

岸壁前面係留浮体の遅延関数を用いた時系列解析の 精度向上に関する研究

久保 雅 義*・岡 本 俊 策**

1. 緒 言

東京湾の湾岸道路や大阪湾の関西新空港などによる埋立てにより台風時の港外避泊水面が狭小化しているため、船舶の港内避泊が運輸省によって検討されている。港内係留船の船体運動は岸壁前面での三次元浮体運動として扱われるべきであり、さらに周波数依存の流体力係数を用いた運動方程式による計算よりも、遅延関数を用いた時系列解析の方が有効と考えられる。しかしながら岸壁前面での船体運動を遅延関数を用いて時系列解析を行なった例^{1),2)}は少なく、計算精度も十分ではない。この論文では、この計算精度向上のための検討を行なっている。

2. 流体力係数について

2.1 計算方法

a) 時間領域での浮体の運動方程式

計算及び実験は、図-1 に示す直線岸壁前面に対称係留した矩形断面浮体を用いている。時間領域での浮体の運動方程式とその係数は次式で示される。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^6 \{M_{ij} + m_{ij}(\infty)\} \ddot{x}_i(t) \\ & + \sum_{i=1}^6 \int_{-\infty}^t \dot{x}_i(\tau) L_{ij}(t-\tau) d\tau \\ & + \sum_{i=1}^6 (C_{ij} + G_{ij}) x_i(t) = F_j, \dots\dots\dots (1) \\ & (j=1, 2, \dots, 6) \end{aligned}$$

$$L_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} B_{ij}(\omega) \cos \omega t d\omega, \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{aligned} m_{ij}(\infty) &= A_{ij}(\omega) \\ &+ \frac{1}{\omega} \int_0^{\infty} L_{ij}(t) \sin \omega t dt, \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに、 M_{ij} : 浮体の質量及び慣性モーメント、 $m_{ij}(\infty)$: 不変付加質量及び不変付加慣性モーメント、 $L_{ij}(t)$: 遅延関数、 C_{ij} : 復原力係数、 G_{ij} : 係留力係数、 F_j : 外力、 t : 時間、 τ : 積分変数、 $A_{ij}(\omega)$: 角周波数 ω に対応した付加質量及び付加慣性モーメント、そして $B_{ij}(\omega)$:

角周波数 ω に対応した減衰係数である。添字 i 及び j は船体運動の運動モードを示し、1: Sway, 2: Surge, 3: Heave, 4: Pitch, 5: Roll, そして 6: Yaw である。添字 ij は j モードの運動により i モードの運動に生じる係数であることを示す。

以上より、付加質量及び付加慣性モーメント（以下まとめて付加質量とよぶ）と減衰係数の角周波数特性を求めれば、運動方程式の係数が決定される。

b) 付加質量と減衰係数の計算について

付加質量と減衰係数はグリーン関数法により求める。この時、必要とする角周波数領域内で計算点間隔は少なくとも波長の 1/4 以下になるように計算を行なう必要がある。連成項は図-1 に示すモデルの場合、船型の対称性と反射波の影響により表-1 に示す 18 個が存在することになる。そして、連成流体力係数の相反関係より $A_{ij}(\omega) = A_{ji}(\omega)$ と $B_{ij}(\omega) = B_{ji}(\omega)$ を確認することで、その数はさらに 12 個まで減らすことができる。

c) 遅延関数の計算について

遅延関数を求めるには式 (2) より、全周波数領域にわたる減衰係数が必要となり、波長との関係から定めた有効角周波数より高周波数領域では減衰係数を近似する必要がある。この近似は 2 次元の場合、高木、斎藤³⁾の結果を用いて次式で示される。

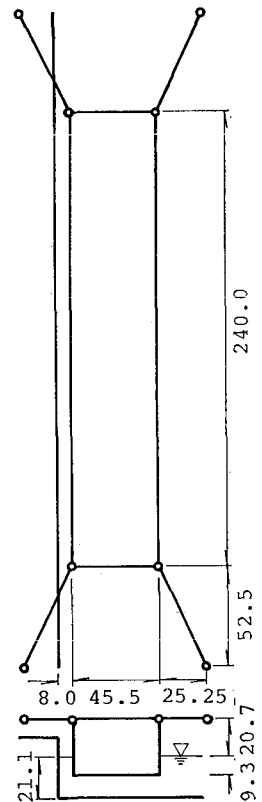


図-1 使用モデル
(単位: cm)

