

不規則波中での港内係留船の運動予測手法に関する一考察

——流体力特性からみた検討——

榎 木 亨*・青 木 伸 **

1. はじめに

近年、港の静穏度を船体運動量から評価しようといった試みや、荒天時に船舶を港内避泊させるための検討などが行なわれるに当たって、港内係留船の運動や係留力の正確な算定手法の開発の必要性が高まっている。港内係留船の運動予測手法としては、以下に挙げるような理由から、浮体の運動方程式を時間ステップ毎に数値積分して解いていく時系列解析法がよく用いられる。

- (i) 係留系の反力特性が線型とみなせない
 - (ii) 不規則波の変動漂流力を取り入れ易い
 - (iii) 風・潮流・粘性減衰の影響を考慮し易い
- 一般に用いられる浮体の運動方程式は次式のようなものである。

$$M_i \ddot{x}_i + \sum_{j=1}^6 (a_{ij} \ddot{x}_j + b_{ij} \dot{x}_j + V_{ij} | \dot{x}_j | \dot{x}_j) + C_i(\mathbf{x}) + R_i(\mathbf{x}) = F_i^{(1)}(t) + F_i^{(2)}(t) \quad (i=1, 2, \dots, 6) \dots\dots\dots (1)$$

ここに M_i は浮体の質量 (あるいは慣性モーメント), a_{ij} , b_{ij} はそれぞれ付加質量および造波減衰係数であり、浮体が静水中を運動するときに受ける造波抵抗力を表現したものである。また V_{ij} は粘性減衰係数, C_i は静水反力, R_i は係留系からの反力 ($\mathbf{x}$ は運動ベクトル) であり、これらの項は一般に非線型項である。また $F_i^{(1)}(t)$, $F_i^{(2)}(t)$ は外力項で、 $F_i^{(1)}(t)$ は1次の波力 (波浪強制力), $F_i^{(2)}(t)$ は2次の波力 (変動漂流力) である。

式 (1) を用いて時系列解析を行なう際の問題点としては

[A] a_{ij} , b_{ij} は一般に浮体の運動周波数の関数として与えられるものであるが、不規則波中での動揺あるいは非線型な系に係留された浮体の動揺は周期的でないためどの周波数の値を採用すればよいのか?

[B] 浮体が岸壁前面にあるような場合, a_{ij} , b_{ij} に及ぼす岸壁境界の影響はどう考慮すればよいのか?

[C] V_{ij} は通常自由振動実験等水理実験によって決められるが、不規則に動揺する浮体にそのまま適用してよいのか、また連成の影響は無視してよいのか?

[D] 変動漂流力と呼ばれる2次の波力 $F_i^{(2)}(t)$ はどのように与えればよいのか、また運動との相互干渉の影響を含む $F_i^{(2)}(t)$ を外力項として式 (1) の右辺においてよいのか?

などが考えられる。

問題点 [A] については Cummins¹⁾ によって提案された時間領域での運動方程式 (2) を用いることにより解決する。

$$M_i \ddot{x}_i + \sum_{j=1}^6 \left(m_{ij} \ddot{x}_j + \int_{-\infty}^t K_{ij}(t-\tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau + V_{ij} | \dot{x}_j | \dot{x}_j \right) + C_i(\mathbf{x}) + R_i(\mathbf{x}) = F_i^{(1)}(t) + F_i^{(2)}(t) \dots\dots\dots (2)$$

ここに $K_{ij}(t)$ は遅延関数あるいはメモリー影響関数と呼ばれるものであり、 m_{ij} は周波数に依存しない付加質量である。これらは周波数の関数として与えられる付加質量 $a_{ij}(\omega)$ および減衰係数 $b_{ij}(\omega)$ により次式で与えられる。

$$K_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b_{ij}(\omega) \cos \omega t d\omega \dots\dots\dots (3)$$

$$m_{ij} = a_{ij}(\infty) = a_{ij}(\omega') + \frac{1}{\omega'} \int_0^{\infty} K_{ij}(t) \sin \omega' t dt \dots\dots\dots (4)$$

(ω' は任意で m_{ij} は ω' によらず一定)

式 (1) と式 (2) を比較すると、式 (2) 中の各項の係数は運動の周波数には依存しないが、Convolution の項に現われているように過去の運動履歴の影響を受けることがわかる。したがって計算では時間ステップ毎にこの積分を実行しなければならず、計算時間が長くなる欠点がある。

