HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	タンク内自由水の挙動に関する基礎的研究
Author(s)	平沼, 裕康; 木村, 暢夫; 天下井, 清; 稲葉, 恭人
Citation	北海道大學水産學部研究彙報, 43(1), 42-59
Issue Date	1992-02
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/24091
Type	bulletin (article)
File Information	43(1)_P42-59.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北 大 水 産 彙 報
43(1), 42-58. 1992.

タンク内自由水の挙動に関する基礎的研究

平沼　裕康*・木村　暢夫**・天下井　清**・稲葉　恭人**

An Investigation into the Action of Free Water in Tanks

Hiroyasu HIRANUMA*, Nobuo KIMURA**, Kiyoshi AMAGAI**
and Yasuhito INABA**

Abstract

It is well-known that the inclining moment of free water on decks or in tanks of small fishing vessels, in combination with other factors, has contributed to capsizing. In this paper, the dynamic effects of free water are considered in relation to the vessel's transverse stability.

Model tests using oscillating rectangular tanks are carried out. The experiments consisted of determining of the relationship between water motion, tank dimensions, water depth at rest, inclining angle, oscillating period, and the resulting moment component that is created by a moving water mass in an oscillating tank. Expressing this using an empirical equation of induced inclining moment δM_X due to free water, we have the following:

$$\delta M_X = Y \times (\rho \cdot g \cdot L \cdot B \cdot h)$$

$$Y = (-0.134 + 1.513\theta + 4.762\frac{1}{\omega_W}) \sin \omega_T t$$

$$\omega_W = \sqrt{g\frac{\pi}{B} \tanh h\frac{\pi}{B}}, \quad \omega_T = \frac{2\pi}{T}$$

where;

- Y is the transfer displacement of C.G. of the moving water mass,
- B is the transverse length of tank,
- L is the longitudinal length of tank,
- ρ is the density of free water,
- ω_W is the theoretical natural circular frequency of water transfer in the tank,
- ω_T is the circular frequency of oscillating tank,
- θ is incling angle,
- T is the oscillating period of tank,
- h is the water depth of tank, and
- g is the gravitational acceleration.

Some considerations about the above subjects are presented.

緒　　論

船内には，清水タンク中にある飲料水等の清水や燃料タンク中にある燃料となる軽油や重油，また船底のビルジといった液体が存在する。これらの液体や航行中に甲板上へ打ち込んだ海水は，船

* 福井県小浜水産高等学校
(*Fukuiken Obama Senior High School of Fisheries*)
** 北海道大学水産学部漁船運用学講座
(*Laboratory of Fishing Boat Seamanship, Faculty of Fisheries, Hokkaido University*)

体の傾斜や動揺によって傾斜舷側へ移動し，同じ重量の固体を積んだ場合と比べると復原性に影響を及ぼす傾斜モーメントを発生させる。傾斜モーメントの発生は満載状態のタンクでは起こらず，液体が自由表面を持つ場合に限られる。このような自由表面を有する液体が自由水 (free water) または遊動水と呼ばれる。

Fig. 1 で示すように，船内タンクの自由水は船の傾斜によって重心位置が g から g_1 へ移動する。g および g_1 を通る傾斜前後の静水面にそれぞれ垂直な 2 線の交点を m とすれば，自由水の重心移動によって生じる傾斜モーメントは $w\cdot\overline{gm}\sin\theta$ (kg−m) であるから，自由水影響を修正した復原力 S は

$$S\,(\mathrm{kg-m}) = (W\cdot\overline{GM} - w\cdot\overline{gm})\sin\theta$$
$$= W\cdot\overline{GZ} - w\cdot\overline{gz} \qquad (1)$$

w : weight of free water, W : displacement of ship

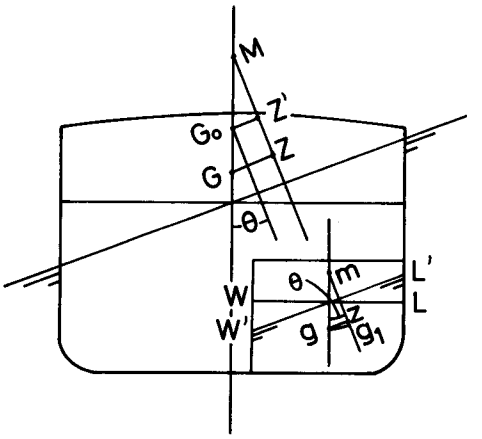
となる。

IMO (国際海事機構 : International Maritime Organization) の復原性基準 A. 167 では，タンク内の自由水の水位が，タンク高さの半分の時，傾斜モーメントが最大になると考え，自由水影響による $\overline{GZ}$(m) の修正を行っている。

一般に，操船者は自由水の管理に当たって，自由水による $\overline{GZ}$, $\overline{GM}$(m) への影響を考慮して，幅の大きいタンクから順に空載か満載に近づけるようにしている。

特に小型漁船の場合，タンクの他に魚倉内の漁獲物も遊動物となり易く，自由水と同様の動きとなり得る。また近年の食生活の変化により活魚倉を備える漁船が多くなり，漁船は他の船舶に比べ船内に自由水をより多く持っていると考えられる。

従って，魚倉やタンク内の自由水が，船の復原性に与える影響を明らかにすることは，重要な問題である。



$\overline{GM}$: metacentric height, $\overline{GZ}$: righting lever
$\overline{GG_0}$: virtual rise of center of gravity $\overline{GG_0} = \dfrac{w\cdot\overline{gm}}{W}$
$\overline{G_0M}$: corrected $\overline{GM}$ of effect of free water
$\overline{G_0Z'}$: corrected $\overline{GZ}$ of effect of free water
w : weight of free water, W : displacement of ship

Fig. 1. Influence of free water for an inclining ship.

本論文では，種々の小型漁船のタンク内の自由水が，その水量及び船体の横揺れ周期，横揺れ角度等の変化により示す挙動と，その結果発生する船体横傾斜モーメントについて実験的に明かにするとともに，自由水の挙動を考慮した復原性基準の在り方について考察し若干の知見を得たので報告する。

実　　験

小型漁船が有する魚倉及び清水，燃料タンクを調査し，一般的なタンクをモデル化し，それらのタンクを小型漁船の横揺れ周期をシミュレートし得る試作動揺発生装置にのせて，水量，横揺れ周期，横揺れ角の種々の組み合わせで自由水の挙動と力及びモーメントの計測実験を行った。

1. 実験装置

1-1 動揺発生装置

本実験を行うにあたり，規則波的動揺に近い状態が再現できるように，著者等によって設計し制作された動揺発生装置の設計図を Fig. 2 に示す。

この装置では，モーター (住友重機：No2-AM208) の回転がギヤボックスを介して回転盤 A の回転となり，arm 2 の上端の上下直線運動 B となる。この運動は arm 1 を介して動揺台 C の回転