* 正会員 工博 神戸商船大学助教授 船貨輸送研究施設
** 技研興業株式会社 開発部

表-1 各運動モード間の連成

$j \backslash i$		1	2	3	4	5	6
		Sway	Surge	Heave	Pitch	Roll	Yaw
1	Sway	○	×	○	×	○	×
2	Surge	×	○	×	○	×	○
3	Heave	○	×	○	×	○	×
4	Pitch	×	○	×	○	×	○
5	Roll	○	×	○	×	○	×
6	Yaw	×	○	×	○	×	○

○…連成有 ×…連成無

$$B_{ij}(\omega) = k_{ij}\omega^{-n}, \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 k_{ij} ：減衰係数の計算値と近似式を接続するための係数、 n ：乗数である。3次元の場合もこれと同様とみなし、表-2に示す n の値を与えている。

以上より遅延関数は式(2)と(4)より次式で示される。

$$L_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \left\{ \int_0^{\omega_e} B_{ij}(\omega) \cos \omega t d\omega + k_{ij} \int_{\omega_e}^{\infty} \omega^{-n} \cos \omega t d\omega \right\}, \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 ω_e ：最大有効角周波数である。この右辺第2項を部分積分と余弦積分を用いて解くことで、全周波数領域にわたる解析積分を行なう。

d) 不変付加質量の計算について

不変付加質量を求めるにも式(3)より、遅延関数が時間無限大まで必要となる。一方、遅延関数が減衰振動の形をとることから、次式で近似することを考える。

$$L_{ij}(t) = r e^{-pt} \cos(qt + \varepsilon), \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 r, p, q, ε ：任意の定数である。又、減衰係数が式(2)にフーリエ逆変換式を用いることで、

$$B_{ij}(\omega) = \int_0^{\infty} L_{ij}(t) \cos \omega t dt, \dots\dots\dots(7)$$

となり、この式に式(6)を代入して部分積分を行なうと、

$$B_{ij}(\omega) = \frac{r}{2} \left\{ \frac{p \cos \varepsilon - (q + \omega) \sin \varepsilon}{p^2 + (q + \omega)^2} + \frac{p \cos \varepsilon - (q - \omega) \sin \varepsilon}{p^2 + (q - \omega)^2} \right\}, \dots\dots\dots(8)$$

と表わせる。定数 r, p, q, ε は式(6)と(8)より求められた値と、数値計算による値との比較より決定する。これら決定された定数と式(3)において積分計算を打ち切る時間 t_e を用いて、積分打ち切りにより生じる誤差 S_p を次式で定義する。

$$S_p = \frac{\frac{r}{\omega} \int_{t_e}^{\infty} e^{-pt} \cos(qt + \varepsilon) \sin \omega t dt}{A_{ij}(\omega) + \frac{1}{\omega} \int_0^{t_e} L_{ij}(t) \sin \omega t dt}, \dots\dots\dots(9)$$

この式の分母、分子は全て積分可能なので、十分に精度を確保できる t_e を決定する。式(3)において時間 t_e までの積分を行なうことで、不変付加質量を求める。

表-2 式(4)における乗数 n の値

$j \backslash i$		1	2	3	4	5	6
		Sway	Surge	Heave	Pitch	Roll	Yaw
1	Sway	3	/	5	/	5	/
2	Surge	/	3	/	5	/	3
3	Heave	5	/	7	/	7	/
4	Pitch	/	5	/	7	/	5
5	Roll	5	/	7	/	7	/
6	Yaw	/	3	/	5	/	3

2.2 イレギュラー周波数について

グリーン関数法により付加質量と減衰係数を計算する時、イレギュラー周波数の発生が問題となる。これは、船体内部の仮想的水面にできる固有振動に対応する周波数であり、数値計算は不可能となる⁴⁾。今回は船幅の2倍の波長を持つ周波数において、Sway, Heave, Rollに関する項が、著しく不連続な値を示すことが確認され、この周波数が上記のイレギュラー周波数であると考えられる。そこでこの周波数での付加質量と減衰係数の値は、この前後の周波数での値で平滑化を行なうことにより得られた値を用いている。