本研究は式 (1), (2) 中の各項の係数のうち特に波による流体力に着目し、その特性をまず明らかにした後、前述 [A]~[D] の問題点について若干の検討を加えたものである。またこれらの考察の一部は水理実験により検証した。流体力の算定には単純化と計算の容易さのために2次元の矩形断面浮体を対象とし、井島ら²⁾ によって提案された計算手法を用いた。水理実験は3次元浮体 (箱船) について行ない、著者らが既に示している計算手法を拡張して行なった計算結果と比較した。

2. 造波抵抗力係数 ($a_{ij}(\omega)$, $b_{ij}(\omega)$, $K_{ij}(t)$) について

本節では造波抵抗力を表わす係数である付加質量

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 大阪大学助手 工学部土木工学科

$a_{ij}(\omega)$, 減衰係数 $b_{ij}(\omega)$, 遅延関数 $K_{ij}(t)$ の特性およびそれらに及ぼす岸壁の影響について述べる. 井島の方法を用いた流体力の算定方法については文献 3) に示したのでここでは省略する. 計算対象とした 2 次元矩形断面浮体の諸元は 図-1 に示す通りで, $q=0.5$, $l/h=0.5$, $\bar{z}_0/h=-0.75q$, 慣性モーメント $I=2/3 M l^2$ ($M=2\rho g q h l$) とした. 計算は岸壁のないケース (以下 Open と呼ぶ) および岸壁のある場合 (以下 Solid と呼ぶ) で離岸距離を変えた 3 ケース ($p=1.5, 3.0, 5.0$) について行なった. 以下, 運動モードのうち Roll についての計算結果をもとに考察を進める.

造波抵抗力係数の特性を検討するのに浮体の運動および波浪強制力を用いるので, 図-2 に Roll の運動を, 図-3 に Roll の波浪強制力 (モーメント) の振幅 $|M^{(1)}|$ を示しておく. 図中 a は入射波の振幅であり, 横軸は波

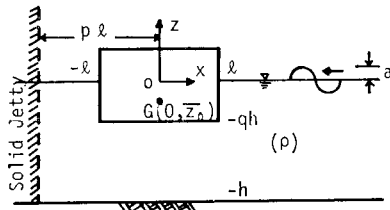


図-1 流体力算定に用いた 2 次元浮体

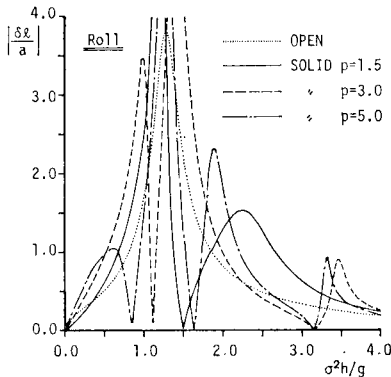


図-2 Roll 運動の周波数応答

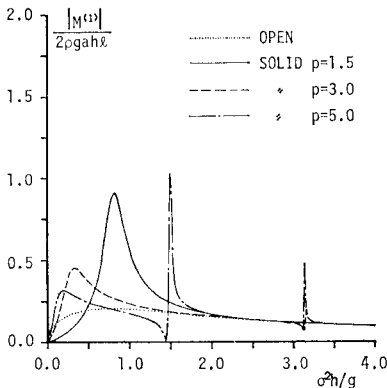


図-3 Roll モーメントの周波数応答

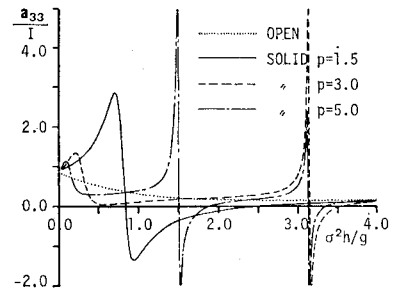


図-4 Roll の付加質量

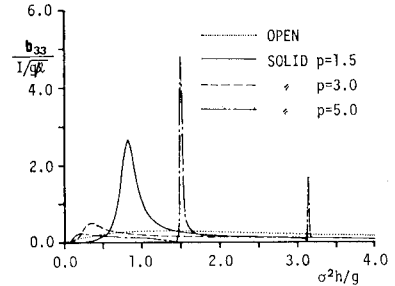


図-5 Roll の減衰係数

の周波数 σ を無次元表示している. この浮体の Roll の固有周波数は $\sigma^2 h/g=1.2$ 付近に存在しており, 岸壁がある場合には複数個のピークがあらわれている. また波浪強制力については離岸距離が小さいものほどピーク値が大きく, 離岸距離が大きくなると浮体と岸壁との間で波の共振が発生する周波数付近を除いては Open の応答特性に近づいていく.