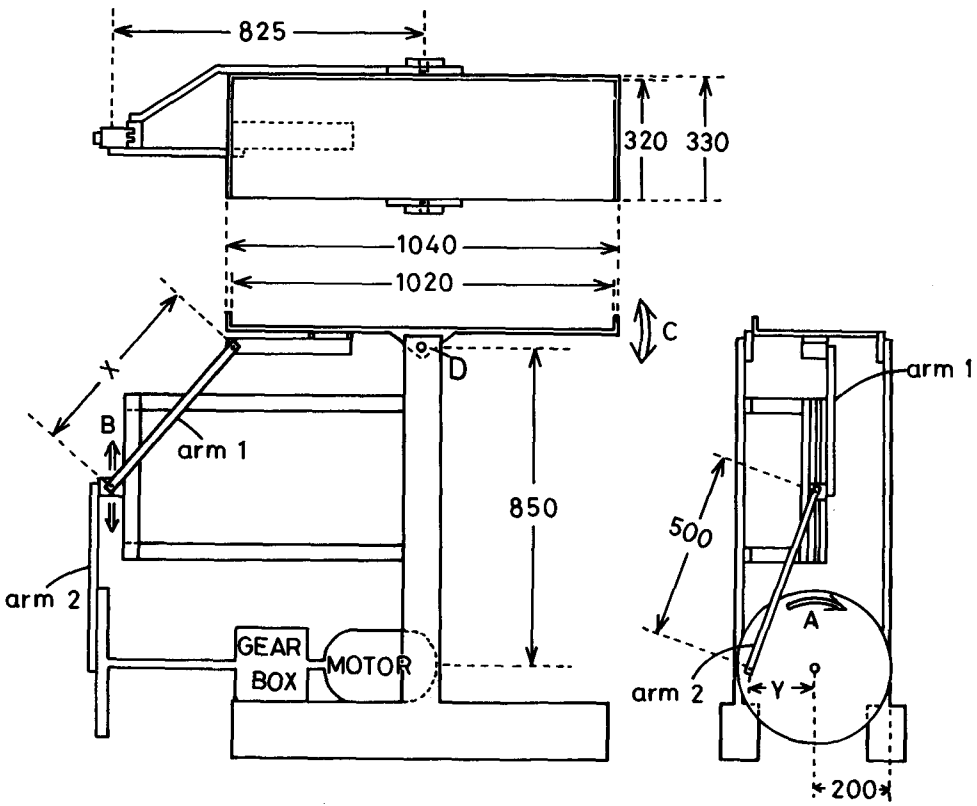


Fig. 2. A plan of rolling system.

Table 1. Angle and frequency of rolling system.

(a)

θ	X (mm)	Y (mm)
5	479	44
10	483	87
15	490	129
20	500	171

(b)

T (sec)	Number of rotations (rpm)
0.5	120
1.0	60
1.5	40
2.0	30
2.4	25
3.0	20
4.0	15

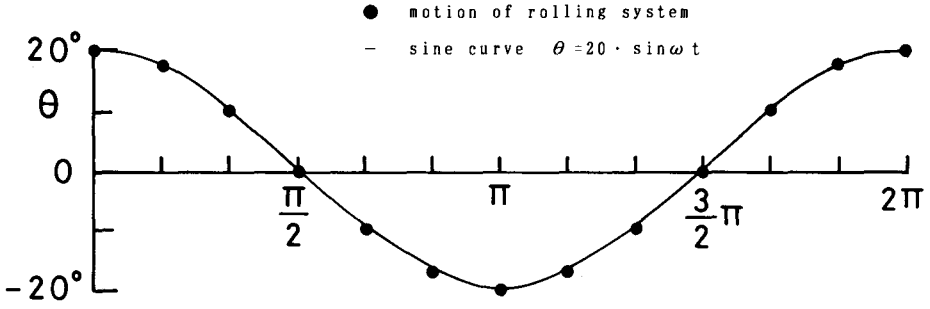


Fig. 3. A motion of rolling system.

軸Dを中心とする動揺となる。計測台の横揺れ角 θ は Table 1 で示すように，arm 1 の長さ x と arm 2 を差し込む円盤の穴の位置 y の組合せを変えることにより，5°, 10°, 15° 及び 20° の 4 段階に設定できる。周期 T は，ギヤボックスのギヤ比とモーターの回転数を 15～120 r.p.m の範囲で変化させることによって，0.5～4.0 sec の間で無段階に設定することが可能である。また，軸Dに取り付けたポテンショ・メーター (緑電子：CP-2FB) によって横揺れ角 θ が連続測定できる。横揺れ角 20° の場合の動揺結果の一例を Fig. 3 に示す。縦軸は，計測台の傾斜角を示し，一周期分を図示したものである。実線は正弦曲線で，●印は実測値である。ここに示したように動揺発生装置の計測台の動きは，ほぼ正弦曲線で表せた。

1-2 モデルタンク

モデルタンクは，その主寸法を Table 2 に示す船内タンクを想定し，上部密閉型の透視可能なアクリル板で制作した 3 種類を用いた。

これらは，19.9GT 型小型鮭鱒流し網，96GT 型鮭鱒流し網漁船各々5 隻分の一般配置図から魚倉，清水タンク及び燃料タンクの幅/深さ比 (B/D) の割合が多かったものであり，モデルタンクの主寸法は動揺発生装置の実験能力が許す限り大きくなるように決定した。

Tank 1 は，燃料タンクや魚倉で多く見られた寸法比であり，縮尺は 1/9, Tank 2 は清水タンクや魚倉で多く見られた寸法比で，縮尺は 1/6, Tank 3 は魚倉で多く見られた寸法比で，縮尺は 1/9 である。

Table 2. Dimension of model tanks.

TANK No.	L (mm)	B (mm)	D (mm)
1	100	500	200
2	100	300	300
3	100	250	200

2. 実験方法

自由水には，自由水の挙動を鮮明に撮影するために赤インクで着色した水を用いた。水量はタンクの全容積の 10%, 30%, 50%, 70% 及び 90% とした。実施した実験の横揺れ角 θ(deg.) と周期 T(sec) の組み合せは Table 3 に示す。これらの周期は 19.9GT 型漁船の横揺れ周期で 1.2～7.8 sec, 96GT 型漁船では 1.5～9.8 sec に相当する。

計測は各々の組合せについてそれぞれ 10 周期分行った。ビデオカメラによりタンク内の自由水

Table 3. Combinations of angle and frequency in experiments.

Amplitude (θ)	Period T (sec)						
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.4	3.0	4.0
5	○	○	○	○	○	○	○
10	×	○	○	○	○	○	○
15	×	○	○	○	○	○	○
20	×	×	○	○	○	○	○

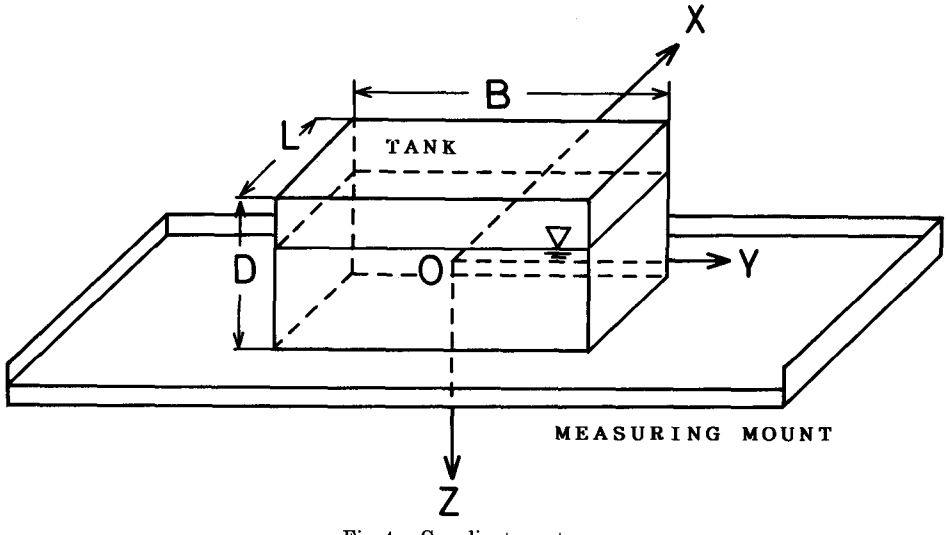


Fig. 4. Coordinate system.

