

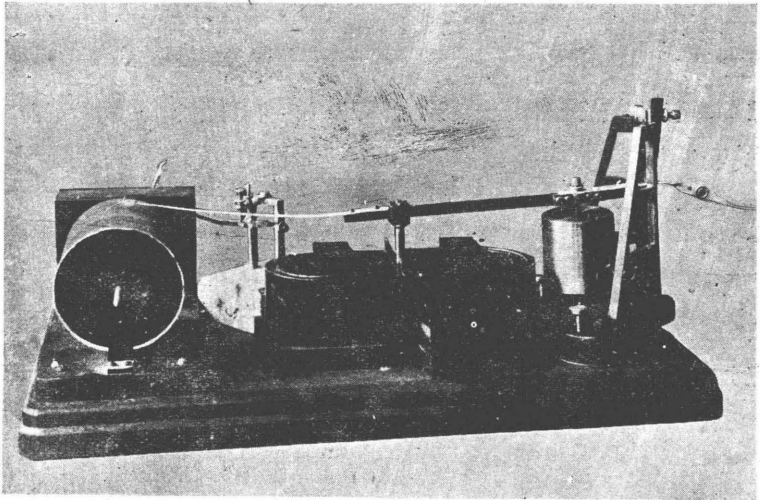
振動計に依る凌風丸動搖觀測

森田 稔, 門脇 関郎, 波佐谷慶孝

筆者等は昭和 12 年 10 月 31 日東京芝浦出航の中央氣象臺海洋觀測船凌風丸⁽¹⁾に便乗し, 同船が 11 月 5 日那覇港に入港する迄途中海上數ヶ所に於て携帯用振動計に依り船體動搖の記録をとつた。今其の記象紙を驗測し, 船體動搖の有様, 浪の模様其他に就き若干の結果を得たので, 茲に報告する次第である。

1. 振動計 今回實測に用ひた振動計は第 1 圖に示す如きものである。之

第 1 圖 振 動 計 寫 眞



は地震掛に於て輕便を旨とし, 強震計を改造して作つた携帯用振動計で 55.8 cm×31.0 cm の臺上に水平振子 1 成分を裝備し, 磁氣制振器を備へ, 大約次の如き常數を持つものである:

(1) 凌風丸は淺川彰三教授の設計になり, 播磨造船所に於いて建造され昭和 12 年 5 月進水せる中央氣象臺海洋觀測船で, 長さ 69.18 m, 幅 10.59 m, 深さ 5.11 m, 總噸數 1,179.82 噸, 最大速力 14.5 ノットである。又船體の極めて概略の形は第 3 圖の如くである。

$M; 1.9 \text{ kg} \quad V; 6.5 \quad T_0; 2.0 \sim 2.6 \quad v = 2.0 \sim 4.0$

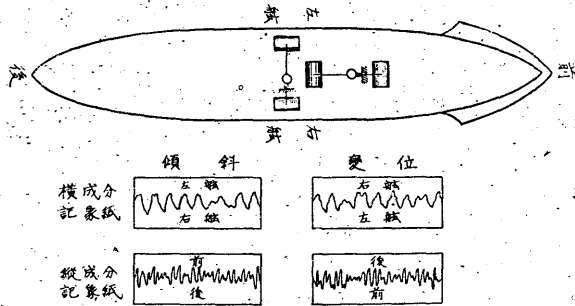
ドラムはゼンマイ起動機に依つて廻轉し、其廻轉速度は風切翼の大きさを變へることに依り可成り廣範圍に變じ得る。今回の測定では記象紙上の 1 分間の長さが 60 mm 前後となる様にした。刻時はストップウォッチに依り大抵 30 秒毎に圖の打點器を用ひて記象の傍に打點した。

此振動計は船體の動搖の如き廣角度の傾斜動を測定する目的には倍率、週期共に大に過ぎる。そこで倍率に對しては別に短い描針を調製し、之を今迄の描針の反對側に取付け、大小兩方の倍率で測定が出来る様にした。寫眞で重錘支柱の右側に見えるのが即ちそれである。之によると倍率を 1.8~2.2 に下げることが出来る。次に週期を落す爲には必要に應じ高さ 67 mm 及び 113 mm の二つの木臺を枕として振動計の臺の一端に挿入し、之を傾斜せしめる方法を探つた。夫等の場合には振子の固有週期は夫々 1.5 秒及び 1.3 秒となる。

實測に際しては、船體の動搖の程度に應じ、倍率及び週期を上述の範圍に於て種々に變じて觀測を行つた。各回の觀測に於ける振動計の常數は次節の表に示す如くである。

又、振動計は船中に於ける觀測場所の如何に關らず、船體に對し常に第 2 圖の如き向きに据付けられた。依つて船體の傾斜及び變位の方向に對應する縦横各成分の記象紙上の方向は夫々圖の如くなる。之は長短何れの描針に就ても同様である。

第 2 圖 振動計設置方向及び記象紙上に於ける船體運動の方向



2. 觀測 觀測は 10 月 30 日船が芝浦港に碇泊中より開始し、那覇港に入港する迄の間、斷續的に 21 回行ひ、20 枚の記象紙を得た。觀測の日時、當時の船の位置、船中に於ける觀測場所、觀測せる成分、當時の振動計の常數、當時の氣象並びに海上の状態（凌風丸上の觀測による）及び夫等に對應する記象