図-4 および 図-5 には Roll の付加質量 a_{33} および減衰係数 b_{33} を示している. これより, Open についてはこれらの係数の周波数による変動はあまり大きくないが, Solid の場合, 特に離岸距離が小さい場合には変動が大きく, 負の付加質量が現われる周波数帯も存在することがわかる. したがって岸壁前面に係留された船に対して, ある特定の周波数に対応する係数を用いて式 (1) を解く方法では, どの周波数の値を採用するかによって得られる結果が大きく異なることが予想される. しかしながらこの図からはこれらの係数がどの程度浮体の運動に影響を及ぼしているのかを定量的に評価することはできない. そこでここでは, 付加質量と減衰係数はあくまでも造波抵抗力の 1 つの表現方法にすぎないことに着目して, 付加質量による力 $-a_{ij}\ddot{x}_j$ および減衰係数による力 $-b_{ij}\dot{x}_j$ と波浪強制力 $F_i^{(1)}$ の比すなわち,

$$A_{ij} = \frac{|-a_{ij}\ddot{x}_j|}{|F_i^{(1)}|}, \quad B_{ij} = \frac{|-b_{ij}\dot{x}_j|}{|F_i^{(1)}|}$$

によってこれらの係数の影響度を評価することを考える.

図-6, 図-7 に Roll に対する波力比 A_{33}, B_{33} を示す. 図より両者とも運動の固有周波数付近で大きな値を

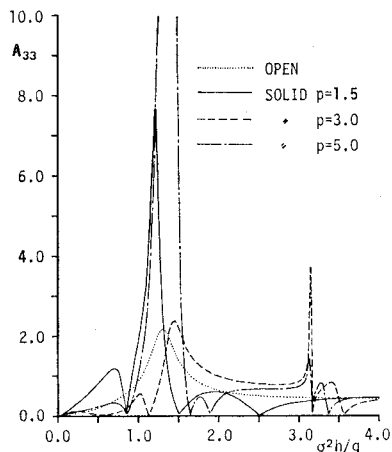


図-6 波力として評価した付加質量 (Roll)

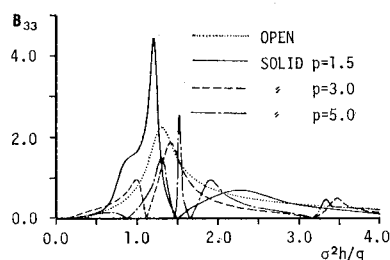


図-7 波力として評価した減衰係数 (Roll)

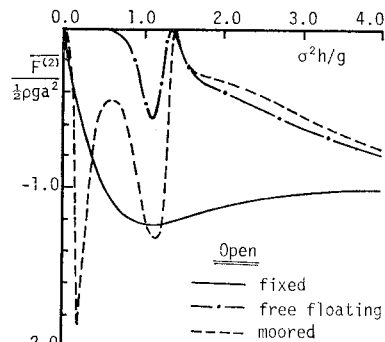
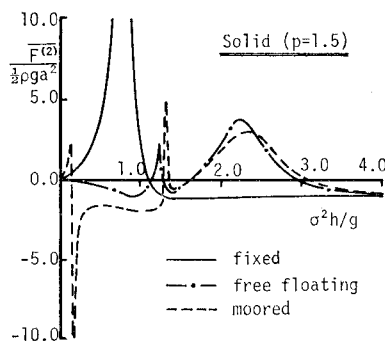
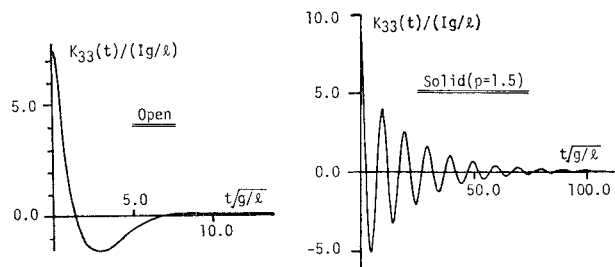