2.3 計算結果

a) 付加質量と減衰係数の計算結果について

計算点間隔は最大有効角周波数 $\omega_e = 10.0 \text{ (sec}^{-1}\text{)}$ となるように定めた。連成流体力係数の相反関係を確認するために、 $i=1, j=5$ と $i=5, j=1$ の場合の付加質量と減衰係数のイレギュラー周波数における補正前の結果を図-2に示す。 $i < j$ の場合が点線、 $i > j$ の場合を破線、両者の平均が実線である。図に示された様に、両者はほぼ一致するものの若干の差異が見られるので、以降 $i \neq j$ の場合には両者の平均値を使用している。又、角周波数 $\omega = 7.9 \text{ (sec}^{-1}\text{)}$ で著しく不連続な値を示し、ここがイレギュラー周波数と考えられる。特に減衰係数はこの周波

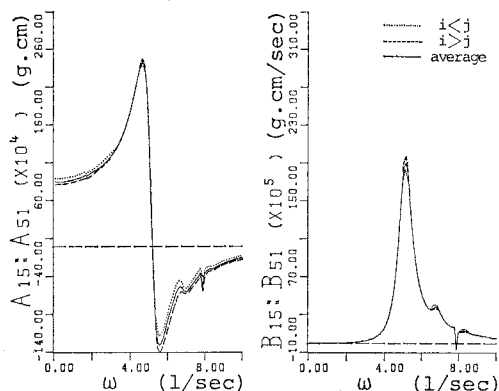


図-2 補正前の付加質量と減衰係数

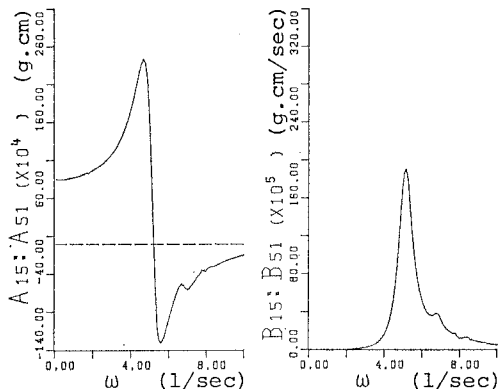


図-3 補正後の付加質量と減衰係数

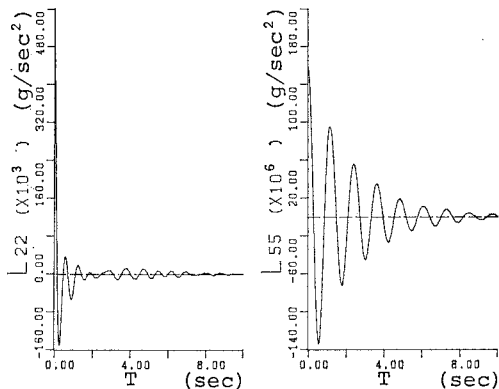


図-5 遅延関数

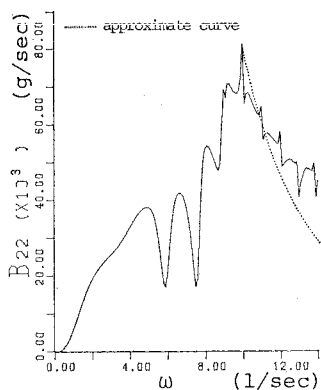


図-4 減衰係数の高周波数近似

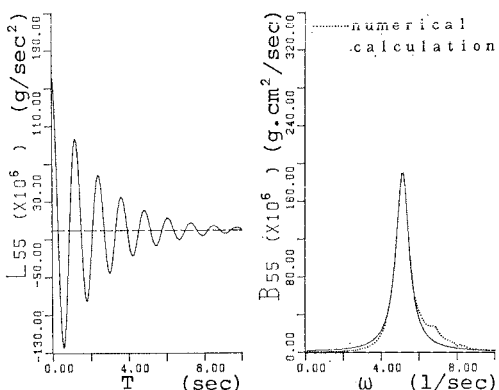


図-6 近似による遅延関数と減衰係数

数においてのみ負の値となるため、計算は発散する。そこで図-3にこれ以降に用いる補正後の値を示す。

b) 遅延関数の計算結果について

式(4)による $B_{22}(\omega)$ の高周波数近似の結果を図-4に示す。図中の点線が近似曲線である。計算点間隔を $1/2$ に狭めることで有効となった角周波数 ω $10.0 \sim 14.0$ (sec^{-1}) の値も示し、収束傾向を確認することで近似の妥当性を示した。 $B_{22}(\omega)$ の収束傾向の確認で、全ての減衰係数の高周波数領域での収束傾向を確認した。

