

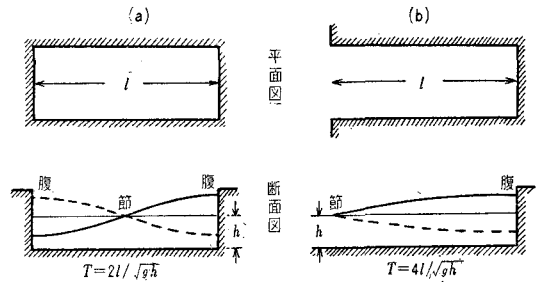
港湾のセイシュと長周期波について

気象研究所海洋研究部 理学博士 宇野 木 早 苗

1. 緒 言

セイシュ (seiche) は湖や湾の水が桶の中の水と同じように振動する現象であって、図-1 (a) の湖では両端を腹とし周期が $T_n = 2l/n\sqrt{gh}$ の振動が起り、図-1 (b) の一端が用いた湾の場合には、湾奥が腹、湾口が節、周期 $T_n = 4l/(2n-1)\sqrt{gh}$ の振動が見られる。ここで l は湾または湖の長さ、 h は水深、 g は重力加速度、 $n=1, 2, 3, \dots$ である。これらは縦振動であるが、そのほかに横振動も当然起りうる。また日本では湾の振動を特に潮汐の副振動 (secondary undulation of tides) といって、湖の場合と区別しているが、現象の本質は同じであり、かつ外国にもこのような使い方はあまり見受けられないので、最近ではセイシュに統一される傾向にある。なお港湾で見られる、波浪と潮流の中間領域の長周期の水位昇降の中には、セイシュのような定常振動のほかに、直接外海から進入する進行波もふくまれることは注意されねばならない。

図-1 湖と湾におけるセイシュの基本振動



セイシュが学問の対象となったのは、スイスのジュネーブ湖についての Forel (1869) の研究が最初であるが、その後観測と理論の両面から数多く調べられ、わが国の海洋学者によっても誇るべき貴重な貢献がなされている。また湾水の振動は港湾の施設や作業に直接関係するので、港湾技術者にとっても無視できず、その立場からの研究もすくなくない。しかしながらセイシュ研究のほとんど大部分は、振動のモードと周期の決定に限られ、発生原因や発達減衰の機構についての研究は非常に少ない。さらに、実際に港湾に見られるセイシュの周期については、われわれはある程度知識を持っているが、実用上最も重要な波高についての知識はきわめて貧弱である。そこで海岸工学に関係ある方々に多少とも参考になればと思い、日本沿岸のセイシュの実態と、セイシュ発生の問題点を明らかにするのを眼目にして本報告を草した。また専門外ではあるが、諸報告を参照して港湾におよぼすセイシュの影響にもふれた。しかし浅学な著者のことゆえ、大きな見落としや誤りもあるかと思われるのでお気づきの点について御教示、御批判をお願いしたい。

2. 日本におけるセイシュ研究の概観

セイシュは、長崎地方ではアビキ、下田地方ではヨタと呼ばれているように、古くから民間に知られていた現象であるが、それ自体を目的として調べられたのは 1891 年の芦の湖の観測が最初ではないかと思われる。特に 1896 年の三陸大津波の経験と、セイシュは港湾の水が液体振子として振動したものであるという大森¹⁾の研究などが機縁となって、各港湾のセイシュを明らかにしておくことが要望され、震災予防調査会は 1903~1906 年の間にわが国沿岸のおもなる港湾数 10 カ所で観測を実施した。これにもとづいた本多・寺田等²⁾の研究によって、セイシュの正体もかなり明らかになり、また複雑な湾の周期の計算法や湾口補正の公式も導かれた。これに続いて、理論、観測、実験の方面から多数の人が研究を重ねてきたが、その主力は振動系のモードと周期を求めることにあった。中でも精力的におびただしい論文をものした日高³⁾の数理的研究、特に棚セイシュ、海峡セイシュ、海堆セイシュの可能性を論じた論文、任意形状の湖海に適用できる壺井⁴⁾の解法、セイシュのスペクトル構造に手をつけた市栄⁵⁾の研究などは注目される。さらに台風による暴風津波の際に見られるいちじるしく周期の長い振動も注意されねばならない⁶⁾。