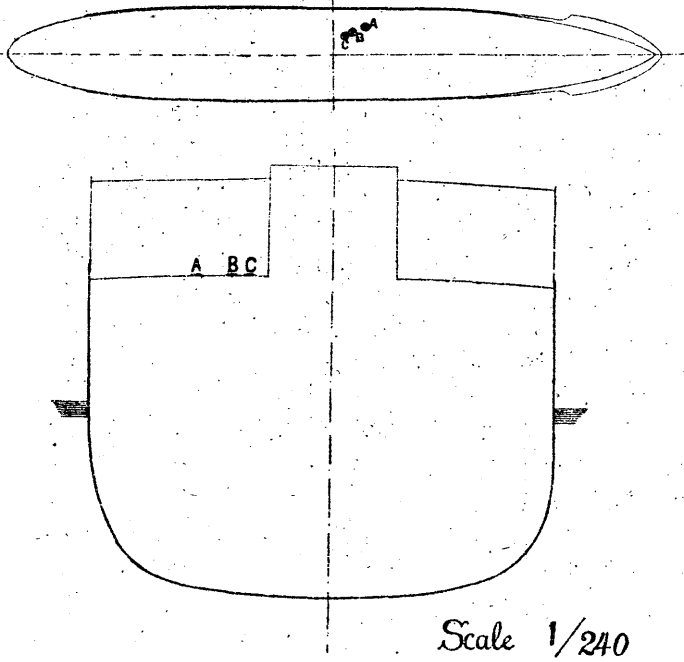
紙の番號等を一括して表示する。

記 象 紙 號	月 日	時 刻	觀 測 場 所	船 の 位 置			觀 測 成 分	振動計常數			氣 象 狀 態			波 浪	
				北緯	東經	記 事		V	T ₀	r	風向	風速	雲量	方向	階級
1	X 30	10 50	A	35 38	139 46	芝浦碇泊中	縱	0.5	2.3	3.9	s	^{m/s} 6.1	10	—	—
2		11 10	A	35 38	139 46	同上	橫	6.5	2.3	3.9	s	6.1	10	—	—
3		7 00	B	35 38	139 46	同上	縱	6.5	2.0	3.0	NNE	3.9	10	—	—
4		7 20	C	35 38	139 46	同上	橫	6.5	2.0	3.0	NNE	3.9	10	—	—
5		8 45	C	35 38	139 46	同上	縱	6.5	2.0	3.0	N	4.1	10	—	—
6		9 15	C	35 38	139 46	同上	橫	6.5	2.0	3.0	N	4.1	10	—	—
7		10 20	C	35 38	139 46	芝浦出航後	橫	2.2	2.0	3.0	N	3.7	10	—	—
8		10 39	C	35 38	139 46	同上	橫	2.2	2.0	3.0	N	3.5	10	—	—
9		11 00	C	35 32	139 44	同上	縱	2.2	2.0	3.0	N	3.5	10	—	—
10		12 30	C	35 21	139 45	東京灣口	橫	1.8	1.3	2.0	N?	—	10	NNE	3
11		13 00	C	35 12	139 45	三浦半島沖	縱	2.2	2.0	3.0	—	—	10	NNE	3
12	XI 2	15 35	C	33 15	134 10	室戸碇泊中	縱	2.2	2.0	3.0	—	—	10	ENE	1
13		16 00	C	33 15	134 10	同上	橫	1.8	1.3	2.0	—	—	10	ENE	1
14		3 18 00	C	30 27	130 11	屋久島碇泊中	縱	2.2	2.0	3.0	—	—	9	—	—
15		21 40	C	30 27	130 11	同上	橫	2.0	1.5	2.2	—	—	—	—	—
16		22 00	C	30 27	130 11	同上	縱	2.2	2.0	3.0	—	—	—	—	—
17		4 9 30	C	30 04	130 10	屋久島出航直後	橫	1.8	1.3	2.0	—	—	3	NNW	2
18		10 30	C	30 14	130 15	屋久島一名	縱	2.0	1.5	2.2	—	—	2	SW	2
		12 10	C	29 53	130 06	瀬名瀬	縱	2.2	2.0	3.0	WNW	1.8	4	—	1
19		5 8 20	C	26 44	127 40	瀬一那瀬	縱	2.2	2.0	3.0	—	—	0	SE	2
20		8 40	C	26 31	127 38	同上	橫	2.2	2.0	3.0	—	—	0	SE	2
							橫	2.0	1.5	2.2	—	—	—	—	—

船中に於ける觀測場所の欄に A, B, C とあるは夫々觀測員室机上、圖書室机上及び同室床上を指すもので、夫等の位置は第 3 圖に掲げる通りである。觀測成分の中、縱とあるのは振子の振動方向が船の縱軸と平行の場合、横とあるのはそれが横軸と平行の場合である。

觀測は船の動搖角が餘り大きくない時に限つて行つた。従つて船の最大動搖角の如きは測定出来なかつた。又振動計は一成分のみを携帶したので縱横兩方向の同時の記象或は縱横上下三方向の同時の記象などをとることは出来なかつた。今回の觀測に依り縱横上下三成分の同時の測定が如何に必要であるかが痛感された。

第3圖 船中に於ける観測場所



3. 驗測及び調査 20枚の記象紙を驗測し、船體に固有な横揺及び縦揺の週期並びに減衰比、波浪の週期及び減衰比等を求めた。又長週期の波動らしいもので性質不明のものが記象上に現れてゐることを知り、それに就て少し詳しく調べた。以下驗測並びに調査の結果に就き各項別に記す。

1) 横揺 第4圖に船體固有の横揺の記象2つを示す。今假りに船體の動揺が高橋・伏見⁽¹⁾兩氏のモデルに適合するものとして、No. 13の記象を高橋・伏見の方法に依り解析して見ると第5圖の如き横揺の曲線を得る。之より横揺の週期 T_R 及び減衰比 v_R を求めると、

$$T_R = 12.5, \quad v_R = 1.2$$

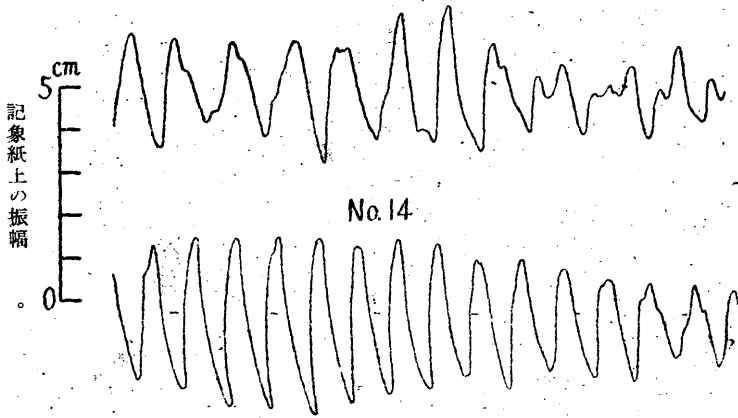
を得る。

次に No. 14の記象より相次ぐ22個の週期を讀取り、其等を平均すると次

(1) K. Takahasi and K. Husimi, Geophys. Mag. 9, 29-48 (1935)

第4圖 横揺の記象例 (刻時 30秒毎)

No. 13



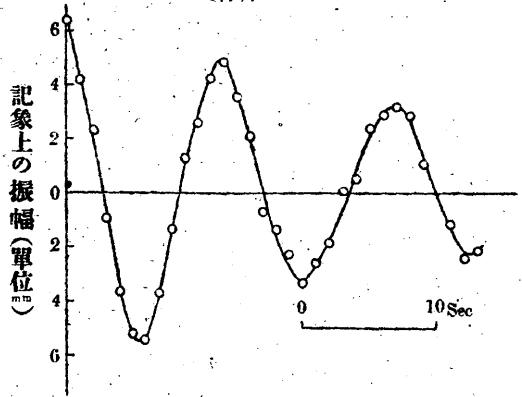
第5圖 高橋・伏見の方法による横曲線
(材料 No. 13)

の如き値を得る：

$$T_R = 12.2 \pm 0.5$$

(平均誤差)

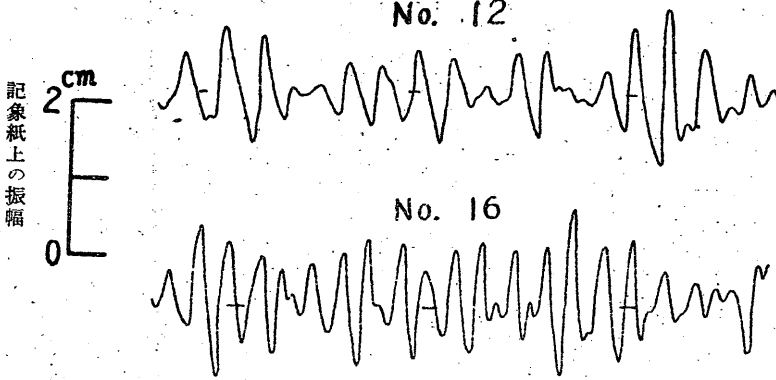
船體の固有動揺週期は載荷量其他の條件に依り必ずしも一定でないで、夫等の條件を與へないで單に其の數値のみを言ふことは妥當でないかも知れないが、併しそれ等に依る週期の變化は小なるものである。



今回の測定の結果としては、大體上の二つの値を平均し、12.4 秒程度を以て凌風丸の固有横揺週期とする。

2) 縦揺 第6圖に縦揺の記象二つを示す。No. 16 及び No. 12 を高橋・伏見の方法に依り解析すれば夫々第7圖及び第8圖の如き縦揺の曲線を得る。之等の各々より求められる縦揺の週期 T_P 及び減衰比 v_P は次の如くである