次に式(5)を用いた遅延関数の結果として、 $L_{22}(t)$ と $L_{55}(t)$ を図-5に示す。

c) 不変付加質量の計算結果について

t_e を決定する作業は、 $i=5$, $j=5$ について行なったので、以下このケースについて記す。式(6)と(8)による遅延関数と減衰係数の近似結果を図-6に示す。点線は数値計算による減衰係数の結果で、この時 $r=1.6 \times 10^8 (\text{g/sec}^2)$, $p=0.416 (\text{sec}^{-1})$, $q=5.153 (\text{sec}^{-1})$, $\epsilon=0$ である。これらの定数を用いて t_e と S_p の関係を示したのが図-7である。 $t_e=20$ 秒で S_p は 0.01 より小さくなっているので、精度確保のため余裕をみて $t_e=60$ 秒とした。

次にこの t_e を用いて不変付加質量を求めた結果が図-8である。太線が角周波数 ω に対応した不変付加質量の値、細線がそれらの平均値、点線が角周波数 ω に対応した付加質量の値を示す。角周波数に対する不変付加質量の不変性がよく示された結果と判断される。

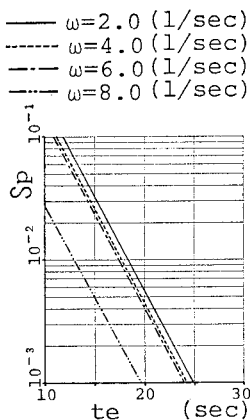
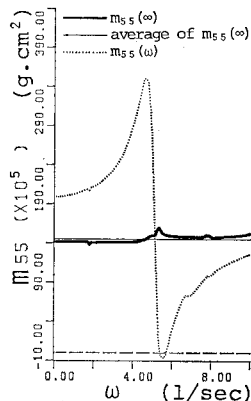
図-7 t_e と S_p の関数

図-8 不変付加質量

3. 時系列解析について

3.1 計算方法

これまでに求めた係数を用いて、式(1)を時間ステップ毎に計算して時系列解析を行なうのであるが、以下のことに注意する必要がある。

a) 固有周期について

付加質量と減衰係数を求める時に使用したポテンシャル論では粘性項が与えられないため、各運動モードの固有周期付近では運動振幅が大きくなることで、振幅を過大評価することになる。故に各運動モードの固有周期を求め、使用する波の周期範囲に存在するかを調べる必要がある。これは式(1)で外力を0とし、各運動モードのみに初期変位を与えて自由振動を起こすことで得られる。

b) 粘性項の導入について

各運動モードの固有周期における数値計算による運動振幅の値を実験値と比較することで決定する係数 N_i を用いて、式(1)の左辺第2項に $N_i \dot{x}_i(t)$ の形で粘性項を加えることで、計算の補正を行なう。

3.2 計算結果

a) 固有周期の計算結果について

自由振動の結果を図-9に示す。各固有周期は、Sway : 10.1秒, Surge : 3.8秒, Heave : 0.8秒, Pitch : 0.8秒, Roll : 1.4秒, Yaw : 9.6秒である。

b) 横波の場合の計算結果

周期0.6~2.4秒の範囲の波について計算を行ない、実験値との比較をしている。この範囲に固有周期を持つ Heave と Roll に関して粘性項を加えており、粘性項を加えた自由振動を実験値と比較したものが図-10である。縦軸 α は初期変位を1とした振幅比を示す。Heave については減衰が一定でなく比較は難しい。Roll については第1波と第2波の対数減衰率 2^{th} を比べると、計