しかるに波高に関する研究はきわめてまれで、湾口が完全に節にならないために外海とエネルギーの受授が行われ波高が増減するという中野⁷⁾の研究と、てたために外力を受ける振動系の理論を用いてセイシュの減衰を論じた高橋 (浩)⁸⁾の研究が見出される。これらは波形の規則性と湾の形状との関係も論じてあり、注目すべき論文と思われる。そのほか検潮記録から波高と風速の関係式を導いた市栄⁵⁾の論文も興味ぶかい。最近高橋 (竜)⁹⁾

は宮城県江ノ島の津波計の記録からスペクトルを作り、その構造について、通常は1分～1時間の周期帯にエネルギーがほぼ一様に分布している、しかし台風や前線の場合には小さい方にエネルギーが大きいと述べている。

セイシュを起す原因として、a) 津波、b) 風および storm、c) 雷雨、d) storm や前線にともなう長周期波、e) 波浪に基因する長周期波、f) 海潮流、その他いろいろなものと考えられる。三陸大津波以後¹⁾ 検潮記録にもとずいて多くの人が津波を調べてきたが、この津波記録は実はセイシュの記録であって、外洋から進入する津波そのものではない。従って両者の結びつきを明らかにするのは津波研究で大切なことであるが、あまりよく調べられていないので、外洋の津波の性状はわからない点が多い。台風や強い低気圧によって港湾で暴風津波が生じたとき、特に水位が最大に達した後に、セイシュが発達することはしばしば経験される。暴風津波の説明に関連して、それに重なっているセイシュも、現象的には大森¹⁰⁾、中村¹¹⁾以後、理論的には室戸台風以後¹²⁾、くわしく調べられてきたが、セイシュの波高を量的に説明することはまだ困難である。外海に面した海岸で低気圧が通過するときどのような棚セイシュが見られるかという計算も行われた¹³⁾。岡田・藤原等¹⁴⁾は雷雨の際の気圧変化、局部的降水、風の衝撃圧によってセイシュが起ることを示した。

しかし風や波が特に荒くないのに、セイシュが大きいことは日常よく見かけることである。これは長周期波が外から進入したためと考えられ、その原因として d)、e) などがあげられるが、詳細は 4. で議論することにする。海潮流によってセイシュが起る可能性は長岡¹⁵⁾によって指摘され、実例は本多・寺田等²⁾によって鳴戸の近くの小湾で見出された。これについて中野¹⁶⁾は湾の前を流れる強い潮流内に Kármán のうずができ、うずと湾水が結合してセイシュが発達すると考え実験的に確かめた。水理模型実験はセイシュ研究の有力な武器であるので、本多・寺田等²⁾以後若干試みられ、最近では前記の中野¹⁶⁾や長崎海洋気象台¹⁷⁾が実施した。水理模型実験に代って今後の発展が期待されるのは、電子工学の simulator を用いての実験である。すなわち流体系と電気回路の振動方程式の相似性から、適当な分布常数を与えれば任意形状の湾の振動も電氣的に再現されるし、複雑な強制力を与えることもそれほど困難でない。石黒¹⁸⁾は長崎港にこれを適用したが、最近では地球自転の偏向力をも取り入れた電気回路を用いて興味ぶかい実験を行っている。

3. 日本沿岸のセイシュ

周期は本多・寺田等²⁾の報告にかなりくわしくまとめている。しかし各周期の出現頻度と、周期の変動性を理解しておくことは大切である。波高、継続時間、季節変化などは一部を除き¹⁷⁾よく調べられてない。そこで以前に、中野と著者¹⁹⁾は、気象庁の気象要覧と検潮概報の資料を整理してセイシュの実態を報告した。その後の資料を追加し要約したものを、表-1、2 に示す。周期はセイシュ継続期間中の平均周期、波高はその間の最大値である。一部を除き気象庁関係の検潮所に限られているため、観測点が十分でないのはやむを得ない(図-2)。