第 6 圖 縦揺の記象例 (刻時 30 秒毎)



No. 12: $T_P = 4.6$

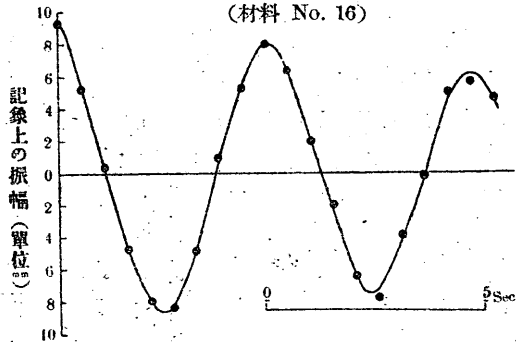
$v_P = 1.4$

No. 16: $T_P = 4.5$

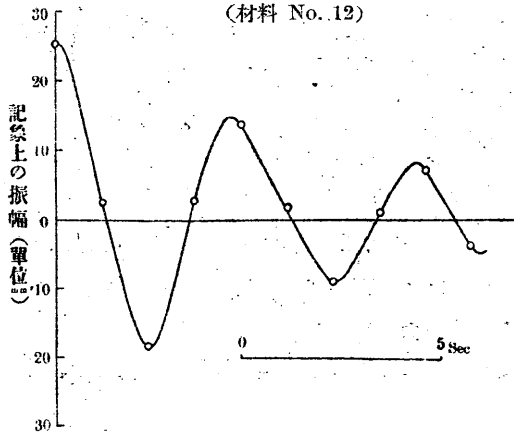
$v_P = 1.1$

No. 12 に依る結果は記象其儘より讀取つた値を解析して得られたもの、No. 16 に依る結果は寫眞に依つて記象を約 4 倍に擴大したものから讀取つた値を解析して得た結果である。之等二つの結果には若干の相違があるが、一方は讀取を粗く行つた代りに材料が廣範圍に亘つて求められて居り、一方は材料を狭範圍から取つた代りに讀取が

第 7 圖 高橋・伏見の方法に依る縦揺曲線 (材料 No. 16)



第 8 圖 高橋・伏見の方法に依る縦揺曲線 (材料 No. 12)



細かいので、二つの結果の優劣は遽に論じ難い。何れかと云へば週期は No. 12 に依る結果の方が正確で、減衰比は No. 16 に依る結果の方が信用度が高い。

最初、減衰比が横揺と縦揺とで如何に異なるかが實測によつて求まることを期待したのであるが、此調査の結果からは如何とも判定出来ない。それには振動計に依る測定の方法を今少しく改良せねばならない。

3) 風波 第 9 圖に風波に因る船體動搖の記象例を示す。之は船が芝浦碇

第 9 圖 風波に因る動搖の記象例 (刻時 30 秒毎)

No. 6

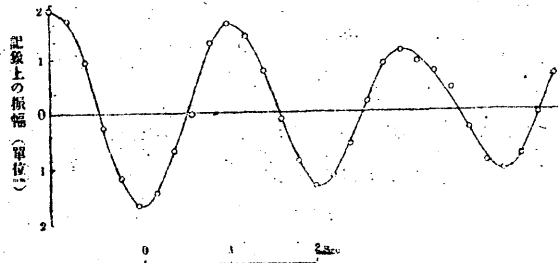


泊中横成分の記象上に現れたその一例で、形の整つた點に於て全 20 枚の記象紙中最も優れたものである。此記象は振動計の振子が風波による船體の動搖に共鳴して描かれたものであることは一見明かであるが、振子には制振作用が働いてゐるから、斯の如く振幅の揃つた記象が描かれる爲には外力が振幅相當大で、而も週期の一定なものでなければならぬ。そこで此部分を原紙の約 5 倍に擴大し、高橋・伏見の方法に依り解析して見た。其結果を第 10 圖に示す。之より風波に因る船體動搖の週期及び減衰比として、

$$T_{11} = 2.09, \quad \nu_{11} = 1.17$$

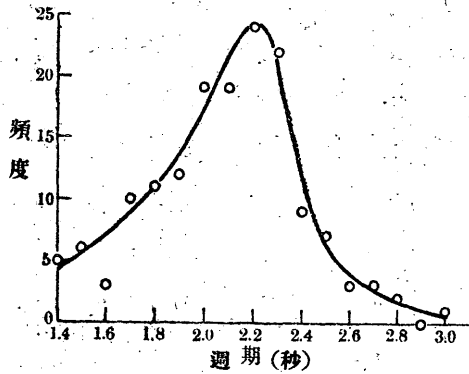
を得た。

第 10 圖 高橋・伏見の方法に依つて求めた風波による船體動搖曲線 (材料 No. 6)



又別に芝浦碇泊中の記象紙 No. 2, 4, 6 より風波に因る動搖の週期 156 個を讀取り、その 0.1 秒毎の頻度を調べた。其結果は第 11 圖の如くなり、頻度の極大は週期約 2.2 秒の所に現れた。即ち上述の高橋・伏見の方法に依る値と略々同一となつた。頻度曲線によつて週期を求めることは振動計の固有週期の影響を蒙る譯で良法とは云い難いが、振子の制振作用が可成りよく利いてゐるので、さして誤はないものと思はれる。

第 11 圖 風波による動搖の週期の頻度曲線



俵て上に示した週期及び減衰比は直接には風波に因る船體動搖の週期及び減衰比であるが、これは風波其物の週期及び減衰比と考へて差支ないことが推論される。第 6 節に示す如く波浪の波長が船體の大きさに比して長い時には、船體は自由動搖と波浪の週期を以ての強制動搖とを同時になすものであるが、波長が短い場合にも週期に就ては同様の關係が成立つことは簡単に推定される。今の場合に風波の波長を計算して見るに、一般にトロコイド波の週期を T とし、水深を h とすれば、波長 λ は

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda} \dots\dots\dots (1)$$

より求められ、之に $T=2.09$ を入れ、又芝浦の水深を 7.0 m とすると、波長は 6.8 m と計算される。之は凌風丸の幅の約 7/10、長さの約 1/10 である。又此の週期は船體固有の動搖週期とは大分距つてゐるから、上述の減衰比は風波其物の減衰比を示すものと見做されるのである。

尙ほ風波に因る船體動搖の縦横兩成分に於ける振幅の比は、No. 1 と No. 2 とを組合せて求めて見ると平均 2.3 倍、No. 5 で求めると平均 2.7 倍丈け何れも横成分の方が大きい。

波浪による動搖は航行中の記象には餘り現れない。之は船體 固有動搖が優

勢になる爲にそれに蔽ひ隠されて了ふからである。勿論全然認められない譯ではなく、又週期の測定も可能であるが、航行中の記象に於ける週期はドプラー効果の影響を受けた見掛の週期であること、縦成分では速度の小さなフレに因る短週期動揺を顧慮せねばならぬこと等の爲めに風波の週期は停船中の記象から讀取るのが無難である。

