

超大型タンカーのけい留時動揺特性

上田 茂*・白石 悟**・柳沢雄博***

1. ま え が き

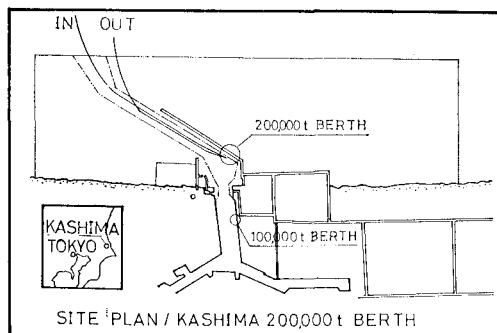
外洋に面する超大型タンカー用バースの建設およびオペレーションを安全かつ確実に実施するためには、けい留中のタンカーの動揺特性と、構造物に対する影響とを把握することが極めて重要である。このために、けい留船舶の波浪動揺に関する理論的・実験的研究が港湾技術研究所において進められている。本調査はこの一環として、昭和 50 年から 3 年間の予定で実施されたが、50 年度、51 年度に実施した調査記録の解析が一通り終了したので取りまとめて報告する。

現在、わが国で稼働中のシーバースのほとんどは、湾奥に位置するか、あるいはよく遮蔽された海域に建設されており、今回の測定事例でも、けい留中の海象条件は模型実験などで再現される極限の状態にない。しかし、得られた記録からは、波の性質と船舶の運動特性との関係がよく理解でき、模型実験や理論解析を行う上での有力な手がかりとなる。

2. 観測地の状況

測定を実施した場所は鹿島港の現在稼働中の 20 万トン原油タンカーバースである。鹿島港は東京の北西 80 km に位置し、文字通り鹿島臨海工業地帯の要である。鹿島港は世界でも最大規模の掘込港湾であり、これを外洋の波から遮蔽するための防波堤はほぼ北の方向に約 3 000 m 伸びている。20 万トン原油タンカーバースは、防波堤の隅角部から 500 m の位置に防波堤と平行に設置されている。図—1 はその配置図である。鹿島港は年間を通じて極めてよく遮蔽されているが、冬期の季節風は風向が N~NE となり、このため、比較的長周期の波が防波堤に沿って進入してくることがある。

対象としたタンカーは、鹿島港とペルシャ湾の間を往復する 20 万トンクラスのタンカーで、後の解析に有利のように、船型がほぼ同じ船舶を選んだ。入港タンカーは通常 40 日でペルシャ湾との間を往復するが、その運



図—1 鹿島港平面図

航計画はよほどのことがない限り確実に実施される。ただ昭和 48 年のオイルショック以降は石油消費量の伸率が緩慢になり、各製油所のタンクが常に満杯状態であること、船舶が減速航行するなどの理由により多少の変動がみられる。原油タンカーバースのオペレーションコンディションは、一般に風速 15 m/sec 以下、波高 1.5 m (有義波高) 以下である。この条件より悪い気象海象条件では、タンカーは入港を見合せ沖待したり、また入港中のタンカーは荷役停止などの処置を取り、状況によっては港外待避の勧告に従う。20 万トンタンカーの平均荷役時間は約 48 時間であり、荷役終了後は直ちにバラストを積み出港する。それでも、天候の急変、うねり性の波の侵入などにより、荷役停止などバースの使用に影響を及ぼすことがある。内湾のバースではこのような影響を受けることは比較的少ないが、外洋性シーバースでは、けい留船舶の動揺およびバースとの相互作用について十分な検討を行う必要がある。

3. 調査項目および調査方法

調査項目は、1) 船舶の諸元 (船長、型深、型幅、吃水、重心位置など)、2) 波向、波高、波周期、3) 風向、風速、4) 潮流、5) 船舶動揺 (ロール、ピッチ、ヒープ、サージ)、6) けい留索に作用する船舶けん引力の 6 項目である。