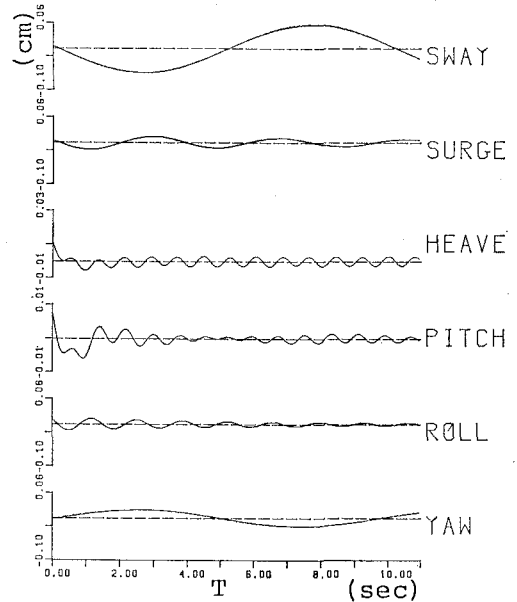


図-9 各運動モードの自由振動

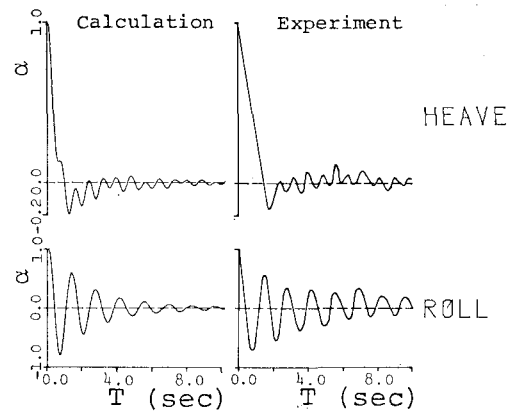


図-10 粘性項を加えた自由振動と実験値

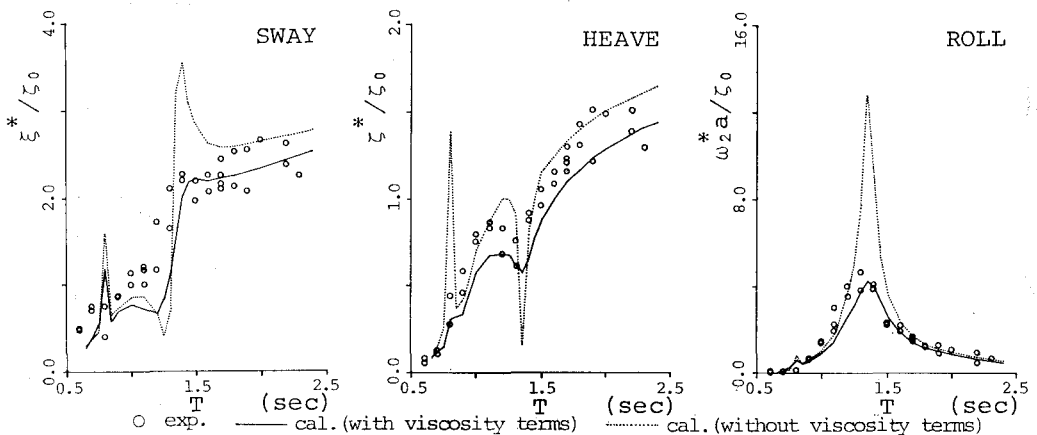


図-11 横波の場合の実験値と計算値

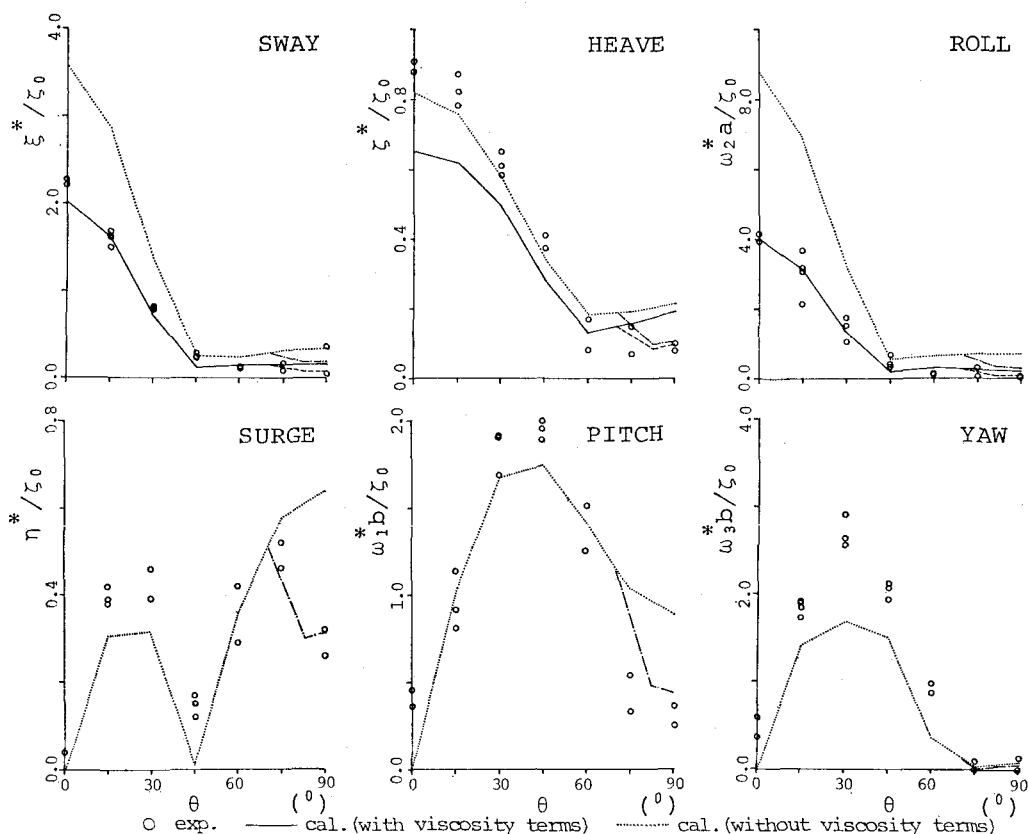


図-12 周期 1.4 秒の波について入射角 θ を変えた場合の実験値と計算値

算値で $\lambda=0.58$, 実験値で $\lambda=0.26$ となり, 運動速度に比例する形では実際より大きい粘性を入れねばならず, この意味で以後は速度の 2 乗に比例する形を用いる方が妥当と考えられる。

粘性項の有無による計算値と実験値を図-11に示す。縦軸は振幅増幅率を示し, ξ^* , ζ^* , ω^* は各々, Sway, Heave, Roll の変位と回転の複素振幅であり, ζ_0 は波高, a は船幅の 1/2 を示す。Sway と Roll については, 補正の効果が確認できるが, Heave に関しては, 固有周期とイレギュラー周波数がほぼ一致する影響で, 固有周期以外では補正が効き過ぎる傾向がある。

c) 斜波の場合の計算結果

入射角 θ を変えた場合の結果が図-12である。縦軸は振幅増幅率で, 横軸は波の入射角で横波の場合が $\theta=0^\circ$ である。 η^* , ω_1^* , ω_3^* は各々 Surge, Pitch, Yaw の複素振幅であり, b は船長の 1/2 を示し, その他は図-11と同様である。