今、凌風丸が 11 ノットで走つてゐる時、眞の週期 3 秒の波浪（表面波）に對しドプラー効果による影響が何の程度に利くかを調べて見よう。ドプラー効果を表す式は、

$$T = \frac{1}{1 - \frac{V}{v} \cos \alpha} T_0$$

茲に T は見掛の週期、 T_0 は眞の週期、 v は波浪の速度、 V は船の速度、 α は波浪の進行方向と船の進行方向とのなす角である。又週期 T_0 秒の表面波の群波速度 v は

$$v = \frac{g T_0}{4\pi}$$

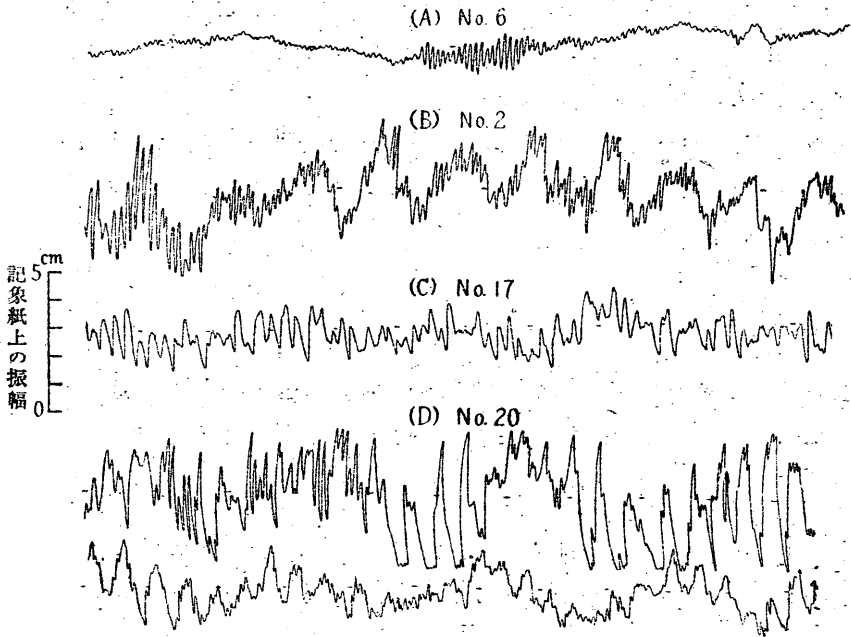
但し之は波長に比べて水深がすつと大きい所に於ける値である。この式に於て $T_0 = 3.0$ とすれば、 $v = 2.3$ m/sec となる。一方凌風丸の速度を秒速に直すと 5.7 m/sec である。之等の値を上式に代入すれば、

$$T = \frac{3.0}{1 - 2.5 \cos \alpha}$$

α の或範圍の値に對しては T が負の値となるが、その時は絶対値をとればよい。 α に二三の値を入れて見掛の週期を求めて見ると、 $\alpha = 0$ 即ち船が波の進行方向と同一方向に進む場合には $T = 2$ 、 α が大となるに従ひ T も増し、 $\alpha = 60^\circ$ では $T = 12$ となり、 α が約 66° で $T = \infty$ となる。それより α が大となれば T は漸次減少し、 $\alpha = 90^\circ$ で $T = T_0 = 3$ となり、 $\alpha = 180^\circ$ 即ち船が波と逆方向に進む場合には 0.9 迄減少する。之は勿論單なる假想的な場合に對する計算に過ぎないけれ共、小さな波長の波はすべて此様な影響を蒙る譯で、見掛の週期は眞の週期とは時により著しく異なることが判る。

4. 記象上に現れた長週期の波動 第 12 圖 (A) は船が芝浦碇泊中に觀測

第 12 圖 長週期波動の記象例 (刻時 1 分 或は 30 秒毎)



された記象の一部で、丁度中央部に第 9 圖に特に取出して掲げて置いた風波に因る動搖の顯著に現れた個所を含むものであるが、此記象の零線を見ると、地震記象紙に於ける如き直線ではなくて、緩やかな曲線状をなしてゐる。此記象に限らず一般に今回の観測に於て得られた記象の横成分の零線は、程度の差はあるが、皆此様な曲線を描いてゐる。此曲線は其上に横搖等が重つてゐるので、詳しい形を知ることは困難であるが、上に重つてゐる波動を例へば振幅の中央部を連ねる方法で取去ると、何れの記象からも割に滑かな曲線が得られる。其等の曲線の中には時に一つ二つの週期的な波動の様な形が見られることがあるが、一般には餘り規則的な形は持つてゐない。然るにこゝに全 20 枚の記象紙中 3 枚ばかり極めて規則的な週期性を示す記象がある。第 12 圖の (B), (C), (D) がそれである。(B) は船が芝浦碇泊中に、(C) は屋久島海峡通過中に、(D) は沖縄島西岸殘波岬北西沖を航行中に得られた横成分の記象であつ

て、何れも風波或は横揺等比較的短週期の波動の下に規則正しい長週期の波形が見える。

今この波動の週期を求めて見ると、(B) からは 9 個の波の平均週期として 33 秒、(D) からは 7 個の波の平均週期として 1 分 30 秒を得る。(C) は一寸讀取りが困難なので詳しくは讀取らなかつたが、目測では大體 1 分 10 秒位である。

併せて問題はこの波の性質である。之に就て調べて見た結果を逐一述べる。

i) 船體固有の動揺 理論上からも實際上からも船體固有の動揺としてかゝる長週期のもは考へられない。又船體固有の動揺ならば、(B)、(C)、(D) 等に於ける如く時に依つて著しく變化するといふことは解釋出来ない。

ii) うねり 次に之を海の波に依つて起された船體の動揺と考へて見よう。一般に海の波の波長は (1) 式で與へられる。之に芝浦及び沖繩島沖に於ける實測値

芝浦; $T=33$, $h=7.0\text{m}$, 沖繩島沖; $T=90$, $h=500\text{m}$ (海圖に依る) を代入して波長 λ を求めると、

$$\text{芝浦; } \lambda = 1700 \tanh \frac{44}{\lambda}, \quad \lambda = 273\text{m} \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{沖繩島沖; } \lambda = 12700 \tanh \frac{3140}{\lambda}, \quad \lambda = 6050\text{m} \dots \dots \dots (3)$$

となる。一方最初から之を長波と見做し、長波に對する波長の近似式:

$$\lambda = \sqrt{gh} T \dots \dots \dots (4)$$

に依つて波長を計算すると、

$$\text{芝浦; } \lambda = 273\text{m}, \quad \text{沖繩島沖; } \lambda = 6300\text{m}$$

となる。之を上値と比較すると沖繩島沖の値に僅少の差異があるのみである。依つて記象に現れた動揺の原因が假りに波に在るものとすれば、其波は長波でなければならぬことが判る。

そこで次の問題は、假りに此動揺が海上の或種の長波によるものとすれば、記象の形は其波の波形と如何なる關係に在るかといふことである。今此點に就き、假りに波が船に平行な波面を有する次の如き正弦波であるといふ假定を置いて調べて見る:

$$\xi = A \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} + \frac{t}{T} \right), \quad \eta = A \cos 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} + \frac{t}{T} \right) \dots \dots \dots (5)$$

こゝに ξ は水粒子の水平の、 η は上下の變位を表はす。

振動計は横成分を測る様に置かれてあるものとする、其振子は次の三つの因子によつて運動する：

- (1) 水粒子の水平運動に因る船體の水平運動
- (2) 波形に因る船體の傾斜
- (3) 船體の傾斜に因る振動計設置場所の水平運動

次に之等の各項に就き調べて見る。

(1) かゝる長週期の波に對しては船體の運動は水粒子の運動と同一と考へてよからう。依つて今假りに船が止つてゐる場合を考へ、其平均位置を x 軸の原點にとれば、第 1 の因子に依る振動計針先の變位 a_1 は略々

$$a_1 = \Re A \sin \left(\frac{2\pi t}{T} + \delta \right) \dots \dots \dots (6)$$