波の記録は防波堤の外側の水深 22 m に設置された超音波式波高計と、バース付近に設置されたステップ式波

* 正会員 運輸省港湾技術研究所構造部海洋構造研究室長

** 正会員 運輸省港湾技術研究所構造部海洋構造研究室

*** 学生会員 運輸省港湾技術研究所構造部海洋構造研究室

高計によった。前者は港外波、後者は港内波を測定する。波向は目視とした。風向、風速は運輸省鹿島港工事事務所の観測記録によった。また、潮流は CM II 型潮流計によりバース付近で測定した。船舶の諸元は入港船舶の船会社および航海士から聞取調査した。

船体動揺の項目の内、ロール、ピッチ、ヒープの測定には加速度計を応用した傾斜計を用いた。ロールとピッチの測定には容量 0.5G の検出器を用いた。検出の原理は図-2 に示すように、重力の加速度の正弦成分を検出し、これから傾斜角を求めるものである。図-3 はその較正図

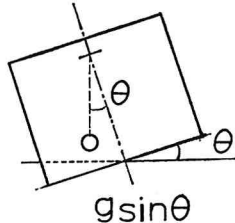


図-2 傾斜計の原理

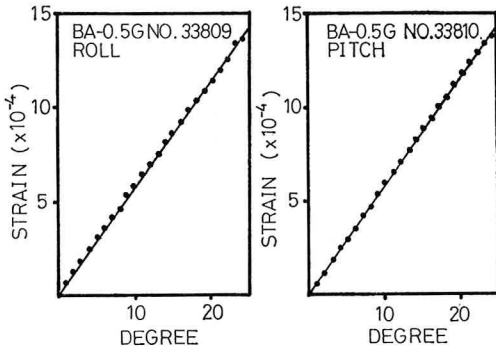


図-3 傾斜計の較正図

であるが、傾斜角が小さい間は非常によい直線性を示す。ヒープの測定には容量 2G の加速度計を 2 個使い、これをブリッジの両翼にセットし上下方向の加速度成分を検出する。上下方向加速度成分にはロール、ピッチの成分が含まれているので、これら进行处理しヒープの加速度成分を求め、これを積分してヒープを求めた。サージの測定は、船体に貼付した目盛をメモーションカメラで撮影し、その後これをアナログ化して解析した。この場合のコマ送り速度は 1 秒間に 1 コマとした。

けん引力の測定には図-4 に示すような、三点ローラー式のポータブルなけん引力計を開発した。測定原理は図-5 に示すように、2 個の固定滑車と 1 個の移動滑車の間に通されたロープが、固定滑車を支点として移動滑車に作用せしめるロープ張力の正弦分力を測定するものである。けん引力計の容量は 80 ton、対象ロープは $\phi 36 \sim \phi 75$ の繊維索とする。検定は愛知県のロープメーカーで実施したが、その結果ロープの傾度は約 6~7 度が適当であり、後述するようにより較正曲線が得られる。ナイロンロープは破断時には約 50% も伸び、このとき直径は 10 mm 以上減少する。図-6 には $\phi 75$ のナイロンロープの較正曲線を示す。20 ton 以上の荷重に対しては直線性が悪くなるが、ヒステリシスは小さく、最大で

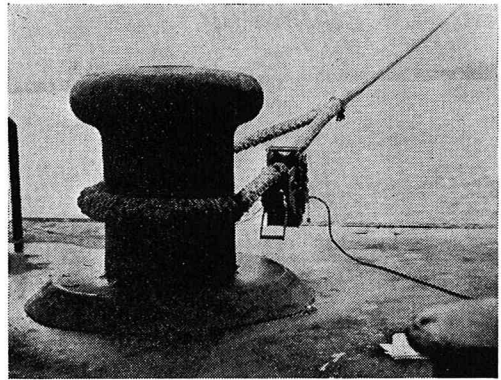


図-4 けん引力計

5% 以下であり、また残留応力もないのでロードセルの出力と張力

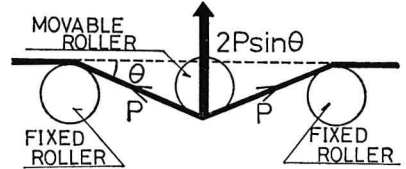


図-5 けん引力計の原理図

との間に 1 対 1 の対応があるものとみなせる。図中、 $\nu = 0.4, 0.5$ と表示した実線はロープの横方向収縮係数を 0.4, 0.5 とした場合のけん留索の縦方向歪である。