形状と水深分布が複雑な実際の湾では、いろいろな振動のモードが可能であってセイシュはスペクトルの構造をなし、周期はかなり広範囲に変動することが注意されねばならない。振動系の特徴から港湾を分類すると次の

図-2 検潮所位置 (地点番号に対応する地名は 表-1 参照)

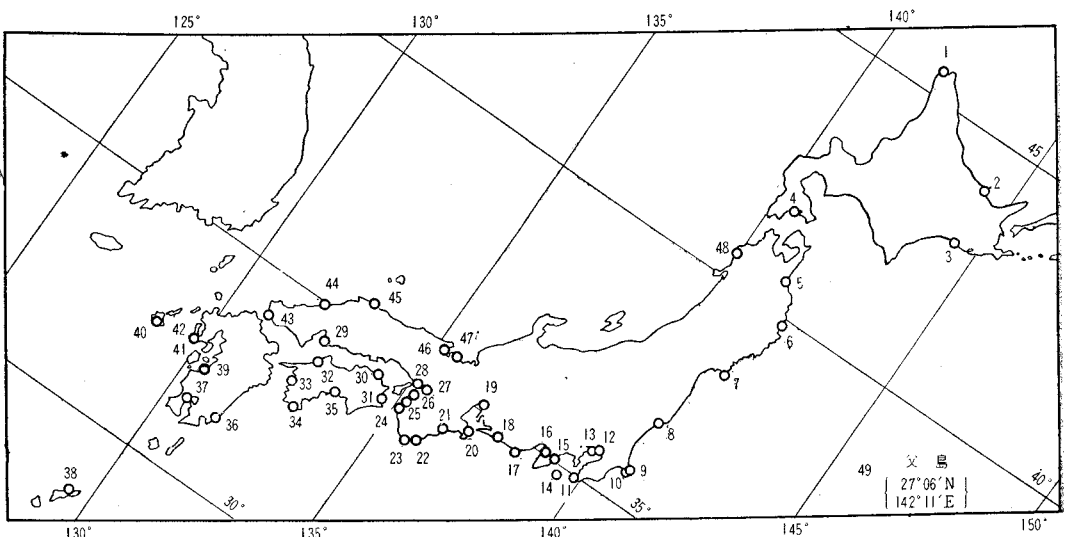


表-1 セイシュの周期、波高、継続時間および季節変化 (1)