図-9 定常漂流力の周波数応答 (Open)

図-10 定常漂流力の周波数応答 (Solid, $p=1.5$)

示しており、波浪強制力 $F_{ij}^{(1)}(t)$ の数倍にまで達していることがわかる。このことは、固有周波数付近、すなわち運動が大きくなる周波数領域では付加質量や減衰係数による造波抵抗力の運動に及ぼす寄与が大きいことを意味している。したがって式 (1) を用いて時系列解析を行なう場合には、固有周波数付近の造波抵抗係数を用いる方が計算による推定の誤差を小さくすることができるかと推論される。

図-8 には $a_{ij}(\omega)$, $b_{ij}(\omega)$ を用いて式 (3) より計算した Roll の遅延関数 $K_{33}(t)$ を Open および Solid ($p=1.5$) の場合について示している。 $K_{ij}(t)$ は $t=0$ における単位インパルスの運動によって発生した波による、浮体に及ぼす力の時間的変化を表現していると考えてよいが、Open の場合には波が浮体の両側へ発散していくため影響の継続時間は短く、Solid の場合には岸壁からの反射

図-8 遅延関数 $K_{33}(t)$

波によって影響が長く続くことがうかがえる。したがって式 (2) を用いる計算では Solid の場合に長い計算時間を要することになる。

3. 定常漂流力の特性について

不規則波に対する船体運動計算において変動漂流力を考慮する場合には、最も簡単でしかも比較的精度がよいとされている Hsu⁴⁾ の方法が用いられることが多い。この方法は、不規則波を半波長毎に周期および波高の変化する規則波の連りとみなし、半波長毎に規則波の漂流力(定常漂流力)をあてはめてその時間変化を変動漂流力として取扱う方法である。本節ではこの際用いられる定常漂流力の周波数特性および浮体の拘束条件による差異について述べる。図-9 および 図-10 はそれぞれ Open と Solid ($p=1.5$) の場合の定常漂流力 $\bar{F}^{(2)}$ (Sway 方向)

の周波数応答を示したもので、図中線の種類は浮体を固定した場合(実線)、自由浮体の場合(一点鎖線)および係留浮体の場合(破線、ただしこれは Sway にも変位に比例する反力を与えたもので、Sway の固有周波数は $\sigma^2 h/g=0.2$ 付近に存在している)を表わしている。これより、Solid では Open よりも漂流力の最大値は大きく、浮体を岸壁から遠ざける方向(波の進行方向とは逆方向)に漂流力が働く周波数域が存在することがわ

かる。また浮体の拘束条件によって漂流力の周波数応答特性は大きく変化し、係留した場合には Sway の固有周波数付近で大きな値をとる。このことは漂流力が浮体の運動の影響を強く受けることを示しており、したがって前述したように漂流力を外力項として、運動と切り離れた形で式(1)の右边におくことはできないことがわかる。しかしながら、変動漂流力による浮体の長周期運動が変動漂流力に及ぼす影響を無視できるならば、浮体の拘束条件にみあった定常漂流力を用いればよい。

4. 水理実験による検証

(1) 実験装置および方法

実験は図-11に示す平面水槽を用いて岸壁前面の係留浮体について行なった。まず模型船、岸壁のない状態で不規則波を発生させ、図中の波高計により水位変動を測定した。次に岸壁および模型船(240 cm × 45.5 cm × 30 cm, 喫水 9.3 cm, 重量 93 kgw)の鉄製矩形浮体を線型ばねで係留)を設置し、波を測定したときと全く同じ条件で不規則波を発生させ、6自由度船体運動測定装置により運動を測定した。ただしこの場合浮体は正横より波を受けるため、運動モードは Sway, Heave, Roll の3種類である。図-12に用いた不規則波のスペクトルを示す。図中 f_{sw} , f_{ro} , f_{he} はそれぞれ自由振動実験によって求めた Sway, Roll, Heave の自由振動周波数である。