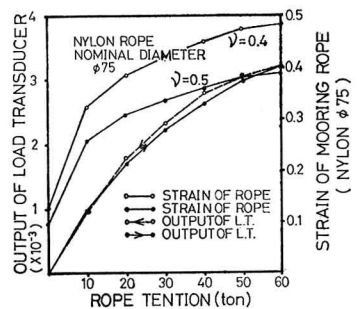


図-6 けん引力計の較正図

$\phi 75$ の第 2 回目以降の

降の載荷では張力 60 ton に対する縦方向歪は、 $\nu = 0.4$ として、48%、 $\nu = 0.5$ で 38% である。なお、けん引力計の検定は $\phi 36, \phi 55, \phi 75$ のナイロンロープについて行い、その他の径のロープについては内挿した。

4. 観測結果

観測は合計 6 回実施したが、次の 3 回について有意な記録を得たので報告する。

- | | |
|------------|-----------------------|
| (1) KA2-76 | 昭和 51 年 2 月 16 日~17 日 |
| (2) KA3-76 | 昭和 51 年 3 月 1 日~2 日 |
| (3) KA3-77 | 昭和 52 年 3 月 27 日~28 日 |

図-7 に KA3-77 の測定記録の一例を示すが、ローリング、ピッチングの周期は比較的短かく 15 秒前後であるが、サージングやけん引力の周期は長く 130 秒程度である。

表-1 に調査対象船舶のローリングとピッチングの最大値、平均値および周期を示す。また、図-8 に KA3-77 の波、ロール、ピッチ、ヒープ、サージ、けん引力の周波数スペクトルを示した。周波数スペクトルの形状は

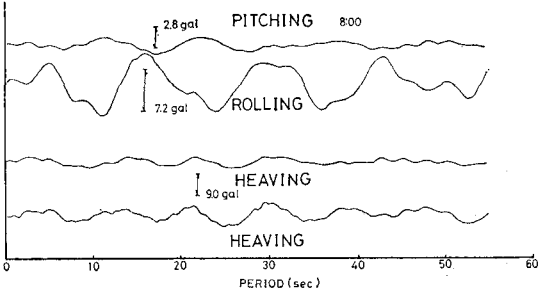


図-7 (a) 観測記録 (KA3-77)

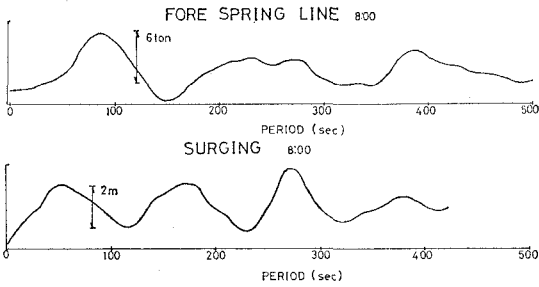


図-7 (b) 観測記録 (KA3-77)