で與へられる。こゝに \Re は振動計の振動倍率、 δ は位相のづれを示す。

(2) 波形による船體の傾斜角を ϕ とすれば、

$$\phi = \frac{d\eta}{dx} = -\frac{2\pi A}{\lambda} \sin \frac{2\pi t}{T} \dots \dots \dots (7)$$

と置いてよいことは附録 (21) 式に示す如くである。然るに廻轉軸が鉛直線より角 i だけ傾ける水平振子は、廻轉軸と鉛直線とを含む平面内の水平線を軸とする傾斜に對し、傾斜角 ϕ が小なる時は略々

$$\alpha = \frac{\phi}{i} \dots \dots \dots (8)$$

なる角 α だけ静止の位置より移動する。依つて針先は

$$a_2 = VL\alpha \dots \dots \dots (9)$$

だけ變位する。但し V は振動計の倍率、 L は廻轉軸より振子の衝撃の中心迄の距離である。今 ϕ として (7) 式の値をとり、(7)、(8) を (9) に代入すると

$$a_2 = -\frac{VL2\pi A}{iL} \sin \frac{2\pi t}{T} \dots \dots \dots (10)$$

となる。

(3) 振動計が船體の重心の眞上に在る場合には、重心と之との距離を D とすれば、船體の傾斜に因る其場所の水平方向の變位 d は、傾角 ϕ が小なる場合には、

$$d = -D\phi \quad \dots\dots\dots(11)$$

である。 ϕ が正弦型の週期函數なる現在の如き場合には、之による針先の變位を a_3 とすれば、

$$a_3 = \mathfrak{B}d \quad \dots\dots\dots(12)$$

と表し得べく、(7) 及び (11) を (12) に代入すれば、

$$a_3 = \mathfrak{B}D \frac{2\pi A}{\lambda} \sin \frac{2\pi t}{T} \quad \dots\dots\dots(13)$$

となる。

a_{10} , a_{20} , a_3 の振幅を夫々脚符 0 を付して表すこととし、之等の比をとれば、(6), (10), (13) より、

$$a_{10} : a_{20} : a_{30} = 1 : \frac{2\pi L_1}{\lambda} : \frac{2\pi D}{\lambda} \left(\frac{\mathfrak{B}}{V} \right) \quad \dots\dots\dots(14)$$

となる。

芝浦の場合は船は碇泊中である。又此波動を「うねり」の如き長波と考へると、その波面は岸に平行と考へて差支ないものと思はれるから、岸壁に横着けとなつてゐた船體にも平行である。又船中での觀測場所も船の重心の直上としても大して誤はない。故に此場合は最初の假定を充してゐる。依つて (14) を其儘適用することが出来る。そこで (14) の右邊の L , i , λ , \mathfrak{B}/V , D 等に實際の値を入れて、此比の値を求めて見る。之等の中、 L は振動計に特有な常數で、6.1 cm である。 i は芝浦の場合は後に實測の結果、 $4^\circ 14' = 0.074$ であつた。又 λ は (2) に依り 273 m と置く。 \mathfrak{B}/V は $T/T_0 = 33/2.3 = 14$, $v = 3.9$ なる値を與へて計算すると、0.0055 となる。又 D は約 4 m (之は大略の値でよいことは次の結果から判る) である。之等の値を入れると、

$$a_{10} : a_{20} : a_{30} = 1 : 3.4 : 0.09$$

となる。此結果に依れば、記象上の振幅は以上 3 因子の中、波形に基く船體の傾斜に因る所の第 2 のものが最大である。併し、水粒子の移動に因る所の第 1 のものも考慮を要しない程小さくはない。之等に比べると、第 3 の波形

に基く傾斜に因る振動計設置場所の水平動は遙に小さく、問題とするに足りないことが判る。

併し、実際には、波が海岸に近付き、水深が浅くなると、水粒子は長軸が海底に平行な楕圓軌道を描いて運動することが知れてゐる。そして此様な場合には、水粒子の水平方向の振幅 A_x は

$$A_x = A / \tanh \frac{2\pi h}{\lambda}; \quad 2A: \text{波高}, \dots\dots\dots (15)$$

で與へられる。依つて之に對する記象上の振幅を a_{10}' とすると、

$$a_{10}' = \mathfrak{B} A / \tanh \frac{2\pi h}{\lambda}$$

である。芝浦の場合には $2\pi h / \lambda \ll 1$ が成立つので、

$$a_{10}' = \frac{\mathfrak{B} A \lambda}{2\pi h} \dots\dots\dots (16)$$

(10), (16) より a_{10}' と a_{20} との比を求めて見ると、

$$\frac{a_{10}'}{a_{20}} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 h L} \left(\frac{\mathfrak{B}}{V} \right) \dots\dots\dots (17)$$

之に上述の値を代入すると、

$$a_{10}' / a_{20} = 1.8$$

となる。即ち上の結果とは反對に水粒子の運動に因る振幅の方が大きいこととなる。

斯様に第 1 因子と第 2 因子との大小は單なる推定からでは一寸判定することが出来ない。然らば、芝浦に於ける場合、之等兩因子の影響の中實際には何れが大きいかといふことを記象の形から推定出来ないであらうか、波が海岸近く來た時でも、波形は完全な正弦波形とはならず、若干トロコイド波の形が残つてゐるものとする、傾斜に因つて生ずる記象は大體其波形通りの形をなすが、變位に因つて生ずる記象は正弦型をなす筈であるから、實際の記象を見れば大凡の區別はつく譯である。尙、前者に於ては波が左舷から進行して來る場合には記象紙上の左舷(第 2 圖参照)に尖りが現れ、右舷から來る場合には其反對となる筈であるから、船に對する波の進行方向が判つてゐる場合には一層正確に此考へを確めることが出来る。第 12 圖 (B) の記象を見ると、記象紙

上の左舷は右舷に比し幾分尖つてゐる様に見える。實際芝浦では船は右舷を岸壁につけてゐたので、波は左舷から來る譯で、記象の形は此考を裏書きしてゐる様である。又船は芝浦の岸壁に横付けとなつてゐたのであるから、その邊では水粒子の水平方向の運動が妨げられ、上下方向の振幅が増大してゐる筈であつて、此點よりするも此見解は恐らく正しいものと思はれる。

次に、假りに記象上の振幅が傾斜のみによるものとして、芝浦に於ける記象より此假想的な波の波高を概算して見る。但し近似的に波を正弦波として、(10)を適用する。勿論上述の如く岸壁に極めて近い所の觀測であるから、傾斜が過大と成つて居り、従つて求められる波高も實際のものよりも可成り大きく出るであらう。(10)に代入する爲め第(12)圖(B)の平均振幅を求めて見ると、平均 1.1 cm である。之より

$$A = 8.9 \text{ cm, 従つて 波高} = 17.8 \text{ cm}$$

と求められる。又波の最大傾斜を計算すると 7.9 となる。

次に沖縄島沖航行中の記象に現れたものに就て調べる。殘波岬北西沖航行中の船の経路は略々北 30° 東—南 30° 西で、之は其邊の等深線とは平行ではないので、「うねり」の波面と船の長軸とも亦若干の角度をなすものと思はれるが、今の所此點を明かにする正確な材料がない。依つてこゝでは假りに波面が船體に平行なものとして取扱ふこととする。