の挙動を撮影すると共に，Fig. 4 に示したように，平静時の水量の中心に原点をおいた座標系に従って，自由水の挙動により発生する船体横方向の力 Fy(kg)，船体鉛直方向の力 Fz(kg) 及び X 軸まわりの横傾斜モーメント Mx(kg−m) を 4 分力計 (日章電気：LCM-4174) を用いて測定し，データーレコーダー (KYOWA：RTP-501AL) に記録するとともに，マルチコーダー (WATANABE：MC6726) に出力した。また同時に，動揺装置の台の横揺れ角 θ を，ポテンショメーターを用いて計測し，同様に出力した。

計測は，3 種のモデルタンクについて同様に実施した。

解 析 方 法

自由水の挙動については，1/4 周期ずつビデオ画像より読み取った。力 Fy, Fz 及び横傾斜モーメント Mx は，マルチコーダーの出力より読み取った各々10 周期分の極大値を平均した。

Fy, Fz 及び Mx の各計測値は，各水量と同質量の固体に置き換えて測定した Fy'(kg), Fz'(kg), Mx'(kg) の計測値を差し引き，その差 δFy(kg), δFz(kg), δMx(kg) を以下の算出方法で無次元化して係数値 C_{Fy}, C_{Fz} 及び C_{Mx} を求めた。

a) Fy 及び Fz について

$$C_{Fy}=\frac{\delta Fy}{\rho\cdot g\cdot B\cdot L\cdot h} \tag{2}$$

$$C_{Fz}=\frac{\delta Fz}{\rho\cdot g\cdot B\cdot L\cdot h} \tag{3}$$

b) Mx について

$$C_{Mx}=\frac{\delta Mx}{\rho\cdot g\cdot B^2\cdot L\cdot h} \tag{4}$$

ここで，

δFy：	自由水影響による横方向の力
δFz：	自由水影響による鉛直方向の力
δMx：	自由水影響による横揺れモーメント
ρ：	水の密度
g(m/sec^2)：	重力加速度
L(m)：	モデルタンクの長さ (実船では船首尾方向の長さに相当)
B(m)：	モデルタンクの幅 (実船では船幅方向の長さに相当)
h(m)：	モデルタンク内の水深

を表す。

結 果

1. 自由水の挙動

タンク内の自由水の挙動の一例を，Fig. 5(a)～(f) に示す。これらは，Tank 2 において，自由水量 10%，横揺れ角 10° で，横揺れ周期 T を変化させた時の自由水の挙動を 1/4 周期毎に示したものである。左端の $t=0$ から始まり，右端が $t=3/4T$ の図で，上より 1 周期目，2 周期目，3 周期目を示す。これらを見ると，動揺始動時の 1 周期目を除いて，2 周期目以降はほぼ同じ挙動を示していることがわかる。

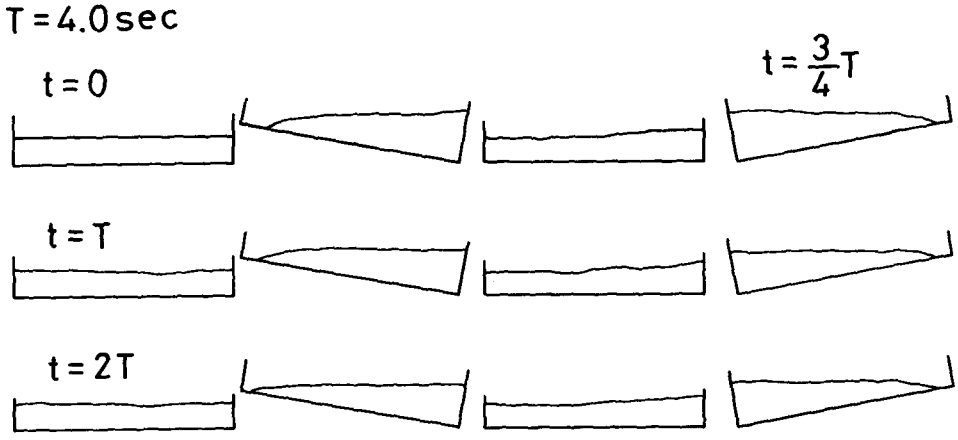


Fig. 5(a). Time history of motion of free water, loadage = 10%, $\theta = 10°$, $T = 4.0$ sec, Tank 2.

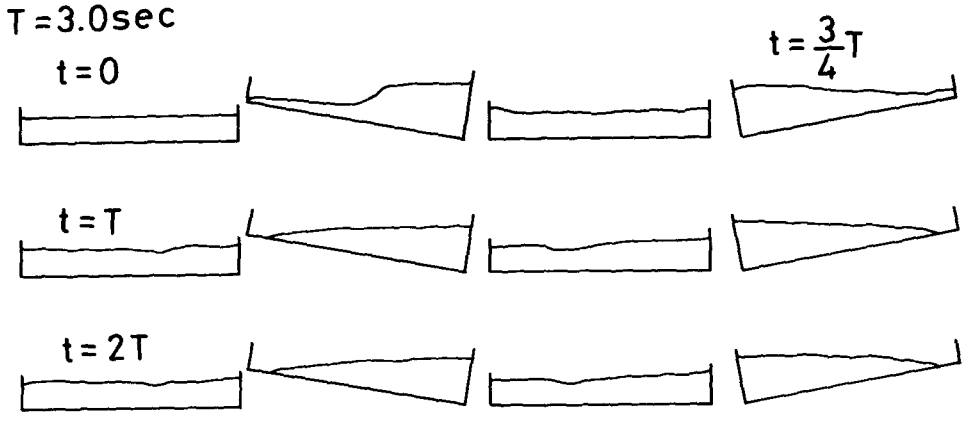


Fig. 5(b). Time history of motion of free water, loadage = 10%, $\theta = 10°$, T = 3.0 sec, Tank 2.

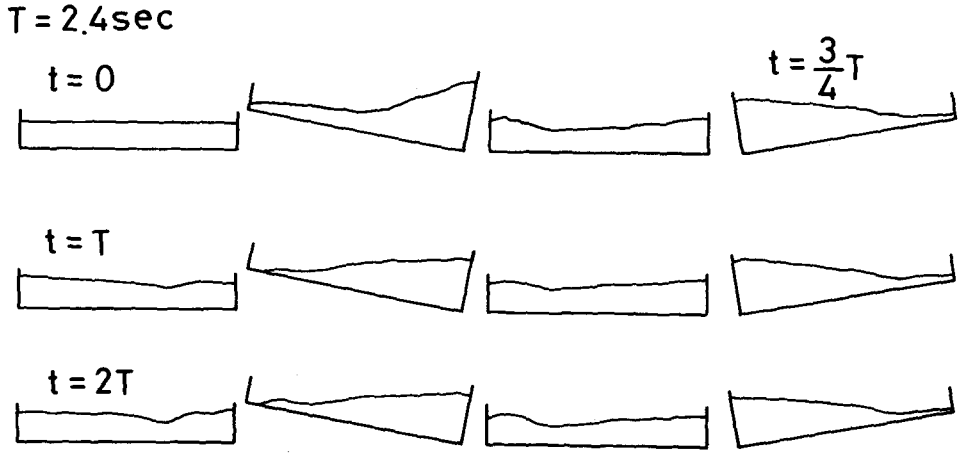


Fig. 5(c). Time history of motion of free water, loadage = 10%, $\theta = 10°$, $T = 2.4$ sec, Tank 2.

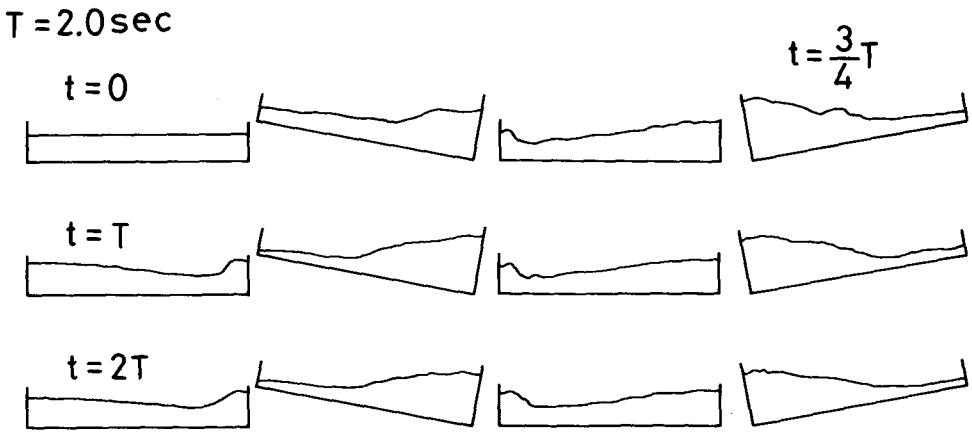


Fig. 5(d). Time history of motion of free water, loadage=10%, $\theta=10°$, $T=2.0$ sec, Tank 2.

