

荷役限界からみた港内静穏度に関する研究 (第2報)

——特に係留方法による——

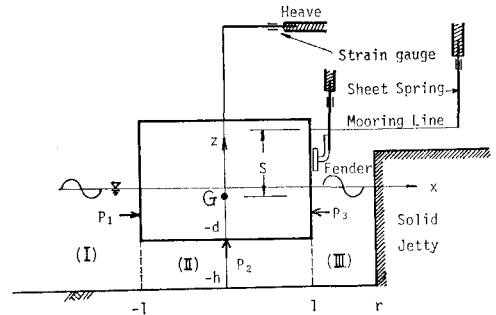
榎 木 亨*・久保雅義**・京谷 光高***

1. 緒 言

外洋に面した港ではうねりの侵入のため、船体運動がはげしくなり、しばしば荷役が中止される。著者らは第1報¹⁾において、荷役ができるか否かは船体運動量によって決められるので、波浪特性、船体運動そして荷役ができるための船体運動の限界値の三者の関係が明らかになれば、荷役ができるための港内静穏度も明らかになることを示した。ところで現在の岸壁係留中の船はフェンダと係留索のバネ定数が著しく異なるため（このような係留法を以下非対称係留と呼ぶことにする）、swaying において subharmonic motion を生じて多くの共振ピークを持つようになり、その結果として港内静穏度を著しく低下させていることが明らかになった。このように多くの共振ピークが生じるのは、フェンダーと係留索のバネ定数が著しく異なりフェンダーの固有周期と係留索の固有周期の間の周期の波に船体運動が共振するためであり、両者のバネ定数が近くなれば共振ピークは一つになるはずである。そこで、今回は係留索の左右のバネ定数を等しくした時（以下対称係留と呼ぶ）、港内静穏度がどの程度改善されるかを明らかにしたので、以下これについて報告する。

2. 実験装置および実験方法

実験は昨年と同じく、屋外平面水槽を用いて行った。屋外での風の影響を除くため水槽の上はベニヤ板で覆われている。模型船は垂線間長 $L=175$ m, 船幅 $B=27.6$ m, 吃水 $d=8.4$ m の実船を 1/60 に縮小し、かつ矩形断面浮体で近似した。そのために模型船は $L_{pp}=2.4$ m, $B=0.45$ m, $d=0.09$ m の大きさをもつ。バネ定数に関してフックの法則が成立するものとする、模型バネ定数は縮尺の2乗に比例せしめなければならない。現地での実測結果に基づくと、フェンダーのバネ定数は $300 \times 5 = 1,500$ ton/m, そして係留索全体のバネ定数は 6.5 ton/m であったので、模型実験ではフェンダーのバ



図—1 岸壁前面の浮体の運動と Heaving および Swaying の測定方法

ネ定数は 4.17 kg/cm, 係留索のバネ定数は 17.4 g/cm となる。このように柔らかいバネ定数を実現するために、著者らは板バネを用いている。図—1 は非対称係留時の実験配置図であるが、図における係留索はほとんど伸縮はなく板バネのみが変位するようになっている。そしてこの板バネにストレーンゲージをはって、その出力より係留索にかかった張力と係留索の位置での水平変位量も求まるように工夫されている。Heaving は図—1 に示すように船の重心 G と板バネを結び板バネにはったストレーンゲージを用いて Heaving の変位量を求めている。Rolling は前回と同じく、板バネふり子を用いて求めた。この場合ふり子の重りを船の重心に一致させることにより、Rolling の接線加速度に対する補正を行わなくてよいようにしている。

3. 対称係留時の船体運動の理論解析

左右より等しいバネ定数で岸壁前面に係留された船が横波を受けた時の船体運動は木原・轟²⁾および井島ら³⁾により提案された矩形断面浮体の理論を用いて解くことができる。詳細は上記の論文にゆずりここでは概略のみを示すことにする。図—1 に示すように、一定水深 h の海域で幅 $2l$, 吃水 d の矩形浮体が振幅 a で角周波数 σ の波のもとに運動する場合を考える。図中の (I) は入射波領域, (II) は浮体底層領域, (III) は反射波領域を表わすものとする。この場合の静止位置から浮体重心の水平、鉛直および回転変位をそれぞれ