此時の記象の形は左右兩舷對稱で、可成りよく整つた正弦波形をなしてゐる。依つて芝浦の場合と同様、波を正弦型の長波として(14)の關係を用ひると、

$$a_{10} : a_{20} : a_{30} = 1 : 1.7 : 0.003$$

となる。即ち此場合にも第 2 因子に因る振幅が最大となる。

次に此波の波高を計算して見よう。此場合記象紙上のうねりの週期は地震計の夫に比し極めて長いから、(6)式に於て δ は 0° に近く、従つて a_1 と a_2 とは同位相と考へてよい。故に記象上の振幅は a_{10} と a_{20} との和を表してゐる譯である。今第 12 圖(D)より長週期波形の平均の振幅を讀取ると 1.3 cm となる。依つて上の比例式及び(7)を參照し、

$$a_{20} + a_{10} = 2.7 a_{10} = 2.7 \times 1.3 = 3.51 \text{ cm,}$$

$$A = \frac{0.48}{\mathfrak{B}} \text{ cm,}$$

而して此場合の振動計の常数は、第 2 節の表に示す如くであつて、之等の値と波の週期⁸とより \mathfrak{B} を計算すると、 $\mathfrak{B} = 0.0011$ となる。之より

$$A = 4.4 \text{ m, 従つて 波高} = 8.7 \text{ m}$$

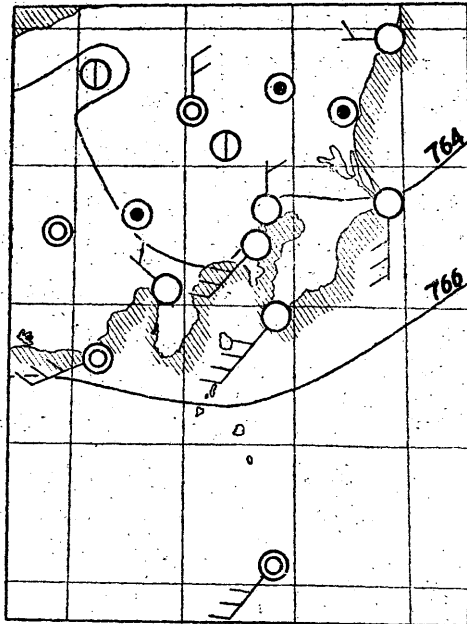
と求まる。又波の最大傾斜を求めて見ると $15'$ となる。

次に、上記の如くして得られた波長、波高等を以て、その「うねり」としての實在の可能性を吟味して見る。芝浦の場合は波長波高共に「うねり」として有り得べき値であつて、記象上の波動を「うねり」と考へてもさして不都合はなさうである。假りに斯の様な「うねり」があつたとしても、其の最大傾斜角は僅かに $8'$ 足らずであるから、波として肉眼に映する程度には至らないであらう。芝浦の場合と異り沖繩島沖の場合は波長波高共に普通に知られてゐる

「うねり」のそれ等よりも遙に大である。現在主として肉眼観測に依つて知られてゐる「うねり」は最大限に於て波長 1000 m 内外、波高 10 m、週期 20~30 秒程度であつて、沖繩島沖に於ける推算値より遙に小である。故に今迄の「うねり」に関する知識よりすれば、沖繩島沖に於ける記象上の波動は「うねり」とは認め難い。

尙ほ参考の爲之等二つの場合に就き當時の氣象狀況を調べて見る。第 13 圖は昭和 12 年 10 月 30 日午前 6 時の天氣圖で、芝浦に於ける観測より約 5 時間

第 13 圖 昭和 12 年 10 月 30 日
午前 6 時の天氣圖 (東京近傍)

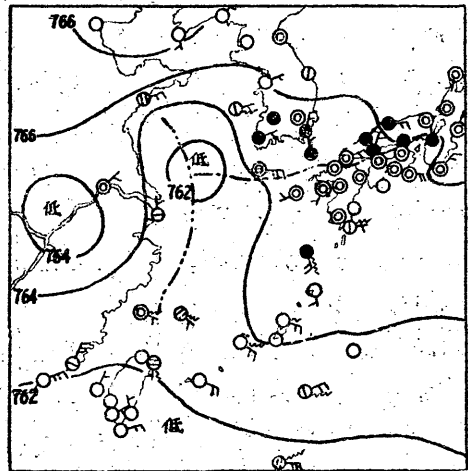


(1) 須田院次；海洋科學，尙日高博士も「うねり」の週期は大體 30 秒以内であつて、それ以上のものは考へ難いことを筆者等に注意された。

前のものである。此時東京では北の風 2 米であるが、富崎では南西の風 15 米に達し、横濱でも南西の風 9 米で、當時東京灣内は風波が可成り高かつたことが推定される。観測當時即ち 30 日 11 時には第 2 節の表にも示す如く、東京の風向も南に變り、風速増して 6.1 米に上り、海上は相當荒れて來た。之等の事實は芝浦に於ける観測に現れてゐるものを「うねり」と考へることに有利な材料を與へる。

次に沖繩島沖の場合を調べて見る。第 14 圖は昭和 12 年 11 月 5 日午前 6 時の天氣圖で、観測前約 3 時間のものである。之を見るに、當時淺風丸の位置せる附近では汽船 Ryōyō-maru に依り東南東の風 4 米と報告されてゐるが、那覇では快晴にして無風である。當時東支那海一般に風波共に穏かで、氣象條件は芝浦に於ける場合とは異つてゐる。事實、此日空には一點の雲影を認めず、船は鏡の如き海上を渡るが如く走り、絶好の航海日和であつた。尙、當日以前の天氣圖

第 14 圖 昭和 12 年 11 月 5 日
午前 6 時の天氣圖



を見て、かゝる長波長の「うねり」の涵養源と覺しき猛烈な颱風又は優勢な低氣壓は此附近には現れてゐない。たゞ此日の天氣圖にも見られる如き黃海の弱い低氣壓とそれにまつはる不連続線とは、若干の位置の移動を行ひ乍らも、數日來此附近に蟠居せるものであつて、之に幾分の疑がかけられないでもない。

以上、記象上の長週期波動の原因を海洋の長波と假定し、其波長、波高等を観測を基礎として推算して見た。其結果芝浦碇泊中の場合は「うねり」として説明し得る可能性の存することが判つたが、沖繩島沖航行中の場合は、波長、波高並びに當時の氣象状態から、從來の知識の範圍内では「うねり」として説

明し難いことを知つた。

iii) 振動計に對する縦方向の動搖の影響　斯の如き現象が振動計に及ぶ縦方向の動搖特に船體固有の縦搖の影響として生じたものではないかとの疑も起る。即ち縦搖の爲に水平振子の廻轉軸の傾角 i が週期的に變化し、又縦方向の加速度が振子の重錘に働く爲めに起る横方向の變位などが影響してはゐないかとの疑である。