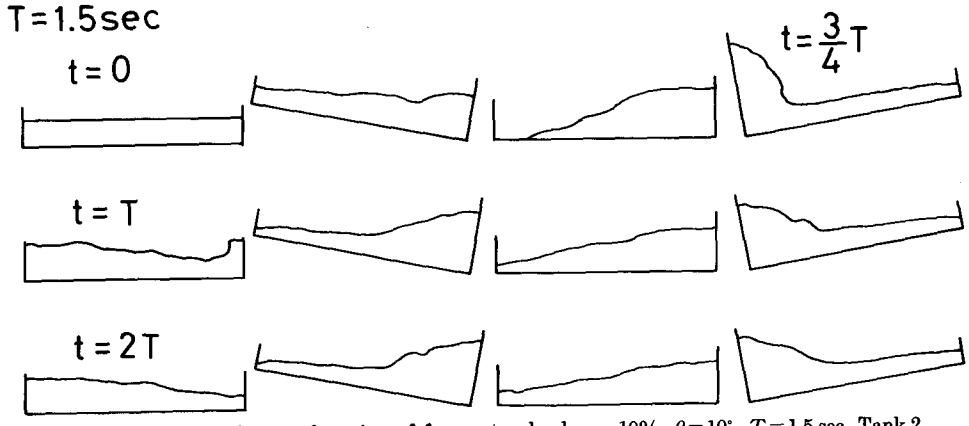


Fig. 5(e). Time history of motion of free water, loadage=10%, $\theta=10°$, $T=1.5$ sec, Tank 2.

また，周期 T が 1.0 sec の時，タンク内の自由水はタンクの天井にまで達する挙動を示し，計測台の動揺周期（横揺れ周期）に対する位相も 1/4 周期遅れていることがわかる。

2. 自由水の重心移動

自由水の挙動と自由水の移動により発生する横傾斜モーメントとの関係を知るため，Fig. 5(a)～(f) に示したような各 1/4 周期毎の自由水の重心位置と，動揺前の平静時の自由水の重心位置とから，Y 軸方向の各々の自由水重心の移動距離を求め，Fig. 6(a)～(b) に示した。これらを見ると，タンク内の自由水量が多くなるにつれて，自由水重心の移動量が小さくなっていることがわかった。即ち，自由水の挙動が小さくなっている。

周期 T が 1.0 sec の場合，タンクの動揺と自由水重心の移動との間に，1/4 周期の位相遅れがある。

また，ここには示さなかったがモデルタンクの幅 B が長くなると，自由水重心の移動距離が大きくなっている。

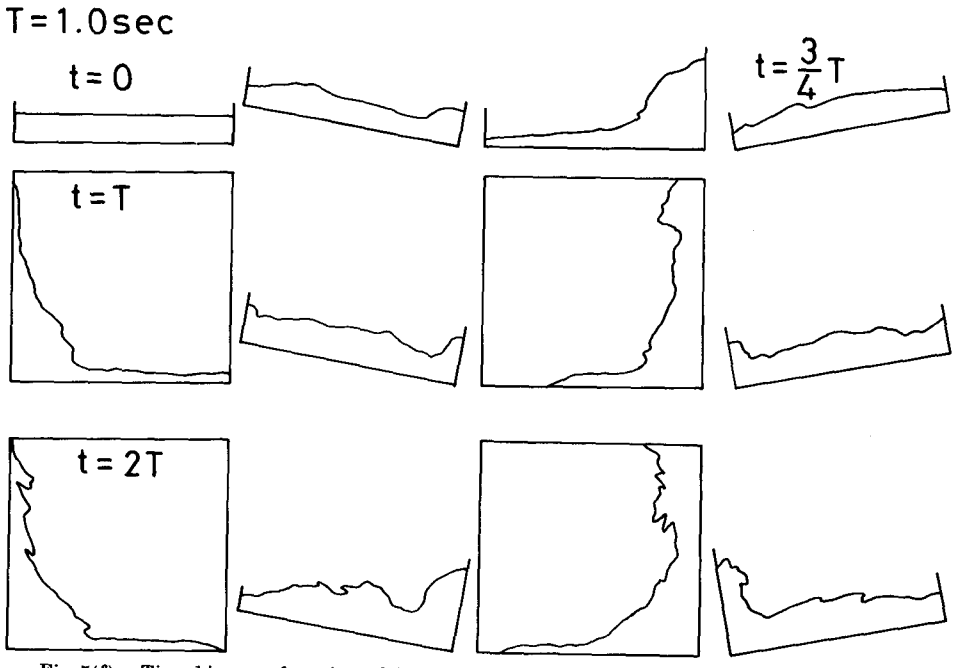


Fig. 5(f). Time history of motion of free water, loadage=10%, $\theta=10°$, $T=1.0$ sec, Tank 2.

Fig. 6(a)～(b) に示したように，計測台を動揺してから1周期分の動揺を除いて考えると，タンク内の自由水重心の移動は正弦曲線に近い運動を示すものと考えられる。1周期目の自由水重心の移動距離は，2周期目以降の1.1～1.2倍の移動距離がある。このことは，動揺装置が始動後，1周期目から設定した横揺れ角で動揺するために生じた現象であり，実船では起こりにくいことである。

以上の結果を解析して，自由水重心の移動は，次の実験式として推定することができた。

$$Y=\left(-0.134+1.513\theta+4.762\frac{1}{\omega_W}\right)\sin\omega_T t \tag{5}$$

ここで，Y(m) は船幅方向における自由水重心の移動距離，ω_W はタンク内の自由水の固有周波数で次式により与えられる。

$$\omega_W=\sqrt{g\frac{\pi}{B}\cdot\tanh h\frac{\pi}{B}} \tag{6}$$

$\omega_T=2\pi/T$ で，ω_T はタンクの動揺周波数である。

(5) 式により，任意のタンク幅 B 及びタンク内の自由水の水深 h, 横揺れ角 θ 及び動揺周期 T に対する，自由水重心の移動量がわかる。

3. 自由水挙動が船体に作用する力 δFy, δFz 及び横傾斜モーメント δMx

自由水影響により発生する力 δFy 及び δFz, 横傾斜モーメント δMx を (2～4) 式により無次元化した係数値 C_{Fy}, C_{Fz} 及び C_{Mx} を Table 4～6 に示す。また，これらの係数値と横揺れ周期 T, 横

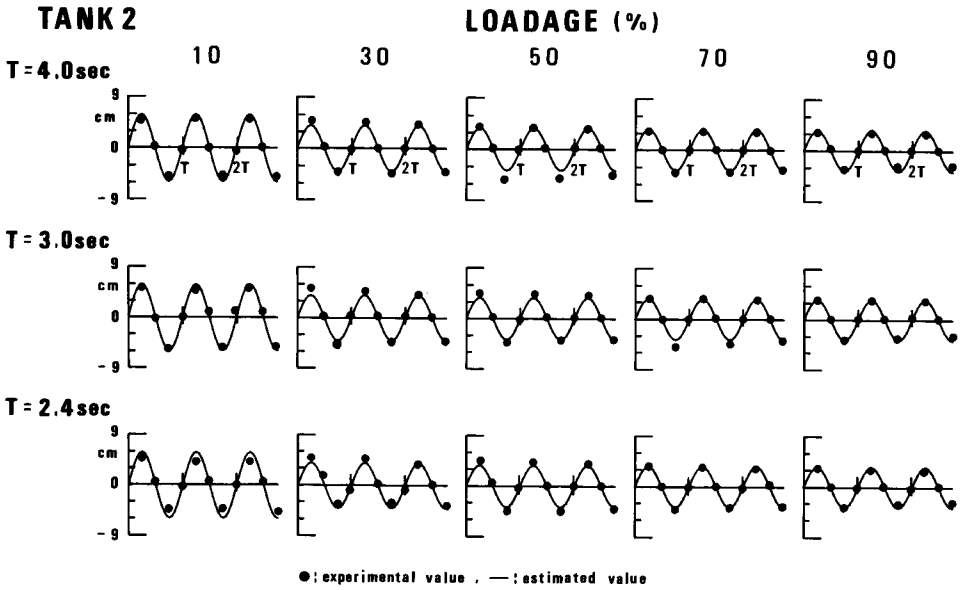


Fig. 6(a). Displacement of C.G. of moving water mass, loadage=10% $\theta=10°$, $T=4.0\sim2.4$ sec, Tank 2.