(2) 計算結果および考察

計算は著者の一人らが文献5)で示した一様直線岸壁前面の3次元浮体に対する計算手法により求めた各種流

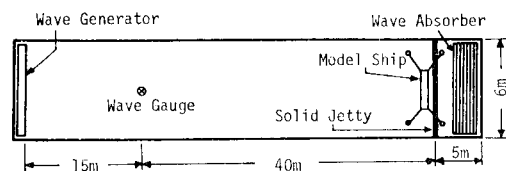


図-11 実験水槽および模型船

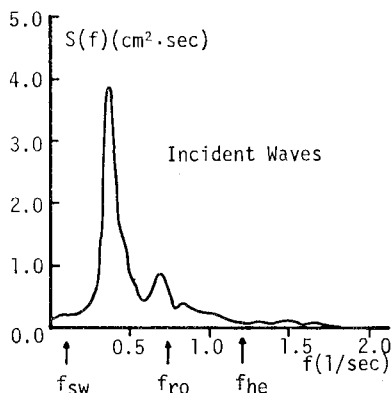


図-12 入射波スペクトル

体力係数を用いて行なった。時系列解析には式(1)の定数係数の運動方程式および式(2)の Cummins の運動方程式の2つを用いた。

図-13は実験および粘性減衰を無視した計算による。Rollの運動応答スペクトルを示したものである。図中実線は実験値を、点線は Cummins の運動方程式を用いた計算結果(Cal-1)を、破線は不規則波スペクトルのピーク周波数である $f=0.38$ Hz に対応する付加質量と減衰係数を用いて式(1)により計算した結果(Cal-2)を示している。また一点鎖線は、Swayの運動による造波抵抗力係数(連成項も含む)については Swayの固有周波数にはほぼ対応する 0.17 Hz, Rollの運動による係数については Rollの固有周波数である 0.73 Hz, Heaveについては固有周波数付近の波のエネルギーが小さいことより波のピーク周波数の 0.38 Hz にそれぞれ対応する付加質量および減衰係数を用いた計算結果(Cal-3)を示している。この場合、Rollの固有周波数(0.73 Hz)での減衰係数の大きさは波のピーク周波数(0.38 Hz)のその約2倍であった。また付加質量についてはいずれの場合も無視できる程度であった。

図より、Rollの固有周波数付近で計算値はいずれも実験値よりも大きな値を示しており、特に Cal-2 についてはその差が著しい。また Cal-3 では Rollの固有周波数

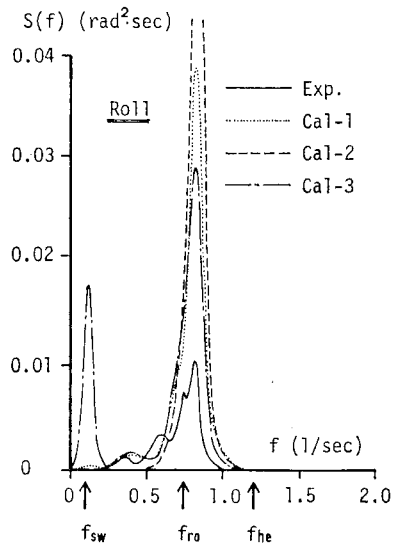


図-13 運動応答スペクトル (Roll)

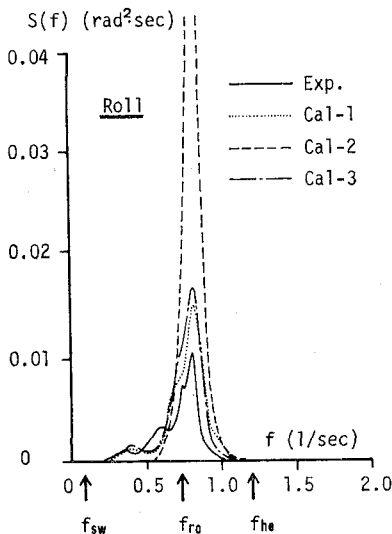
表-1 運動の代表値の比較

	Exp.	No-Damp.			Damp.		
		Cal-1	Cal-2	Cal-3	Cal-1	Cal-2	Cal-3
$\hat{\sigma}_{max}$	0.25	0.52	0.91	0.53	0.40	0.68	0.44
$\hat{\sigma}_{1/3}$	0.13	0.28	0.80	0.28	0.22	0.34	0.23
$\hat{\sigma}$	0.12	0.19	0.35	0.19	0.13	0.23	0.14