表-1 調査結果

		No.	Wave & Wind			Roll			Pitch			Heave		
			$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	V_W	A_{max}	$A_{1/3}$	$T_{1/3}$	A_{max}	$A_{1/3}$	$T_{1/3}$	A_{max}	$A_{1/3}$	$T_{1/3}$
			m	sec	m/sec	deg	deg	sec	deg	deg	sec	gal	gal	sec
KA2-76		1	0.89	5.9	6.8	18'	11'	12.16	7'	4'	8.95	3.92	2.49	10.19
L_{pp}	320	2	0.76	4.8	6.5	11'	7'	11.10	4'	3'	10.10	3.92	1.76	9.91
B	54.5	3	0.75	5.5	5.8	11'	6'	10.56	4'	2'	8.60	2.94	1.57	9.53
D	26.0	4	—	—	6.7	14'	9'	8.75	7'	3'	6.54	3.92	2.36	8.40
d	19.6	5	—	—	7.0	25'	10'	8.52	14'	3'	7.07	4.9	2.44	8.76
252 100 D.W.T.		6	0.89	4.8	6.9	22'	15'	7.60	7'	4'	6.36	6.86	3.79	7.85
316 000 D.T.		7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
KA3-76		1	0.54	7.2	6.8	25'	10'	13.52	14'	3'	9.86	5.88	2.85	9.98
L_{pp}	310	2	0.57	6.4	6.0	22'	11'	11.78	7'	2'	13.12	3.92	2.41	11.50
B	53.0	3	0.60	8.5	3.3	29'	12'	12.27	18'	5'	30.31	7.84	4.10	14.39
D	25.0	4	0.59	8.7	8.0	18'	12'	11.89	18'	8'	99.32	8.82	4.40	21.66
d	19.5	5	0.73	9.3	8.1	29'	17'	17.95	18'	6'	28.62	9.8	4.57	15.31
237 700 D.W.T.		6	0.53	8.6	7.3	25'	17'	12.13	18'	5'	18.42	6.86	3.89	11.90
272 000 D.T.		7	0.43	9.9	8.8	25'	17'	11.37	18'	4'	12.71	5.88	3.91	11.06
		8	0.51	7.6	9.5	25'	14'	11.72	7'	5'	12.20	4.9	3.54	10.78
KA3-77		3	2.20	6.8	13.6	18'	8'					6.86	2.37	9.11
L_{pp}	320	4			14.1	6'	3'		11'	7'	12.61	6.62	3.64	8.54
B	54.5	5	2.54	6.5	15.5	11'	3'		11'	7'	13.36	6.86	4.21	8.10
D	26.0	6			14.4	5'	4'		21'	8'	15.85	7.35	3.66	8.75
d	19.6	7	2.12	7.0	13.0	6'	3'		10'	7'	12.08	7.35	4.10	9.50
252 100 D.W.T.		8			13.0	4'	3'	8.41	25'	14'	12.22	8.82	4.18	14.55
316 000 D.T.		9	1.92	6.8	12.4	4'	2'	8.13	21'	10'	12.80	5.88	3.17	11.81
		10			10.7	4'	2'	8.81	14'	10'	12.97	4.90	2.90	12.34
		11	1.48	7.3	10.0	7'	3'	9.22	18'	12'	12.35	7.84	4.00	13.09
		12			9.4	4'	3'	11.75	14'	10'	13.75	4.90	3.50	13.13
		13	1.31	8.0	9.2	4'	2'	13.00	18'	9'	12.97	4.90	3.07	13.60
		14			8.7	7'	4'	13.80	14'	9'	14.60	3.92	3.15	14.14