又, Surge, Pitch, Yaw についてはどのモードも周期 1.4 秒と固有周期が重ならないので, 粘性項は考慮していない。図中の破線と一点鎖線は θ が大きくなった場合に, 有限長直線岸壁を考慮して補正を行なったものである⁶⁾。Sway と Roll 以外のモードに関しては多少誤差が含まれることがわかる。

4. 結 語

遅延関数及び不変付加質量の計算方法の改善と, 運動方程式への粘性項の導入で, 計算精度が向上することは確認された。しかし, Heave の計算値に誤差が含まれることからのイレギュラー周波数での補正方法の改善, そして, 今回粘性を考慮しなかった運動モードへの粘性項導入の検討などの問題が残されているものと思われる。

参 考 文 献

- 1) 榎木 亨・久保雅義・青木伸一: 係留システムの改善による船体運動および船舶の接岸エネルギーの低減化, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 460~464, 1983.
- 2) Oortmerssen, G. Van: The Motions of a Moored Ship in Waves, Publication No. 510, Netherlands Ship Model Basin, Wageningen, The Netherlands, 1976.
- 3) 高木又男・斎藤公男: 非周期的造波問題の周波数領域での取扱い(第 5 報), 関西造船協会誌, 第 191 号, 1983.
- 4) 元良誠三監修: 船体と海洋構造物の運動学, 成山堂, pp. 66~67, 1982.
- 5) 石原藤次郎・本間 仁編: 応用水理学(下), 丸善, pp. 90~92, 1971.
- 6) 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.