付近のスペクトル形は Cal-1 に類似しており、固有周波数の造波抵抗力係数を用いた効果が現われている。ただし Sway の固有周波数付近にみられるピークについてはその発生原因は不明である。表—1 にこの場合の Roll の運動振幅（波の場合の波高に相当する値）の最大値 $\delta_{\max}$ 、1/3 最大平均値 $\delta_{1/3}$ および平均値 $\bar{\delta}$ を示している (No-Damp. の欄)。スペクトル形からも予想されるように、これら運動の代表値はいずれも実験値よりも大きく、Cal-1 と Cal-3 の値はほとんど等しい。そして Cal-2 についてはかなり大きな値を示している。

次に粘性減衰を計算に取り入れた結果を以下に述べる。ここでは粘性減衰の項 $V_{ij}(\dot{x}_i, \dot{x}_j)$ を $V_{ij}\dot{x}_i$ のように線型近似し、自由振動実験より得られる減衰振動曲線から求めた減衰係数と造波による減衰係数 $b(\omega_n)$ (ω_n は固有周波数 との残差を V_{ij} とした。ただし Heave については算定が難しかったため考慮しておらず、連成項についても無視している。この場合の Roll の粘性減衰係数、 V_{33} は造波減衰係数 $b_{33}(\omega_n)$ のおよそ 2 倍であった。図—14 は粘性減衰を考慮した場合の応答スペクトルである。Cal-1 および Cal-3 については実験値にかなり近い値を示しているが、Cal-2 については依然大きなピークを有している。また表—1 の運動の代表値は、Cal-1 および Cal-3 の場合、最大値は実験値より大きいが平均値については実験値とほぼ等しくなっている。

以上の結果より、Cummins の運動方程式を用いた計算において自由振動実験より求めた粘性減衰係数を取り入れれば不規則波中の Roll の運動がその平均値についてはほぼ予測可能であることが判った。また定数係数の運動方程式を用いる場合には固有周波数付近の造波抵抗力係数を用いる方がよく、不規則波のピーク周波数付近の値を用いる方法では定量的な予測が難しい。



図—14 粘性減衰を考慮した運動応答スペクトル (Roll)

5. 結 び

本論文では不規則波に対する船体運動の予測手法としてよく用いられている時系列解析法をとりあげ、計算に用いる造波抵抗力係数および定常漂流力の特性を調べるにより計算手法に対する問題点を指摘した。またそれらの問題点について若干の検討を行ない、その一部を水理実験により検証した。最後に得られた結果をまとめるとともに今後続く問題点を列挙して結びとする。

(1) 定数係数の運動方程式を用いる方法では、造波抵抗力係数の周波数による変動が大きい岸壁係留された船に対して、どの周波数の値を用いれよいか問題である。ただし Roll のように固有周波数付近で顕著な応答を示すモードについては、固有周波数に対応する係数を用いることによってある程度解決すると思われる。しかし、非線型係留された場合の Sway など、固有周波数のはっきりしない運動モードについては明確な指針を与えることはできない。

(2) Cummins の運動方程式を用い粘性減衰を考慮することによって、Roll 運動の応答スペクトルの形状および平均運動振幅についてはほぼ予測が可能である。しかし運動の最大値については実験の方がかなり小さく現われる。この理由としては計算の際に波のスペクトルより作る水位変動の時系列の実験との違いも考えられるが、やはり粘性減衰係数の与え方に問題があり、さらに検討する必要があると思われる。

(3) 定常漂流力の周波数応答特性は岸壁の有無はもちろん、船体の拘束条件すなわち船体運動によって大きく異なるため、不規則波中での変動漂流力を算定する際には十分注意しなければならない。特に非線型係留された浮体に対する漂流力の算定方法の開発は今後の課題である。今回の実験においても Sway に大振幅の長周期動揺がみられたが、今後は長周期運動に対する粘性の効果の解明と並行して変動漂流力について研究を続ける予定である。

参 考 文 献

- 1) Cummins, W. E.: The impulse response function and ship motions, Schiffstechnik, Bd. 9, Heft 47, pp. 101~109, 1962.
- 2) 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浮体の運動と波の変形，土木学会論文報告集第 202 号，pp. 33~48, 1972.
- 3) 榎木 亨・青木伸一：浮体に及ぼす波による流体力について，第 10 回海洋開発シンポジウム論文集，1985.
- 4) Hsu, F. A. and K. A. Blenkarn: Analysis of peak mooring forces by slow vessel drift oscillations in random seas, Paper OTC 1159, 1970.
- 5) 榎木 亨・久保雅義：荷役限界からみた港内静穏度に関する研究，第 27 回海岸工学講演会論文集，pp. 307~311, 1980.