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科
 ** 正会員 神戸商船大学助教授 船貨輸送研究施設
 *** 学生会員 大阪大学大学院生 工学部土木工学科

$$xg = \xi e^{i\omega t}, \quad zg = \zeta e^{i\omega t}, \quad \theta = \bar{\theta} e^{i\omega t} \dots (1)$$

とおくと領域 I, II および III の速度ポテンシャルは

$$\left. \begin{aligned} \phi_I &= \{A_0 e^{-ik(x+l)} + B_0 e^{ik(x+l)}\} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \\ &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{k_n(x+l)} \frac{\cos k_n(h+z)}{\cos k_n h} \\ \phi_{II} &= C_0 \frac{x}{l} + D_0 + \sum_{s=1}^{\infty} \left(\frac{C_s}{\sinh \frac{s\pi l}{h-d}} \sinh \frac{s\pi x}{h-d} \right. \\ &\quad \left. + \frac{D_s}{\cosh \frac{s\pi l}{h-d}} \cosh \frac{s\pi x}{h-d} \right) \\ &\quad \times \cos \frac{s\pi}{h-d} (h+z) \\ &\quad - \frac{i\sigma\zeta}{h-d} \left\{ \frac{x^2}{2} - \frac{(h+z)^2}{2} + \frac{(h-d)^2}{6} \right\} \\ &\quad - \frac{i\sigma\theta x}{h-d} \left\{ \frac{x^2}{6} - \frac{(h+z)^2}{2} + \frac{(h-d)^2}{6} \right\} \\ \phi_{III} &= G_0 \frac{\cos k(r-x)}{\cos k(r-l)} \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \\ &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} G_n \frac{\cosh k_n(r-x)}{\cosh k_n(r-l)} \cdot \frac{\cos k_n(h+z)}{\cos k_n h} \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

で与えられる。ここで k および k_n は g を重力加速度とする時、次式で定まる固有値である。

$$\sigma^2 = kg \tanh kh = -k_n g \tan k_n h \dots (3)$$

浮体の運動方程式は水平波力を P_1, P_3 , そして鉛直方向の波力を P_2 , 水平、鉛直および回転の拘束力を R_H, R_V, R_M で表わすと次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} -\sigma^2 M \xi &= P_1 - P_3 + R_H \\ -\sigma^2 M \zeta &= P_2 - 2\rho g l \zeta + R_V \\ -\sigma^2 I_0 \theta &= M_{P1} + M_{P2} + M_{P3} - 2\rho g d l \overline{GM} \theta + R_M \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

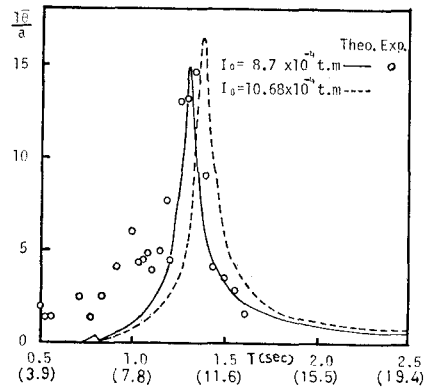
ここで、 M は浮体の質量で $2\rho d l$, I_0 は重心まわりの慣性モーメント, M_{Pi} は波力 P_i によるモーメント, $\overline{GM}$ はメタセンター高さである。

速度ポテンシャルの未知数 $A_0, B_0, A_n, C_0, C_s, D_0, D_s, G_0, G_n$ および船体運動量 ξ, ζ, θ は 図-1 の仮想境界 $x = \pm l$ における境界条件と式 (4) の運動方程式より決定することができる。