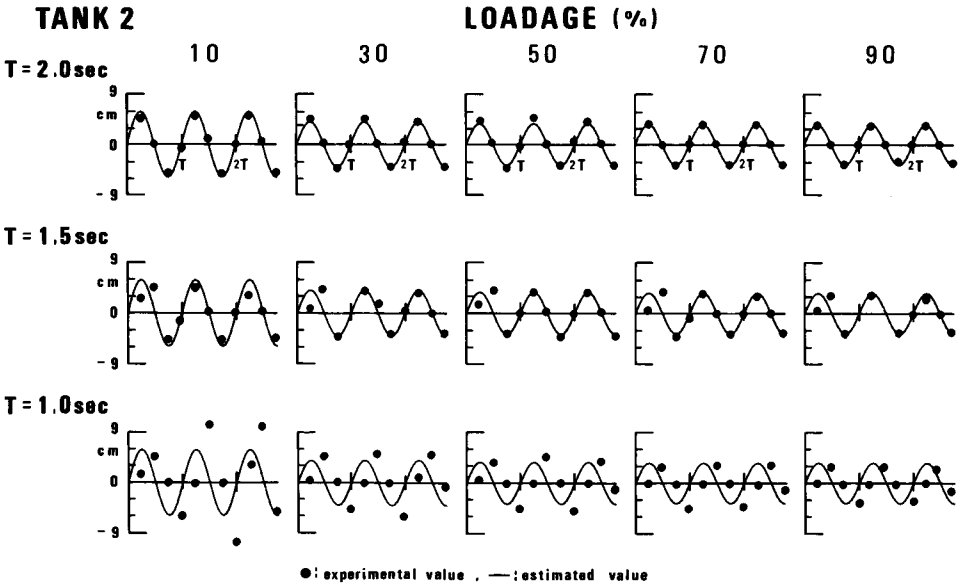


Fig. 6(b). Displacement of C.G. of moving water mass, loadage=10% $\theta=10°$, $T=2.4\sim1.0$ sec, Tank 2.

Table 4. Results of C_{Fy}, C_{Fz}, C_{Mx}, Tank1.

TANK1		10%			30%			50%			70%			90%		
θ deg	T sec	C_{Fy} $\times 10^{-3}$	C_{Fz} $\times 10^{-3}$	C_{Mx} $\times 10^{-3}$	C_{Fy} $\times 10^{-3}$	C_{Fz} $\times 10^{-3}$	C_{Mx} $\times 10^{-3}$	C_{Fy} $\times 10^{-3}$	C_{Fz} $\times 10^{-3}$	C_{Mx} $\times 10^{-3}$	C_{Fy} $\times 10^{-3}$	C_{Fz} $\times 10^{-3}$	C_{Mx} 10^{-3}	C_{Fy} $\times 10^{-3}$	C_{Fz} $\times 10^{-3}$	C_{Mx} $\times 10^{-3}$
	4.0	24	3	688	115	4	293	133	5	222	145	−6	199	145	6	190
	3.0	32	5	632	117	6	331	134	5	215	139	−9	215	144	7	192
	2.4	32	0	480	144	9	407	141	6	257	144	7	214	151	6	202
5	2.0	16	−12	312	181	10	484	170	8	293	144	5	36	162	7	201
	1.5	88	12	24	211	31	457	242	24	403	170	6	97	182	11	224
	1.0	−176	−7	−248	−123	24	−134	61	40	99	85	25	93	123	14	108
	0.5	−104	−48	−152	13	9	9	34	19	92	42	21	95	97	−10	88
	4.0	−80	6	848	197	17	624	214	34	445	277	23	428	265	24	347
	3.0	96	6	736	267	23	683	275	22	487	334	31	476	288	21	352
10	2.4	96	−4	640	309	25	715	301	26	506	313	23	439	295	25	349
	2.0	96	16	528	341	32	742	346	40	637	325	24	473	317	29	372
	1.5	96	22	288	373	65	694	416	70	711	398	53	572	320	36	338
	1.0	−272	6	−560	5	80	−5	131	74	413	192	53	181	276	57	244
	4.0	16	8	864	357	41	896	378	42	685	441	47	590	397	54	466
	3.0	96	4	784	384	57	934	407	55	739	439	55	620	404	48	475
15	2.4	112	8	736	411	51	950	458	61	800	473	55	663	414	54	480
	2.0	112	0	624	464	59	923	506	77	874	476	68	697	450	62	493
	1.5	144	28	480	496	107	854	544	104	832	492	79	659	436	78	470
	1.0	−256	88	−352	149	156	181	285	160	352	352	124	352	407	125	395
	4.0	80	16	768	373	65	1,014	512	91	941	503	79	727	551	93	601
	3.0	200	−10	848	520	93	1,083	552	92	1,021	543	86	759	556	89	567
20	2.4	200	30	768	547	100	1,088	600	104	999	589	93	796	574	99	598
	2.0	200	24	640	574	105	1,056	632	117	992	612	112	837	600	110	622
	1.5	240	34	512	587	145	971	640	153	839	595	129	727	578	136	580

Table 5. Results of C_{Fy}, C_{Fz}, C_{Mx}, Tank2.

TANK2		10%			30%			50%			70%			90%		
θ deg	T sec	C_{Fy} $\times 10^{-3}$	C_{Fz} $\times 10^{-3}$	C_{Mx} $\times 10^{-3}$	C_{Fy} $\times 10^{-3}$	C_{Fz} $\times 10^{-3}$	C_{Mx} $\times 10^{-3}$	C_{Fy} $\times 10^{-3}$	C_{Fz} $\times 10^{-3}$	C_{Mx} $\times 10^{-3}$	C_{Fy} $\times 10^{-3}$	C_{Fz} $\times 10^{-3}$	C_{Mx} 10^{-3}	C_{Fy} $\times 10^{-3}$	C_{Fz} $\times 10^{-3}$	C_{Mx} $\times 10^{-3}$
	4.0	−13	−1	70	55	3	63	70	3	65	76	4	69	83	3	80
	3.0	0	3	98	56	3	64	73	3	67	77	3	72	84	3	82
	2.4	9	2	109	59	2	62	75	3	67	77	4	74	84	3	84
5	2.0	9	2	116	62	2	64	85	3	74	77	3	71	84	3	85
	1.5	31	6	119	70	5	75	84	5	76	87	3	83	97	4	92
	1.0	62	23	62	119	20	114	103	13	88	100	12	94	106	10	101
	0.5	−76	−136	−53	−7	5	−2	44	−15	36	62	23	50	76	23	64
	4.0	−116	2	194	86	12	121	126	12	129	137	14	143	151	14	170
	3.0	−18	3	202	124	11	133	146	12	136	155	13	150	155	13	168
10	2.4	−18	1	225	124	11	128	153	12	136	155	13	152	165	15	171
	2.0	0	9	230	142	15	146	174	18	159	187	22	168	170	17	180
	1.5	18	9	163	148	19	153	174	20	154	177	20	165	187	21	183
	1.0	80	112	111	234	67	210	215	47	182	208	41	189	207	42	193
	4.0	−62	−18	237	175	22	183	201	28	193	220	28	214	235	30	235
	3.0	−36	0	215	184	26	200	208	28	194	231	30	219	239	29	243
15	2.4	−9	−1	237	172	22	193	210	28	193	239	29	222	250	30	250
	2.0	9	2	230	202	30	215	263	37	233	264	23	255	255	34	258
	1.5	27	15	222	222	45	247	249	44	225	267	44	250	267	48	273
	1.0	36	141	104	338	147	311	327	113	293	310	97	294	290	91	282
	4.0	−89	−14	237	222	34	232	285	45	258	311	51	290	316	55	311
	3.0	−22	−6	274	230	39	264	289	48	265	308	50	295	324	51	315
20	2.4	−22	17	252	259	57	287	289	52	273	321	54	300	338	54	323
	2.0	22	13	252	289	58	291	333	67	305	346	73	332	338	63	334
	1.5	−44	19	222	304	84	291	338	87	317	356	81	341	348	91	347

Table 6. Results of C_{Fy}, C_{Fz}, C_{Mx}, Tank3.