併し、事實の方を見ると、芝浦に於ける No. 2 の觀測と殆ど同時刻に行はれた縦成分の觀測の No. 1 の記象には船體固有の縦搖は殆ど現れて居なくて、週期 2~3 秒の、風波に因る動搖が見られるのみである。今、其振幅が假りに風波の傾斜にのみよるものとして、記象上の振幅から風波の傾斜角を概算して見ると、振動計の廻轉軸の傾角 i の約 6 割となる。即ち振子の廻轉軸固有の傾角の 6 割程度だけ前後にフレた譯である。之は量としては決して小さなものではないが、たゞそれ丈けの、而も此様な短週期の傾角の變化に因つて、果して No. 2 の如き長週期の波形が現れるかどうかは疑問である。此問題は所謂 Hill の運動方程式の解を吟味して見れば何とか見當が付く筈であるが、それは後日に譲ることとする。

iv) 風の息に依つて生ずる船體の動搖　芝浦並びに沖縄島沖の場合、風に 33 秒或は 90 秒位の息があつて、其爲船體がそれ位の週期で傾いたのではないかとの疑も生ずる。芝浦の場合は前述の如く相當強い風が殆ど船と直角に吹いてゐたので、其様な解釋も可能であるが、沖縄島沖の場合は上にも述べた様に殆ど無風状態であつたので、此解釋は困難かと思はれるが、之は更によく調べて見ないと何とも判定し兼ねる。

以上の他、波浪に之位の週期のエネルギーの消長を考へること、⁽¹⁾ 水中の不連続面を傳はる波動に依る解釋等も考へられるが、之等に就ては今の所それを裏書きする様な材料を蒐めて見なかつた爲め、何とも言ふことが出来ない。

附・船體動搖の理論 ⁽²⁾ 船體動搖理論の中、今回の觀測と關係ある部分を述べる。

(1) 之等は高橋浩一郎氏の御示唆に依るものである。

(2) 主として妹澤博士；振動學（昭和 7 年）に依る。

船體の動搖は 6 種類の分運動から成る。即ち、船體の前後、左右、及び上下三方向の直線的繰返し運動と、之等の方向を廻轉軸とする廻轉運動とである。之等の中最も普通に起る動搖は、前後軸を廻轉軸とする廻轉運動即ち横搖 (Rolling)、左右軸を廻轉軸とする廻轉運動即ち縦搖 (Pitching)、上下軸を廻轉軸とする搖艀 (Yawing)、及び上下方向の直線的繰返し運動即ち上下動 (Dipping and Heaving) の 4 つであつて、残りの 2 つ、即ち前後及び左右の直線的繰返し運動は抵抗其他の關係により起り難い。又、廻轉運動中最も屢々起り廻轉角も大きいのは横搖で、縦搖之に次ぎ、搖艀は波の進行方向と船の方向との關係で起るものである。

之等の動搖中主なものゝ固有週期を挙げると、

$$\begin{aligned} \text{横搖: } T_R &= 2\pi \sqrt{\frac{k^2}{gm}}, & \text{縦搖: } T_P &= 2\pi \sqrt{\frac{k'^2}{gm'}}, \\ \text{上下動: } T_D &= 2\pi \sqrt{\frac{M}{\rho g A}} \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

茲に k 及び k' は夫々船體の縦搖及び横搖に關する廻轉慣性半徑、 m 及び m' は夫々横搖及び縦搖に對するメタセンター高、 M は船體の質量 (排水量)、 ρ は海水の比重、 A は船體の水線面 (water plane) の面積、 g は重力の加速度である。

但し之等の式は動搖角が小なる時に適用される式であつて、動搖角が大きくなると週期は之等の式が表すものよりも大きくなる。

波濤中に於ては固有動搖の他に波濤の爲の強制動搖が起る。今、一例として、波濤中に於ける横搖に就き Froude が大凡次の如き假定の下に起る船體の横搖を理論的に解いた結果を掲げる。其假定は (i) 波濤は二次元的の規則正しい正弦函數形をなし、船體は其の波面に平行に置かれて居り、(ii) 動搖は週期的であり、(iii) 波長は船の幅より遙に長く、(iv) 波動形の爲に慣性質量は變化せず、(v) 波長は波高よりも遙に長いこと、(vi) 其他種々の假定である。かかる場合には船が鉛直線となす傾斜角を ϕ とすれば、

$$\phi = \frac{\pi H}{1 - \frac{T^2}{T_1^2}} \left(\sin \frac{2\pi t}{T_1} - \frac{T}{T_1} \sin \frac{2\pi t}{T} \right) + \frac{UT}{2\pi} \sin \frac{2\pi t}{T} + \alpha \cos \frac{2\pi t}{T} \dots\dots (19)$$

茲に H は波高, L は波長, T は船の固有横揺週期, T_1 は波の週期, U 及び α は $t=0$ に於ける $d\phi/dt$ 及び ϕ の値を表す。括弧内の第一項は波濤の週期と等しい週期の強制動揺で、他の項は自由動揺を表してゐる。 $t=0$ の時、 $U=0$, $\alpha=0$ とすれば、括弧のある項のみとなり、 $t=0$ のときは振幅は 0 であるが、時間と共に振幅は唸りの變化する。

特別の場合として T/T_1 が小なる場合、即ち波濤の週期が船體の動揺週期に比して大なる場合には、 $U=\alpha=0$ なる初期條件の下に、(19) は近似的に

$$\phi = \beta \sin \frac{2\pi t}{T_1} \dots (20), \text{ 但し } \beta = \frac{\pi H}{L} : \text{極大波濤傾斜,}$$

となる。之は船の傾斜は波の傾斜と等しいことを示す。

反對に T/T_1 が大なる場合には、同様な初期條件の下に、近似的に

$$\phi = \beta \frac{T_1}{T} \sin \frac{2\pi t}{T} \dots \dots \dots (21)$$

となる。即ち船體の動揺は週期的には波濤に無關係となり、振幅は波濤の極大傾斜よりも小さくなる。⁽¹⁾

以上は水に依る減衰的抵抗を考慮に入れない時の解である。之を考慮に入れると次の様になる。即ち今、船體の動揺抵抗が其の角速度に比例すると考へ、波濤を正弦波とすれば、船體の傾斜は

$$\phi = \frac{\psi \sin\left(\frac{2\pi t}{T_1} - \alpha\right)}{\sqrt{\left(1 - \frac{T^2}{T_1^2}\right)^2 + \frac{4a^2 T^2}{\pi^2 T_1^2}}} + \beta e^{-\frac{2a}{T}t} \sin\left(\sqrt{1 - \frac{a^2}{\pi^2}} \frac{2\pi}{T}t + \gamma\right)$$

$$\text{但し } \alpha = \tan^{-1} \frac{\frac{2a}{T} T_1}{1 - \frac{T^2}{T_1^2}}, \quad a = \frac{k_1 \pi^2}{M m T} \dots \dots \dots (22)$$

となる。茲に ψ は波濤の極大有效傾斜, k_1 は抵抗の比例常數, β 及び γ は初期條件に依つて定まる量で、他の記號は上の場合と同一である。

上式の右邊第 1 項は強制力に依るもの、第 2 項は自由動揺に依るもので、其振幅は時間と共に減少する。地震計の運動と全く同様である。

(1) 妹澤博士に依れば、Froude の此議論は理論的には大して誤はないが、實際には注意を要する點があるとのことである。

次に揺船に就て調べて見る。今、船の重心を通り船體に固定せる直角座標の三軸を x 軸は船の縦軸に、 y 軸はその横軸に、 z 軸はその上下軸に一致する如くとり、其等三軸の正の向きを夫々船首、左舷及び下方とする。 x, y, z 各軸の周圍の船體の廻轉角を夫々 ϕ, θ, ψ を以て表す。波濤は其波長が船の大きさよりも大きい正弦波で、其極大傾斜を Φ とし、波面は船が靜止せる時の縦軸と ω なる角をなすものとする。又、計算の便宜上、重心 G を通り yGz 面内に在る任意の線の周圍の船の慣性能率は一定であると假定する。然る時は z 軸の周圍の廻轉運動即ち揺船は次の如き式に依つて定まることになる：

$$\begin{aligned} \frac{2}{n} \frac{d^2 \psi}{dt^2} = & aa' p^2 \cos(\beta' - \beta) - aa' p^2 \cos(2pt - \beta - \beta') \\ & - a'b p \omega [\cos\{(\omega - p)t - \gamma + \beta'\} - \cos\{(\omega + p)t - \gamma - \beta'\}] \\ & - ab' p \omega' [\cos\{(p - \omega)t - \beta + \gamma'\} - \cos\{(p + \omega)t - \beta - \gamma'\}] \\ & + bb' \omega \omega' [\cos\{(\omega - \omega')t - \gamma + \gamma'\} - \cos\{(\omega + \omega')t - \gamma - \gamma'\}] \dots (23) \end{aligned}$$