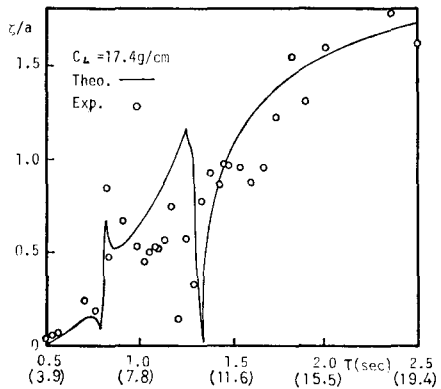
4. 船体運動の解析

(1) ポテンシャル理論と実験結果との比較

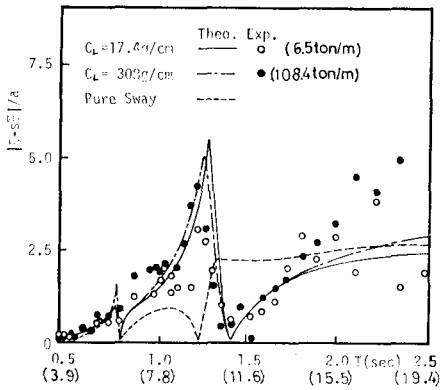
次にポテンシャル論から求めた理論値と実験値の比較を示す。実験では船を左右から 17.4 g/cm の係留索で係留している。図-2 (a) は Rolling における理論と実験との比較を示す。縦軸の a は入射波振幅である。横軸の周期は模型での周期であり、また縮尺を 1/60 とした時の現地での周期を () により表わしている。図-3



(a) Rolling



(b) Heaving



(c) Swaying

図-2 ポテンシャル理論と実験結果の比較

以下ではすべて現地換算の周期を用いる。この場合の慣性モーメント I_0 は船を吊して支点のまわりに振らした時の周期 T_F を用いて、次式より求めている。

$$I_0 = ML \left(\frac{g T_F^2}{4\pi^2} - L \right) \dots (5)$$

ただし L は船の重心と支点との距離を示す。このようにして求めた $I_0 = 10.68 \times 10^{-4} \text{ ton m}^2/\text{m}$ を用いた時の理論値を図-2(a)の点線で示しているが、これを見ると、

実験値と理論値の Peak が合わないのがわかる。同じく図-2 (a) 中の実線は $I_0=8.7 \times 10^{-4} \text{ ton m}^2/\text{m}$ とした時の計算結果である。すなわち、式 (5) より求めた I_0 よりも小さい I_0 を用いる方が、理論と実験がよく合う理由は今の所不明であるが、ここでは便宜的に $I_0=8.7 \times 10^{-4} \text{ ton m}^2/\text{m}$ として以下の計算を行うことにする。

図-2 (b) は Heaving の理論値と実験値を示している。Heaving の自由振動から得られる固有周期は 0.8 sec であり、図-2 (b) にもこれと対応した所に Peak をもつのがわかる。波の周期が 1.3 sec 近くに生じる Peak は Rolling との Coupling のために生じたものであるが、本来の固有周期の所よりも大きな Peak を生じている。この傾向は離岸距離が増すにつれて増大するのが理論と実験の両面からわかった。

図-2 (c) は Swaying の理論と実験結果の比較を示している。図-1 からわかるように係留索から実験的に得られる水平変位は純粋な Swaying 量の他に、Rolling による水平変位も含まれるので、図-2 (c) の Swaying は Rolling と Swaying を含めたもので比較を行っている。ところで図中の点線は理論から求めた Swaying 量そのものを示しているが、実線と点線を比較すると Rolling の共振時 ($T=1.3 \text{ sec}$) には水平変動はほとんど Rolling から成り立っており、Rolling が係留索に及ぼす影響の大きいことがわかる。

以上対称係留の場合についてポテンシャル理論と実験値の比較を行なったが、Rolling の慣性モーメントと減衰係数に多少問題点はあるものの、横波を受ける場合の船体運動はほぼ矩形断面浮体のポテンシャル論で説明できることがわかった。

(2) 係留索のバネ定数の効果について

図-3 は昨年のも非対称係留における Swaying と今回の対称係留の Swaying の振幅増幅率の比較を行なったものである。縦軸の H_i は入射波高を、 Y は Swaying の変位量を示す。これより非対称係留は対称係留の場合よりも振幅増幅率が一桁大きくなっており、対称係留が極めて有利であることがわかる。そこで次に対称係留におけるバネ定数 C_L はどの程度にすればよいかについて考察を行う。バネ定数 C_L が 17.4 g/cm と 308 g/cm (現地でのバネ定数を () 内に示している) の模型における短周期側での Swaying の変化を図-2 (c) に示している。この図によると、係留索のバネ定数の違いは短周期側での Swaying にはほとんど影響しない。一方上記のバネ定数を使用する時の現地換算における長周期側での共振特性を図-4 に示している。この図よりバネ定数の変化にともない長周期の領域ではその共振時の周期に影響を与えていることがわかる。以上より係留索のバネ定数が変化しても短周期側では船体運動量は変化しない。

