さ約1.5m、半径0.16mの半円形断面を有する浮体の強制動揺実験を行って、波浪中においては抵抗増加があるために、長周期動揺に対する減衰定数は静水中のそれに比べて大きいことを指摘している。ただし、実験値は $1/B$ との相関があり、かつ、ばらつきがあって、0.25~1.0 kgfs/mの範囲にある。そこで、実験値と計算値とが良好な対応を示すときの減衰定数の値を、動揺両振幅の1/3最大平均値を指標として調べることにし、造波減衰定数の値を有義波周期に対して求めた値の1/3および1/5として動揺計算を行った。

その結果は表-2および図-9に示すとおりであるが、有義波周期が約0.85sの場合には、造波減衰定数

をこの周期に対する値の1/3または1/5としてもなおかつ実験値が計算値より大きい。しかし、有義波周期が約1.25sの場合には、同じく1/5とした場合の計算値は実験値とよく合っている。造波減衰定数の値そのものは、有義波周期約0.85sに対しては9.47 kgfs/mであるのに対し、同じく約1.25sに対しては5.04 kgfs/mであるから、これらの値の1/5はそれぞれ1.89 kgfs/mまたは1.01 kgfs/mになる。なお、浮体の長周期動揺に影響を及ぼす要因の一つに、造波減衰定数の他に付加質量があるが、付加質量は長周期動揺に対しては増加するもののその変化は大きくないので、動揺に及ぼす影響は造波減衰定数ほど大きくない。

つぎに、浮体の動揺に及ぼすばね定数の影響を調べた。ばね定数としては、浮体が一次の波強制力と同調しやすいようなものを選んだ。図-10はその結果得られた浮体の動揺の時刻歴を示したものである。ばね定数が大きくなると、漂流力による浮体の動揺が消滅して、一次の波強制力と同調する動揺が卓越してくることがわかる。

4. あとがき

弛緩係留系における浮体の長周期動揺の模型実験および数値計算を行った結果、不規則波中においては浮体が長周期動揺をすることを確認した。長周期動揺は変動波漂流力の作用によって引き起こされるが、係留系の変位復元力特性が変動波漂流力に対して十分に剛であれば、漂流力による長周期動揺は生じない。また、実験値と計算値とを比較して、浮体の長周期動揺計算に用いる造波減衰定数について検討した。

なお、本研究を実施するに当たっては、運輸省第四港湾建設局から、浮防波堤の実証実験に係わる貴重なデータの提供を載くとともに、模型実験に対しての協力を得た。ここに記して深甚なる感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) F. H. Hsu and K. A. Blenkarn: Analysis of Peak Mooring Force Caused by Slow Vessel Drift Oscillation in Random Seas, 2nd OTC, 1970, #1159.
- 2) Maruo, H.: The Drift of a Body Floating on Waves, Journal of Ship Research, Vol. 4, No. 3, 1960.
- 3) 井上義行: 横波中における係留浮体の長周期運動(その2), 日本造船学会論文集, 第144号, pp. 145~154.
- 4) 斎藤公男ほか: 長周期動揺する係留浮体に働く減衰力について, 関西造船協会誌, 第195号, 1984, pp. 51~59.
- 5) 伊藤喜行ほか: 浮防波堤の水理に関する近似理論と応用, 港研報告, 第11巻3号, 1972, pp. 141~166.
- 6) 上田 茂ほか: 大型矩形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究, 港研報告, 第19巻3号, pp. 105~143.