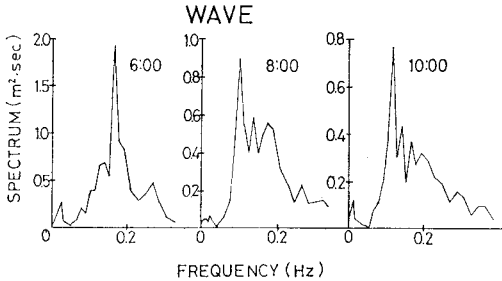


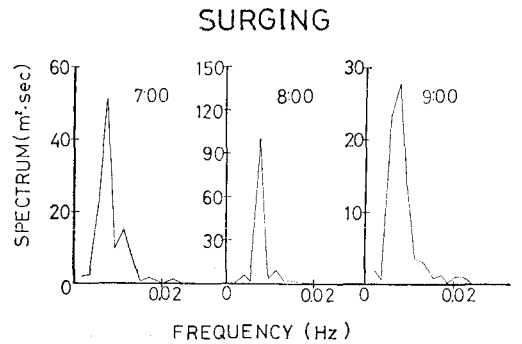
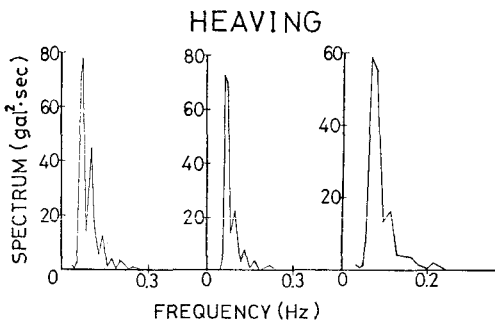
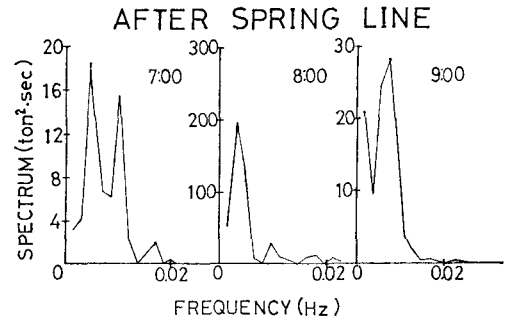
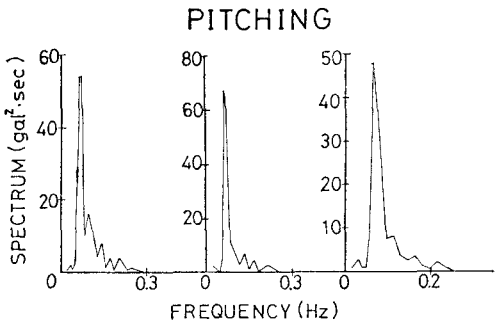
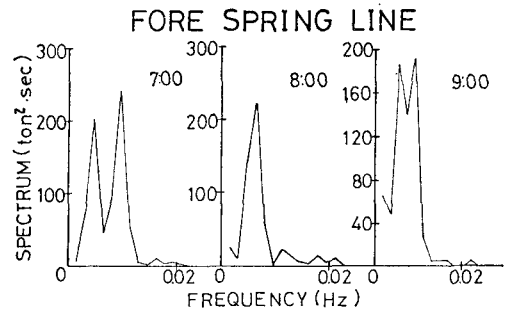
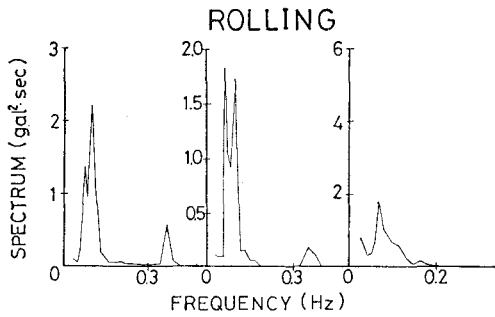
図-8 (a) 周波数スペクトル (KA3-77)

他の観測例についても同様であり、後述する船体運動の固有周期付近に顕著なピークを示す。

ローリングの最大振幅は18分、ピッチングは24分で

ある。いま、船舶の重心回りの運動を考えると、KA3-76のローリングによる舷側での沈下は8cm、ピッチングによる船首尾での沈下は34cmである。ヒービングによる沈下は最大15cmであり、最大沈下量は57cmである。

サージングの大きさは、KA3-77の12回目の測定では、最大全振幅2.38mである。また、このときのけん引力の値は表-2に示すように、おもてのスプリングラインで12.52tonである。これはけん引力の変動値と平均値の和であるが、初期張力は約6tonである。両者の卓越周波数は極めてよく一致していることから、ロープの伸びがサージング量と近似的に一致するものと考えられる。スプリングラインの長さを60mとして約2%の伸びとなる。スプリングラインのバネ定数を5ton/mとす



図—8 (b) 周波数スペクトル (KA3-77)

図—8 (c) 周波数スペクトル (KA3-77)