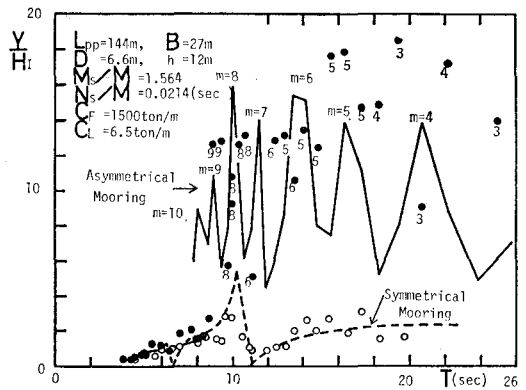


図-3 非対称係留と対称係留の比較

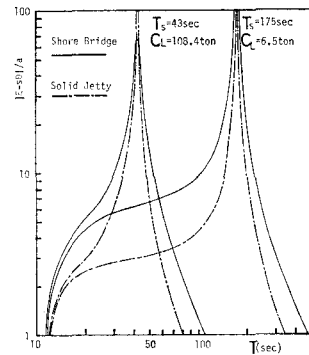
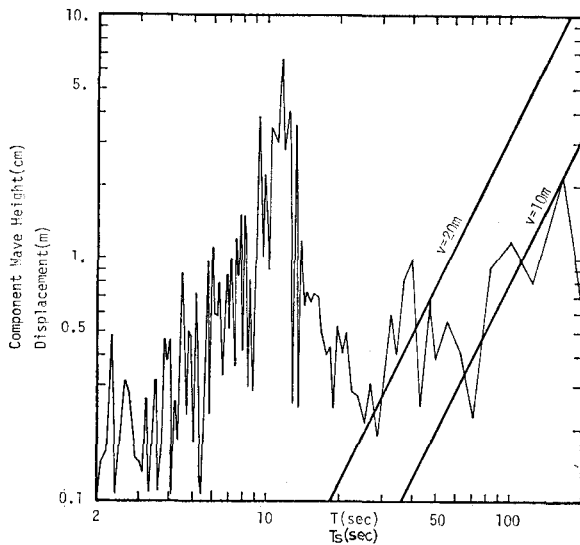


図-4 長周期領域での Swaying の共振特性

係留索にかかる力はバネ定数×変位であらわされるので、バネ定数を大きくすればそれだけその力は大きくなる。よってうねり以下の周期の領域に限定すれば係留索のバネ定数は小さいほうがよい。しかし小さすぎると風や潮流の定常力によって岸壁より離れすぎることになる。このような定常力に対してはバネ定数が大きいほうがよいのは当然である。いま実験で対象とした船に 10 m/sec の風が岸から吹いたとすると、側面積を 2000 m² とする時全体として約 14 ton の力りが作用することになる。バネ定数を C_L とする時、この定常力をささえるためには $x=14/C_L$ の変位が必要になる。図-4 に示したように C_L が決まれば共振周期も決まるが、この計算条件に対して共振周期 T_s をみかけ質量を考慮して求めると、

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{2.37W}{C_L \cdot g}} \dots \dots \dots (6)$$

であらわされる。図-5 の太い実線にこの共振周期 (T_s) と風による変位 (Displacement) の関係を示している。勿論初期張力をかけることにより、この離岸距離を 0 におさえることはできる。一方 T_s が大きいときには変位も大きくなるので、式 (6) よりわかるように C_L が小さいと上述のように岸壁よりの変位が大きくなることがわかる。この他にこのような定常力とは別に港内係留の場