TANK3		10%			30%			50%			70%			90%		
θ deg	T sec	C_{Fy} $\times 10^{-3}$	C_{Fz} $\times 10^{-3}$	C_{Mx} $\times 10^{-3}$	C_{Fy} $\times 10^{-3}$	C_{Fz} $\times 10^{-3}$	C_{Mx} $\times 10^{-3}$	C_{Fy} $\times 10^{-3}$	C_{Fz} $\times 10^{-3}$	C_{Mx} $\times 10^{-3}$	C_{Fy} $\times 10^{-3}$	C_{Fz} $\times 10^{-3}$	C_{Mx} 10^{-3}	C_{Fy} $\times 10^{-3}$	C_{Fz} $\times 10^{-3}$	C_{Mx} $\times 10^{-3}$
	4.0	38	−19	218	69	2	89	76	3	65	91	3	57	83	3	56
	3.0	52	−14	200	73	4	101	82	3	70	85	4	62	84	2	60
	2.4	60	−19	176	95	2	121	90	3	74	102	3	65	90	4	61
5	2.0	48	−22	114	119	6	144	103	4	87	96	4	72	97	4	63
	1.5	−4	9	45	131	13	141	146	13	126	119	8	88	112	6	64
	1.0	−72	1	−46	−61	−13	−18	40	−2	46	79	3	50	72	2	33
	0.5	−54	−19	−27	−36	−12	−17	10	−5	4	25	0	20	71	12	30
	4.0	−16	−3	284	115	8	184	134	12	132	149	13	123	154	13	99
	3.0	80	0	268	155	10	221	168	11	145	177	15	131	166	11	99
10	2.4	88	−3	232	181	11	225	179	14	156	180	14	135	169	13	100
	2.0	80	−1	204	205	17	231	213	23	191	200	18	148	180	16	110
	1.5	88	16	148	243	19	223	255	41	219	236	32	173	181	13	93
	1.0	−200	−19	−152	3	−62	215	77	−35	34	133	−4	69	161	19	74
	4.0	56	−14	296	208	22	275	225	24	200	238	26	177	234	28	136
	3.0	88	−16	276	232	25	284	247	27	218	237	26	177	242	23	138
15	2.4	112	−11	260	255	27	280	273	32	242	266	32	194	258	26	140
	2.0	136	−7	224	281	32	276	305	40	262	284	37	205	265	32	143
	1.5	120	16	196	300	57	283	316	52	253	306	48	206	262	27	130
	1.0	−112	29	−40	144	−61	115	242	−12	248	245	18	118	248	44	116
	4.0	48	−53	284	273	−3	309	316	45	283	312	34	221	322	47	170
	3.0	140	−15	296	307	15	438	332	49	294	317	43	228	325	44	176
20	2.4	140	−5	280	333	18	339	356	56	312	352	55	244	336	49	180
	2.0	148	−6	248	360	24	336	376	16	307	369	65	249	342	56	182
	1.5	136	4	196	367	38	301	392	84	282	380	53	236	342	52	163

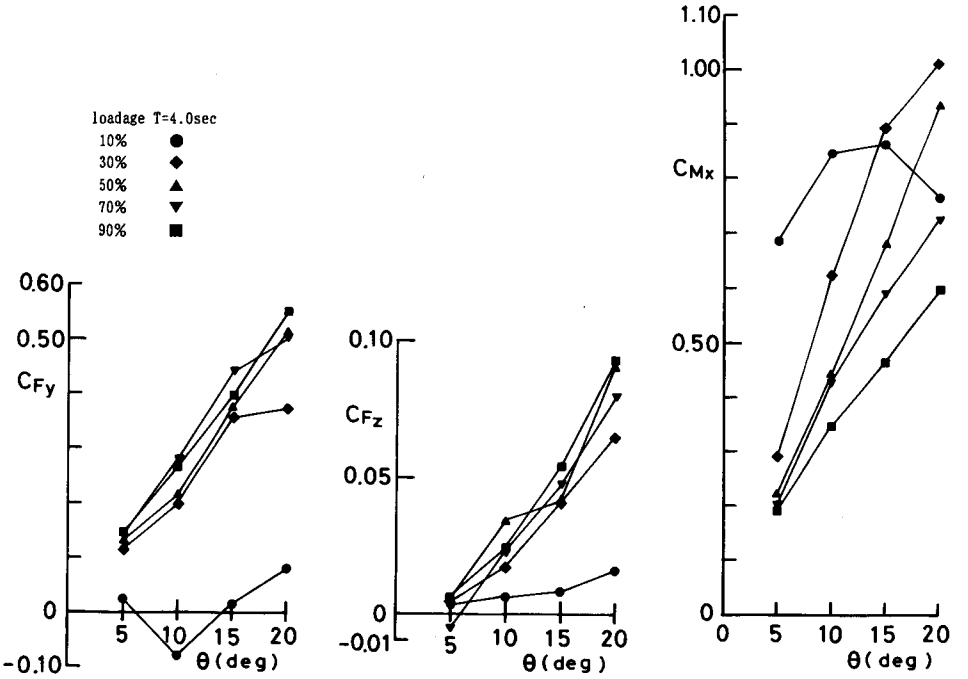


Fig. 7(a). Experimental values of C_{Fy}, C_{Fz}, C_{Mx}, $T=4.0$ sec, Tank 1.

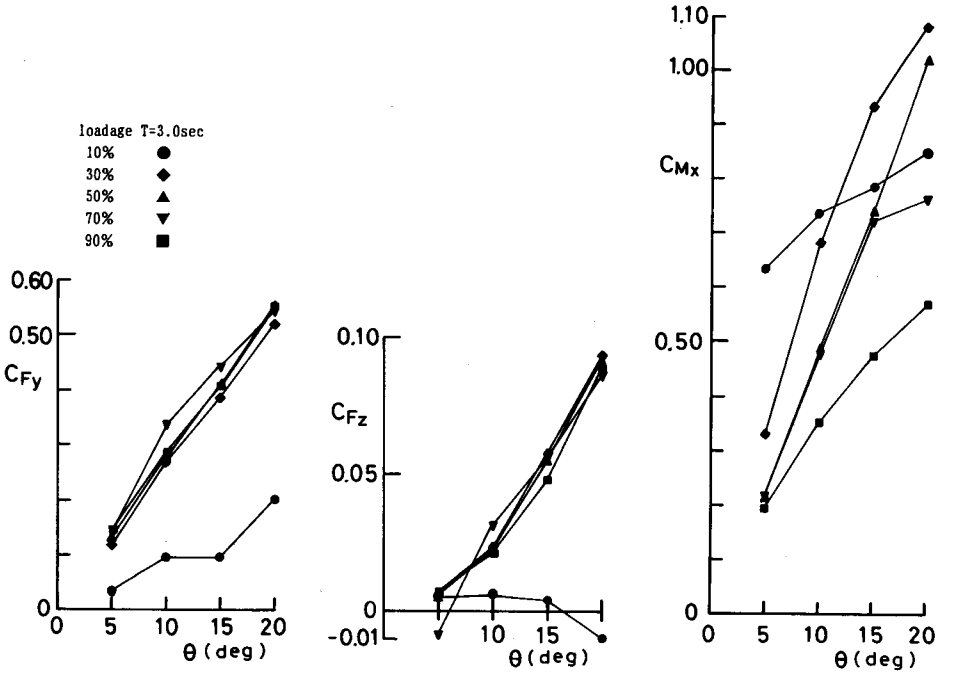


Fig. 7(b). Experimental values of C_{Fy}, C_{Fz}, C_{Mx}, $T=3.0$ sec, Tank 1.