表—2 けん引力の実測値

Name of Ship	No.	Line 11			Line 4			Line 5			Line 12			Line 13		
		H_{max}	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	H_{max}	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	H_{max}	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	H_{max}	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	H_{max}	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$
KA3-77	1	3.17	3.13	169.3	2.07	1.77	139.1	1.20	1.09	136.0	2.77	2.57	174.4	1.74	0.83	210.7
	2	3.22	2.48	155.8	1.36	1.21	110.2	1.09	1.06	142.4	2.65	2.13	170.8	1.74	0.46	144.3
	3	3.52	2.85	298.9	2.40	1.65	359.3	1.40	1.21	192.5	2.84	2.31	298.1	1.64	1.10	257.5
	4	4.02	2.74	199.6	1.59	1.12	193.5	0.87	0.72	688.8	3.36	2.07	201.4	0.49	0.43	701.3
	5	3.73	2.86	123.9	2.06	1.98	125.2	1.50	1.41	142.5	2.81	2.09	124.8	0.41	0.30	420.1
	6	3.41	3.34	143.6	1.09	0.83	115.0	1.50	0.86	173.7	3.20	2.47	138.4	0.84	0.50	106.0
	7	3.73	3.57	298.8	2.14	1.45	148.4	0.99	0.88	138.7	3.21	2.46	195.2	0.94	0.94	363.7
	8	5.32	3.40	137.0	1.74	1.37	275.8	0.91	0.80	426.6	4.38	2.99	151.6	0.66	0.26	130.8
	9	4.60	4.09	354.7	1.04	0.69	154.6	0.85	0.77	179.8	3.37	3.13	359.2	1.63	1.00	266.8
	10	2.68	2.57	174.2	1.12	0.89	85.8	0.97	0.77	110.6	2.97	2.64	215.3	0.59	0.43	93.0
	11	3.86	3.09	306.5	1.75	1.38	212.3	1.87	1.11	129.2	6.52	6.16	328.4	0.58	0.29	151.0
	12	4.07	3.44	120.7	2.07	1.69	189.0	1.17	0.86	199.2	4.83	3.59	154.9	1.01	0.99	322.7
	13	3.10	3.03	163.9	1.65	1.17	152.9	2.38	1.17	207.3	6.37	4.06	241.3	3.63	2.71	191.7
	14	3.21	3.01	219.3	1.40	1.08	120.7	1.06	0.88	163.9	3.56	3.28	223.5	1.62	1.35	297.5
KA3-76		Line 17			KA2-76			Line 4			Line 17					
	1	2.72	1.99	97.1				0.45	0.33	349.6	0.98	0.70	229.0			
	2	0.59	0.39	77.1												
	3	0.73	0.49	91.8				0.56	0.45	85.9	0.54	0.45	76.0			
	4	1.33	1.02	82.2				0.50	0.24	68.9	0.34	0.26	60.4			
	5	1.11	0.93	83.4				0.70	0.40	85.2	1.59	0.59	79.1			
	6	1.39	0.85	96.8				0.33	0.24	178.6	0.34	0.27	146.4			
	7	0.74	0.58	77.0				0.43	0.34	184.4	0.65	0.43	144.0			
	8	1.30	0.98	73.7				0.71	0.53	199.9	0.52	0.40	148.7			

れば、2%の伸びで約6tonの張力が作用したことになる、測定結果はほぼ妥当である。

5. 船体動揺の固有周期

(1) ローリングの固有周期

ローリングの固有周期は次式によって求める。

$$T_R = 2\pi \sqrt{\frac{k_B}{g \cdot GM}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 k_B : 重心を通る船首尾方向の軸に対する回転半径、 GM : 重心とメタセンターとの間の距離、 g : 重力の加速度、 T_R : 船舶のローリングの固有周期である。

(2) ピッチングの固有周期

ピッチングの固有周期は次式によって求める。

$$T_P = 2\pi \sqrt{\frac{k_L}{g \cdot GM_L}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 k_L : 重心を通る断面方向の軸に対する回転半径、 GM_L : 縦メタセンター高さ、 T_P : ピッチングの固有周期である。