図—5 成分波高スペクトルの実測例と風による船の変位について

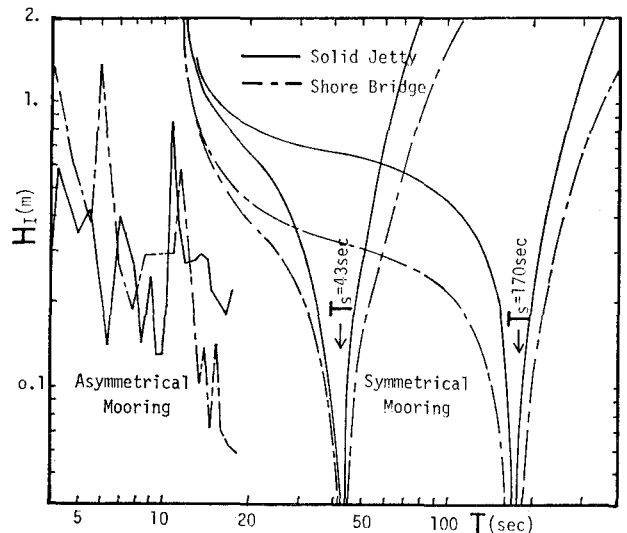
合には Seiche⁵⁾ や波の不規則性より生じる slow drift oscillation⁶⁾ の影響も考える必要がある。Seiche の成分波高は一般に小さいけれども 図—4 よりわかるように Swaying の振幅増幅率は低周波数側では非常に大きくなるので無視できない。Seiche の成分波高スペクトルの実測例を 図—5 に示す。風、潮流などによる定常力と Seiche による船体運動を考慮するならば、係留船のパネ定数は 図—5 において Seiche の波高が小さく、かつ定常力も考慮したような値に設定する必要がある。例えば Seiche を避け、更に季節風による船の離岸を避けるために Swaying の固有周期 (T_s) を 70 sec になるように設計したとすると、式 (6) からわかるようにこの時の係留索のパネ定数は実船換算で 40.6 ton/m となる。何本の係留索でこのパネ定数を実現するかはその時の事情にもよると考えられるが、係留索の本数が多いと索にかかる力が不均一になり、大きな力のかかる索から順番に切れるので、なるべく少数の係留索で、係留するのが望ましいと考えられる。他方季節風の影響が少なくうねりのみが作用する港では 図—5 における定常力は考えなくてよいので、この場合には Seiche の共振周期とずらすことのみを考えてパネ系の共振周期を決めればよい。以上のようにして Seiche の共振をさけた場合に係留索にかかる最大の力は 図—2 (c) で示したように Rolling の共振時に生じることになるので、この変位およびそれから生じる力に耐えるように、係留索および係船施設的设计強度は決められる必要がある。

ところで上記のような対称係留を実現する方法

として Russel⁷⁾ は重力式フェンダーまたは沖に Buoy を設置することを提案している。重力式フェンダーは係船岸の下に空間を必要とするため、横さん橋では容易に増設できるが、鉛直岸壁では不都合になる。Buoy は港内の利用空間を狭める上、沖からはしけで荷役する場合、はしけの接舷時に障害になる。このようなことからすれば、パネ定数の小さいソフトフェンダーの開発が望まれる。ところで、この種のフェンダーは従来のフェンダーの主目的であった接岸時のエネルギー吸収の面では劣るので、従来のフェンダーとソフトフェンダーの併設が望ましい。

5. 係留方法が港内静穏度に及ぼす影響について

以上で係留方法が船体運動に及ぼす影響について述べたが、これは係留方法が港内静穏度に直接影響を与えることを示している。荷役ができるための船体運動の限界値は取扱ひ貨物の種類、荷役方法により大きく異なる^{8),9)}。図—6 は長周期の Swaying の限界値を 2m とした時の限界波高を示している。ここで非対称係留の限界波高は実験値より求めたものである。この図より対称係留にすれば、短周期側 (20 sec まで) の限界波高は極めて大きな値まで荷役可能となる。更にパネ定数をうまく選べば Seiche との共振をさけることができる可能性があることは先に指摘した通りである。図—7 は船側での上下動の限界値を 50 cm とした時の限界波高である。ここで、 H は Heaving の全幅、 B は船幅を表わす。これより、実際の入射波が 8~10 sec 程度の波に対しては横さん橋の方が鉛直岸壁よりも限界波高が大きくなって