但し $a, b, a', b', \beta, \gamma, \beta', \gamma'$ は x, y, z 三軸に關する船の廻轉運動の方程式中揺船に關係ある項のみを採つた所の次の方程式：

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 \phi}{dt^2} + k \frac{d\phi}{dt} + \omega^2 \phi &= A \cos pt, \\ \frac{d^2 \theta}{dt^2} + k' \frac{d\theta}{dt} + \omega'^2 \theta &= B \cos pt, \\ \frac{d^2 \psi}{dt^2} - n \frac{d\phi}{dt} \frac{d\theta}{dt} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

の解：

$$\left. \begin{aligned} \phi &= a \cos(pt - \beta) - b \cos(\omega t - \gamma) \\ \theta &= a' \cos(pt - \beta') - b' \cos(\omega t - \gamma') \end{aligned} \right\}$$

の夫々の係數：

$$a = \frac{A}{\sqrt{(\omega^2 - p^2)^2 + k^2 p^2}}, \quad a' = \frac{B}{\sqrt{(\omega'^2 - p^2)^2 + k'^2 p^2}}, \dots,$$

及び位相角：

$$\tan \beta = \frac{kp}{\omega^2 - p^2}, \quad \tan \gamma = \frac{p}{\omega} \tan \beta, \quad \tan \beta' = \frac{k'p}{\omega'^2 - p^2},$$

$$\tan \gamma' = \frac{p}{\omega'} \tan \beta',$$

であり、又

$$k = \frac{K}{I_x}, \quad k' = \frac{K'}{I}, \quad \omega^2 = \frac{Dgh}{I_x}, \quad \omega'^2 = \frac{Dgh'}{I},$$

$$A = \omega^2 \Phi \cos \alpha, \quad B = \omega'^2 \Phi \sin \alpha, \quad n = \frac{I_x}{I}$$

である。茲に I_x は x 軸の周圍の船の慣性能率、 I は y 軸又は z 軸の周圍のそれ、 h, h' は夫々横揺及び縦揺に對するメタセンター高、 D は船の排水量、 K, K', K'' は夫々横揺、縦揺及び揺艙の減衰係數、 $2\pi/p$ は波の週期、 g は重力の加速度である。

(23) に依つて示される如く、揺艙は週期的な動揺ではあるけれ共、其週期は單純なものではなく、横揺、縦揺及び波濤の夫々の週期が複雑に組合さつたものであつて、之等の週期の大小關係により、極めて長い週期や極めて短い週期の揺艙の存在も可能である。そこで前節に述べた記象上の長週期波動の一解釋として揺艙が考へられるが、若し揺艙とすると、之は横成分の記象に現れると同時に縦成分の記象にも同様の大きさを以て現るべき筈である。然るに事實に於ては縦成分の記象には殆ど之が現れてゐない。故に此解釋にも事實の方から疑問がある。

最後に船内に於ける振動計振子の運動に就て一言する。上述の如く、船體は最も自由度の多い一種の振子であつて、變位運動、廻轉運動各 3 種宛合計 6 種の運動をなし得る。それが波濤中に在る時は之等 6 種の固有動揺の他、更に波動に依る強制動揺があり、航行中なる時は航行速度の變化及び操舵に伴なふ動揺を生ずる。故に航行中の船内に於ける振動計振子の運動は最も一般のものであつて、其の完全な解を求めることも蓋し至難の業である。併し乍ら之等各種の動揺は其の何れもが常に同じ程度に現れるものではない。或場合には其中の一つのみが特に優勢に出現する場合があるであらう。觀測に際し、此の如き機会を逸せず、一々の因子を逐次的に定めて行く方法を採るならば、多種多様な因子の少くも概略を知ることは必ずしも不可能ではあるまい。

6. 結語 昭和 12 年 10 月 30 日より同年 11 月 5 日迄、携帶用振動計に依り、航海中並びに碇泊中の凌風丸の動揺を觀測し、其記象を驗測して種々の結果を得た。次に其概要を記す。

(1) 横揺及び縦揺の週期並びに減衰比 船體動揺の横並びに縦成分の記象を高橋・伏見の方法に依つて解析し、下の如き結果を得た。

	週期	減衰比
横揺	12.5	1.2
縦揺	4.6	1.4

又別に横成分記象上に於て形の整へる横揺 22 を擇び、其週期を讀取り、之を平均し、 12.2 ± 0.5 秒(平均誤差)を得た。

(2) 風波の卓越週期並びに減衰比 横成分に於ける波浪に因る船體動揺の記象を高橋・伏見の方法に依つて解析し、卓越週期 2.09 秒、減衰比 1.17 を得た。又縦横兩成分の碇泊中の記象より風波に因る動揺 186 個の週期を讀取り、其の 0.1 秒毎の頻度曲線を描き、最大頻度を與へる週期として 2.2 秒を得た。

(3) 記象上に現れた長週期の波動 今回の觀測に於て得られた記象中、横成分のもの、零線は何れも緩かな長週期的變化をなしてゐる。こゝには其等の中、特に週期性の顯著な場合二つを擇び、週期其他の觀測材料を基として此波動の解釋に就き種々考察を加へた。此顯著な週期性波動の現れた二つの場合とは、其の一は昭和 12 年 10 月 30 日船が芝浦碇泊中の場合、他は同年 11 月 5 日沖繩島西岸殘波岬北西沖航行中の場合で、之等の各々に於ける長週期波動の平均週期は夫々 33 秒及び 90 秒である。之に對しては結局何等決定的な説明を與へることが出来なかつたが、若し之を假りに「うねり」に依る船體の動揺と假定すれば、其の波長、波高及び最大傾斜は大凡次の如き値となることを計算に依つて示した：

場所	波長	波高	最大傾斜
芝浦	273m	17.8cm	7'.9 (但し芝浦の水深を 7.0m とす)
沖繩島沖	6050m	8.7m	15' (但し殘波岬沖、觀測時の船體位置附近の水深を 500m とす)

但し此計算には種々の假定が含まれてゐる。

終に臨み、今回の觀測及び調査に際し御懇篤なる御指導を賜つた岡田臺長、本多地震掛主任、有益なる御忠言を頂いた海洋氣象臺日高博士、觀測に當り種

種な便宜をお與へ下さつた凌風丸村田船長、中野一等運轉士、小菅機關長、滞
觀測主任其他乗組員諸氏、並びに種々有益な示唆を頂いた本臺豫蕃掛高橋理學
士等に深甚なる謝意を表する。

(昭和 13 年 5 月 於中央氣象臺)