(3) ヒービングの固有周期

ヒービングの固有周期は、復原力を BLz (z : 上下方向変位) とし、減衰がないものとして求める。

$$T_H = 2\pi \sqrt{\frac{M_{0H}}{BL}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 B : 船幅、 L : 船長、 z : 上下方向変位、 M_{0H} : 船舶の上下動の仮想質量で $1.4M$ とする。 M : 船舶の排水質量である。図-9 に船舶のロール、ピッチ、ヒーブの固有振動周期を图示する。

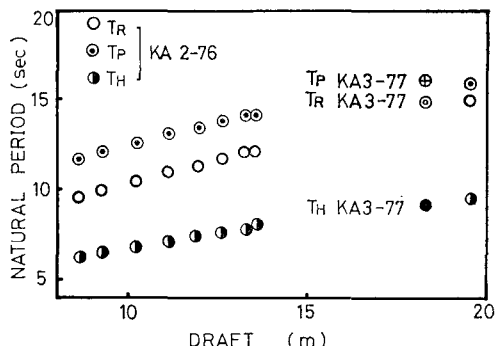


図-9 船体運動の固有周期

(4) サージングの固有周期

サージングの固有周期は、船舶の質量とけい留索のばね定数、および水の抵抗などによる減衰などの関数として与えられる。対象船舶の合成ばね定数は 図-10 に示

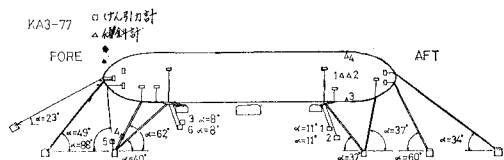


図-10 けい留索の配置図

すようなけい留索の配置図から、けい留索の種類、径、長さ、角度などを求めて計算した。このとき、ローブに作用する張力と伸びとの

関係は線型であるとし、伸率はナイロンローブの場合は張力 10 ton から破断荷重までの間で 20%、ワイヤーローブの場合は破断荷重で 3% とした。各対象船舶のばね定数は 表-3 に示すとおりである。

サージングの固有周期は次式で計算する。

$$T_L = 2\pi \sqrt{\frac{M_{0L}}{K_L}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 K_L : けい留索の前後方向の合成ばね定数、 M_{0L} : 船舶の前後方向運動の仮想質量で $1.15M$ とする。 T_L : サージングの固有周期である。

(5) スウェイングの固有周期

同様に、非減衰のスウェイングの固有周期は次式で与えられる。

$$T_S = 2\pi \sqrt{\frac{M_{0B}}{K_B}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 K_B : けい留索の左右方向の合成ばね定数、 M_{0B} : 船舶の左右方向運動の仮想質量で $2.0M$ とする。 T_S : スウェイングの固有周期である。図-11 に船舶のサージおよびスウェイの固有周期を图示する。

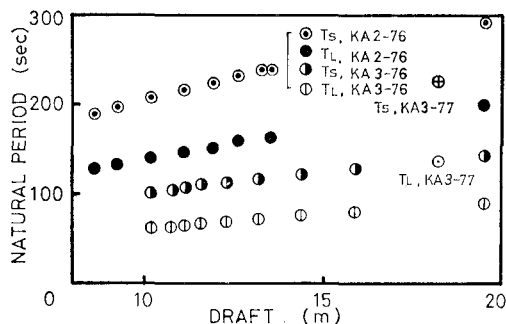


図-11 船体運動の固有周期

6. あとがき

今回の現地観測の結果船舶のけい留時の動揺特性がかなり明らかになった。すなわち、船舶は船舶固有の、あるいは係留系の固有振動周期に近い周期で運動していることであり、これらの周期は波の卓越周期よりも長い。特にサージ、スウェイの運動周期は 100 秒から 200 秒にも達する。この現象はスロードリフト現象と呼ばれ種々の理論的アプローチが試みられていることは周知の通りである。これらの理論計算法と解析結果との比較は興味あるところであるが、52 年度の実測結果と合わせて改めて報告したい。終りに、本調査に御協力いただいた関係機関および諸氏に深甚なる謝意を表する次第である。