図—6 長周期の Swaying の限界値を 2m とした時の限界波高

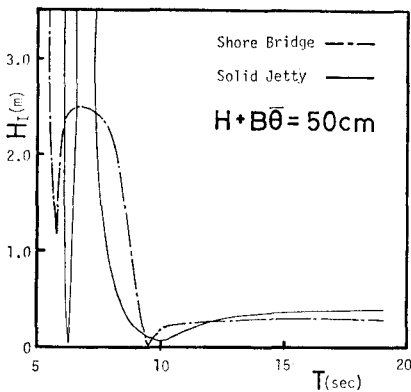


図-7 船側での上下動の限界値を 50 cm とした時の限界波高

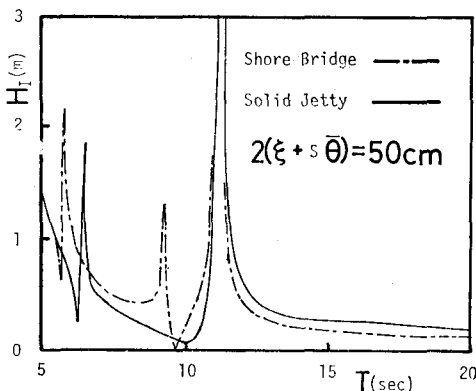


図-8 Hatchway での限界水平変動量を 50 cm とした時の限界波高

有利であるが周期が長くなると、その差異はほとんど認められない。図-8 は Hatchway での水平変動の限界値を 50 cm とした時の限界波高である。これはクレーンの操縦者が Hold 中に貨物を入れる場合に問題となる量である。コンテナ船では特にこれが問題になると考えられる。この場合も 図-7 の場合と同様に短周期側 (10 sec 以内) では横さん橋が有利であるが、周期が長くなると鉛直壁の方が有利なのがある。

6. 結 語

以上、主として船体運動の面から港内静穏度について検討を行った。その結果を要約すると次のようである。

① 左右より等しいバネで係留して横波を受ける時の船体運動は矩形断面浮体のポテンシャル論でほぼ説明できるが、Rolling については慣性モーメントおよび減衰

係数の取り方に改良の余地がある。非対称係留の場合でも Heaving と Rolling はポテンシャル論でほぼ説明できる。

② 非対称係留は Swaying を著しく大きくするが、バネ定数を等しくした対称係留法にすることにより船体運動を小さくすることができ、荷役限界波高をたかめることができる。この場合、係留船のバネ定数はその港の Seiche との共振をさけるように設計されなくてはならない。またバネ定数が決まると係留施設に働く力も決まるので、係留施設はこれに耐えうるだけの強度のものにする必要がある。

③ 横さん橋は周期の短い領域の波の場合は鉛直岸壁よりも有利であるが、周期が長くなると鉛直岸壁の方がよくなる。対象となる港の入射波の確率分布より、どちらの岸壁構造にするかは決められるべきであろう。

最後に、実験及び資料整理において援助していただいた当時大阪大学学生改発直己君 (現積水ハイム (株)) に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 榎木 亨・久保雅義：荷役限界から見た港内静穏度に関する研究 (第一報)，第 24 回海岸工学講演会論文集，pp. 610~614, 1977.
- 2) 木原 力・轟 正彦：矩形断面浮体の波浪動揺に関する研究，港湾技術研究所報告，第 14 巻，第 2 号，pp. 47~77, 1975.
- 3) 井島武士ほか：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.
- 4) 運輸省港湾局：港湾構造物設計基準，日本港湾協会，pp. 2-2~8, 1975.
- 5) 中野猿人：低気圧に随伴する潮汐副振動並びにウネリに就て，気象集誌，17，pp. 140~154, 1939.
- 6) Hermans, A. J. and G. F. M. Remery: Resonance of moored objects in wave trains, Proc. of the 12th Conf. on Coastal Eng., pp. 1685~1700, 1972.
- 7) Russel, R. C. H.: A Study of the movement of moored ships subjected to wave action, Proc. of the Inst. of Civil Eng., Vol. 12, pp. 379~398, 1959.
- 8) 榎木 亨・久保雅義：船体運動にともなう荷役貨物のふれまわりについて，第 32 回年次学術講演会講演概要集，pp. 67~68, 1977.
- 9) 榎木 亨・久保雅義：船体運動が荷役作業に及ぼす影響についての一考察，第 33 回年次学術講演会講演概要集，1978.