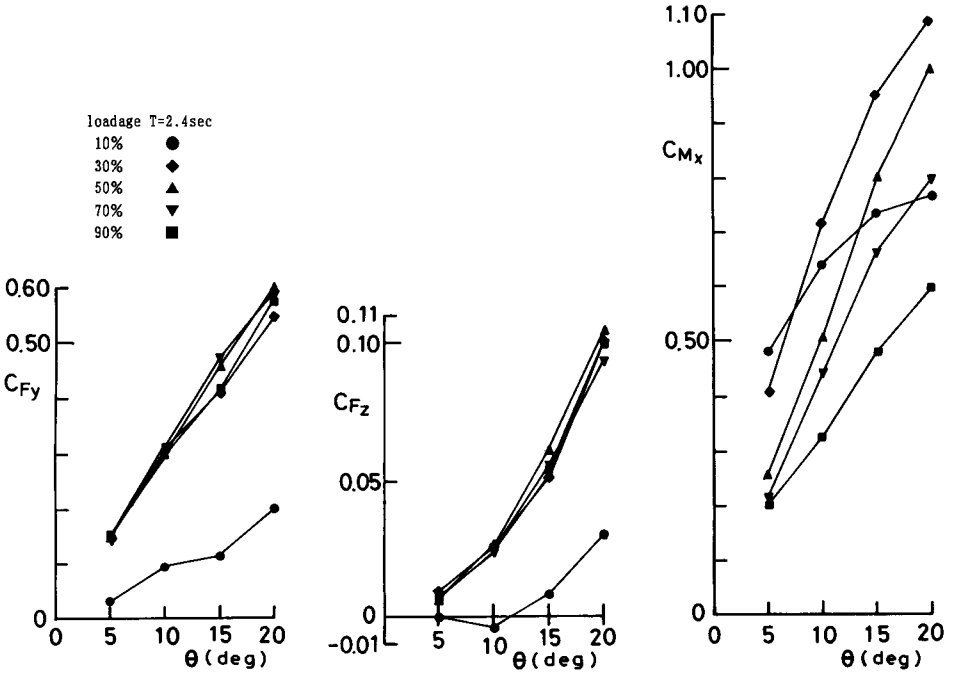


Fig. 7(c). Experimental values of C_{Fy}, C_{Fz}, C_{Mx}, $T=2.4$ sec, Tank 1.

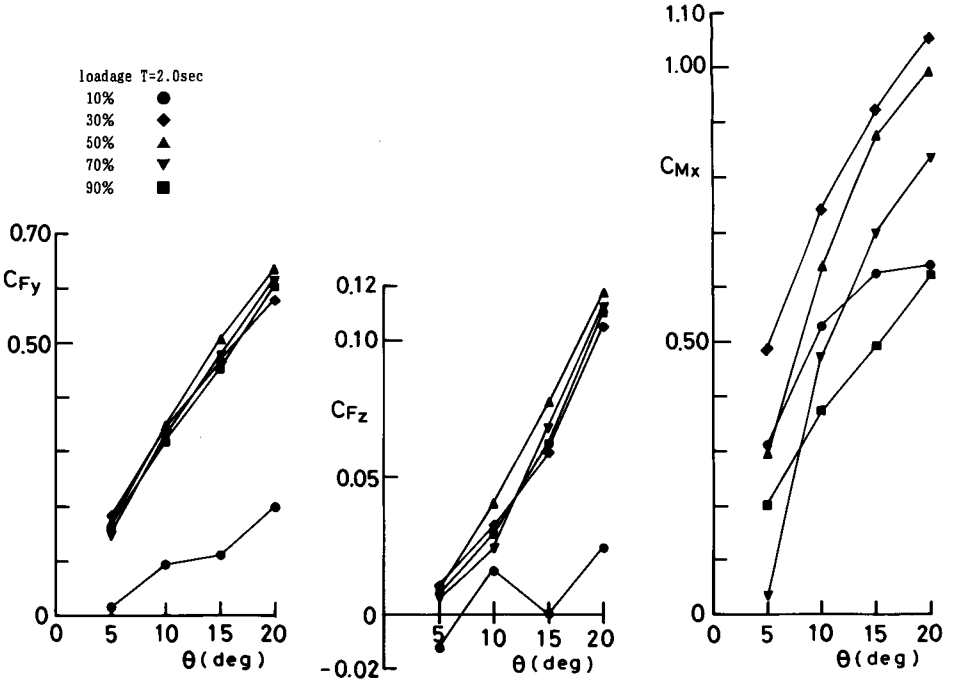


Fig. 7(d). Experimental values of C_{Fy}, C_{Fz}, C_{Mx}, $T=2.0$ sec, Tank 1.

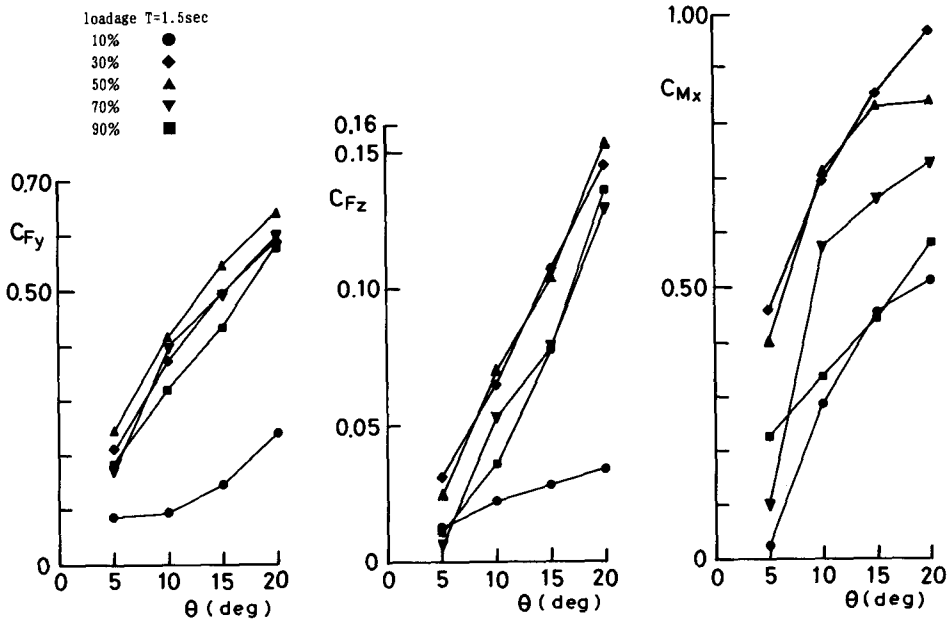


Fig. 7(e). Experimental values of C_{Fy}, C_{Fz}, C_{Mx}, $T=1.5$ sec, Tank 1.

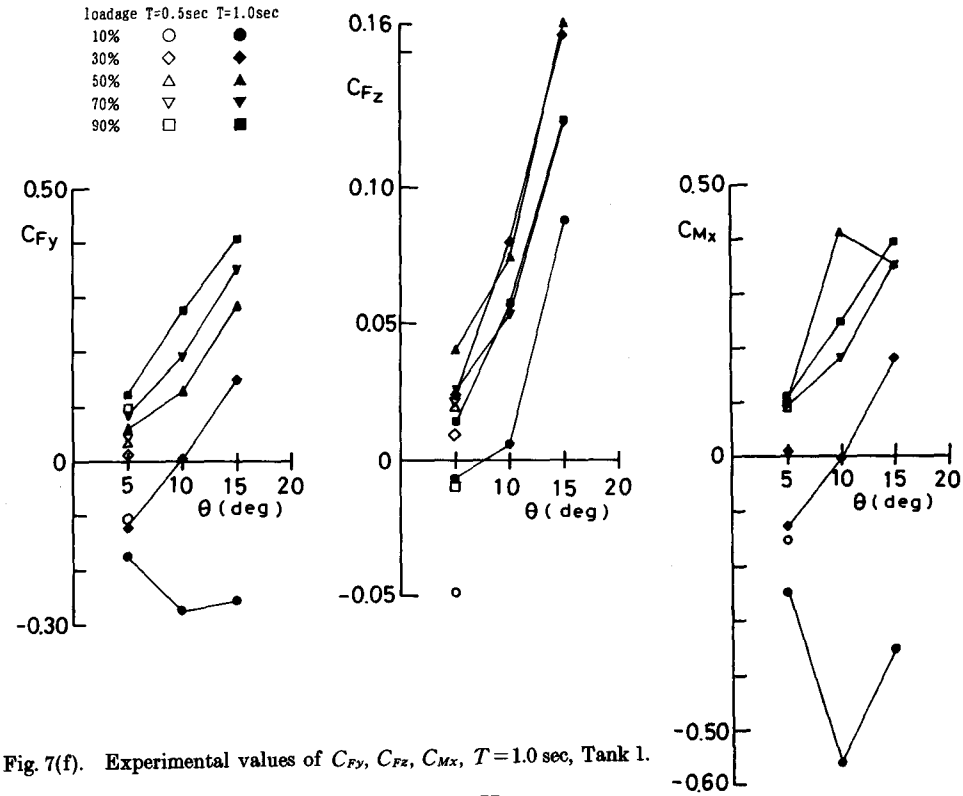


Fig. 7(f). Experimental values of C_{Fy}, C_{Fz}, C_{Mx}, $T=1.0$ sec, Tank 1.

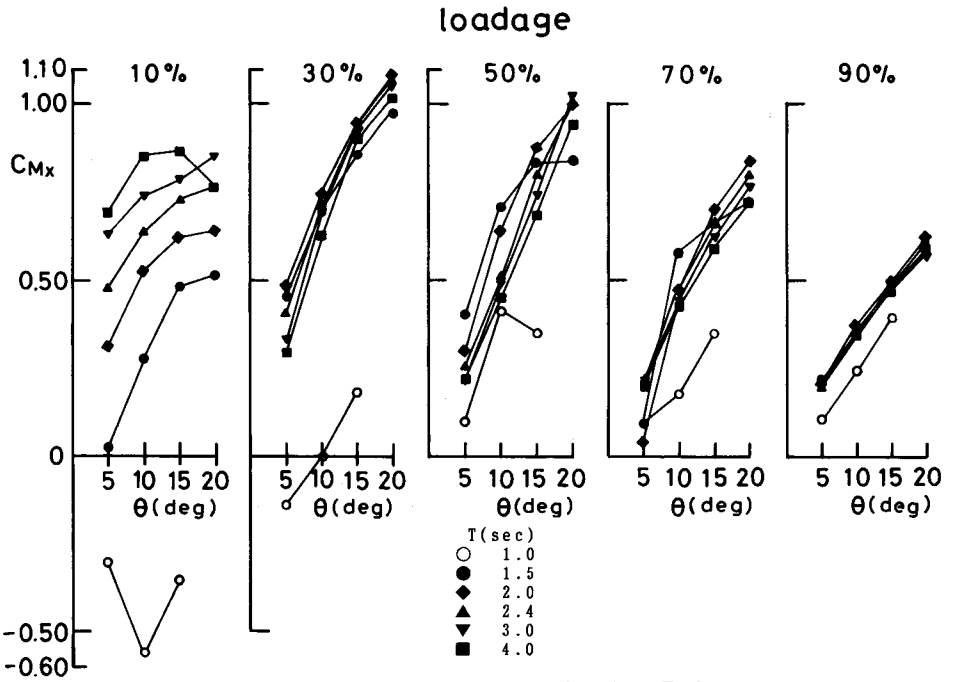


Fig. 8. C_{Mx} values for the changes of loadage, Tank 1.

揺れ角 θ 及びタンクの自由水量 w との関係を，Tank 1 の場合について Fig. 7(a)～(f) に示した。これらの図は，横軸に横揺れ角 θ をとり，周期 T における自由水量 w 別の力及び横傾斜モーメントの係数値を示したものである。

自由水量 10% の場合，C_{Mx} の値は横揺れ周期が 2.4 sec 以上で横揺れ角が小さいにも関わらず他の水量より大きな値となっている。また，横揺れ周期が 3.0 sec 以上で横揺れ角が 20° の時自由水量が 70% や 90% の場合より大きくなっている。このことは，Z 軸方向の自由水の重心移動が大きい事による動的影響が含まれているものと思われる。そして，横揺れ角が大きくなると C_{Mx} の値は自由水量 30% の場合に最も大きな値をとることが注目される。

次に，C_{Mx} の値に関して横軸に横揺れ角をとり，各水量毎の横揺れ周期別のグラフを Fig. 8 に示す。これを見ると，自由水量 10% の場合は，横揺れ周期が増大するにつれ，横傾斜モーメントの係数値 C_{Mx} も大きくなる。自由水量 30% 以上の場合は，横揺れ周期に関係なく C_{Mx} の値はほぼ一定であると言える。ただし，横揺れ周期 1.0 sec の場合は，他の周期の場合に比べ C_{Mx} の値が非常に小さな値となる。この傾向は自由水量が少ないほど顕著であるが横揺れ周期 1.0 sec で，計測台の動揺と自由水の挙動との間に位相差が発生したためであろう。また自由水量 10% の場合の一部に負の値となっているが，これは同質量の固体を積んだ場合よりも自由水を積んだ場合の方が減揺水槽と同じく船体の横揺れを抑制する作用を示しているものであると思われる。

(5) 式で推定した自由水重心の移動量 Y とその重量とから，復原性に最も重要な自由水挙動により発生する横傾斜モーメント δMx は，次式で与えられる。

$$\delta Mx = Y \times (\rho \cdot g \cdot L \cdot B \cdot h) \tag{7}$$

(7) 式は，次のように無次元化することにより，自由水重心の移動量 Y に基づく係数 C_{Mx} が推定される。

$$C_{Mx(E)}=\frac{Y}{B} \tag{8}$$

タンク内自由水の挙動を考慮した復原性

自由水影響を修正した復原力の推定式として

$$S=\mathrm{W}\cdot\overline{\mathrm{GZ}}-\mathrm{w}\cdot Y \tag{9}$$

式を提案する。

実際に現場において自由水タンクを管理する場合，タンク幅 B が長くなる程 C_{Mx} の値は大きくなると考えてよいことから，タンク幅の長いものから順に，タンク内の自由水量を空載もしくは満載に近づけることが適正な処置と思われる。また，C_{Fy}, C_{Fz} の値も，タンク幅が長くなるに従って大きくなっていることより，船体の強度面からも，可能なかぎり船内タンクの幅を小さなものとした方が良いことは言うまでもない。

結　　論

① 自由水の挙動は，横揺れ周期が 1.5～4.0 sec では，タンクの横揺れに追従しているが，横揺れ周期が 1.0 sec 以下では 1/4 周期の位相遅れがみられた。

② タンクの横揺れによる自由水重心の移動は，正弦曲線に近い運動を示し，次の実験式として推定することができた。

$$Y=(-0.134+1.513\theta+4.762\frac{1}{\omega_W})\sin\omega_T t$$

③ 復原性に最も重要な影響を及ぼす自由水の挙動によって発生する横傾斜モーメントは

$$\delta Mx=Y\times(\rho\cdot g\cdot L\cdot B\cdot h)$$

で与えられる。

④ 自由水の挙動によって発生する船体横方向の力 Fy は，タンク幅 B が大きくなるに従って大きくなり，船体上下方向の力 Fz も同様に大きくなる。

⑤ 自由水影響を修正した復原力は，

$$S=\mathrm{W}\cdot\overline{\mathrm{GZ}}-\mathrm{w}\cdot Y$$

で求めるのが妥当である。