地点番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
地名	稚内	網走	釧路	函館	八戸	宮古	鮎川	小名浜	鏡子	名洗	布良	東京	品川	圃田 (大島)	伊東	内浦	御前崎	舞坂	名古	鳥羽	尾鷲	神串	木下	津下	和歌山
期	1956	56	47-56	55-57	35-56	37-56	43-56	51-56	37-53	55-56	36-56	50-56	37-39	53-56	37-56	36-56	51-53	36-40	51-56	44-56	53-56	53-56	36-56	48-54	49-56
(min)	32.8 1 11 21 22.3 31 39.0	1.5 18.9 34.4 23.9	— — — — — —	— — — — — —	0.4 5.5 38.4 37.4 41.5	1.5 4.8 36.0 3.8 45.7	79.5 11.6 7.7 1.0	10.6 68.0 19.8 1.5	36.3 38.1 7.8 2.9	72.4 15.5 11.9 0.1 0.3	1.2 6.0 25.5 44.4 21.9	1.2 15.5 11.9 0.1 0.3	— — — — — —	— — — — — —	— — — — — —	35.1 64.0 0.1 0.1 —	62.5 35.2 2.5 — — —	4.8 67.3 19.3 8.7 —	55.6 8.7 32.0 3.7 —	— — — — — —	8.5 9.0 12.5 0.7 18.0	3.8 53.9 23.0 19.2 —	3.1 78.4 18.5 — — —	11.8 79.4 8.8 — — —	0.7 96.4 2.8 — — —
周期の頻度(%)	— — — — — —	— — — — — —	— — — — — —	— — — — — —	0.4 5.5 38.4 37.4 41.5	1.5 4.8 36.0 3.8 45.7	79.5 11.6 7.7 1.0	10.6 68.0 19.8 1.5	36.3 38.1 7.8 2.9	72.4 15.5 11.9 0.1 0.3	1.2 6.0 25.5 44.4 21.9	1.2 15.5 11.9 0.1 0.3	— — — — — —	— — — — — —	— — — — — —	35.1 64.0 0.1 0.1 —	62.5 35.2 2.5 — — —	4.8 67.3 19.3 8.7 —	55.6 8.7 32.0 3.7 —	— — — — — —	8.5 9.0 12.5 0.7 18.0	3.8 53.9 23.0 19.2 —	3.1 78.4 18.5 — — —	11.8 79.4 8.8 — — —	0.7 96.4 2.8 — — —
波高別の出現総回数	2 2 4 4 2 2	6 5 1 — — —	25 9 2 1 — —	39 52 20 8 — —	32 1 — — — —	17 2 2 6 1 —	70 33 15 6 1 —	6 — — — — —	9 10 1 1 1 1	47 85 62 42 26 —	29 9 — — — —	47 85 62 42 26 —	1 — — — — —	— — — — — —	— — — — — —	30 5 3 2 1 —	63 25 2 2 — —	33 29 22 7 3 —	2 2 — — — —	20 6 — — — —	2 1 — — — —	8 9 1 1 — —	4 — 2 — — —	126 105 54 17 9 —	15 4 — 1 — —
最大波高 (cm)	99	53	95	87	38	145	192	155	75	38	283	45	12	34	70	204	77	52	77	37	60	88	143	57	
継続時間別回数	3 7 3 3 1 1	47 1 1 2 1 2	324 28 6 4 5 6	17 39 31 13 4 3	162 20 — — 1 —	460 64 18 3 1 5	56 38 18 6 — 3	40 69 22 16 5 8	24 27 6 8 2 1	24 130 70 35 26 12	24 12 20 3 6 11	188 130 70 35 26 12	79 38 7 — 1 4	42 15 2 1 — —	42 18 1 3 2 —	91 161 67 32 52 39	148 106 24 24 11 5	90 3 — 1 — —	122 28 5 1 1 —	47 36 7 7 8 —	81 61 15 9 4 6	6 8 3 1 — —	37 73 28 6 1 2	193 24 15 12 7 5	25 24 24 6 7 12
波高範囲 (cm)	10≤	10≤	0≤	20≤	10≤	0≤	20≤	0≤	0≤	10≤	20≤	0≤	0≤	0≤	10≤	10≤	20≤	0≤	10≤	0≤	20≤	10≤	10≤	10≤	
各月における平均の発生回数	3.0 1.2 3.0 3.3 1.0 1.0	2.0 1.0 5.0 10.0 13.0 3.0	4.3 4.4 4.1 3.7 4.0 4.6	4.0 4.3 4.1 3.7 4.0 4.0	0.7 0.5 0.4 0.7 2.5 0.5	2.2 1.8 1.7 2.6 2.6 2.3	1.3 1.1 1.6 1.1 0.9 1.1	3.2 2.8 3.0 3.0 2.7 2.5	0.4 0.5 0.5 0.3 — —	4.5 3.5 5.0 5.0 4.5 3.5	1.4 1.6 2.0 1.3 0.9 2.0	1.4 1.9 2.2 1.8 3.3 0.8	2.5 1.8 3.5 1.5 1.7 2.8	6.0 3.0 3.5 1.0 0.5 2.5	1.7 2.7 2.7 1.0 0.8 1.2	1.0 0.8 1.5 2.0 1.3 0.5	5.0 5.0 5.0 2.0 — —	2.5 3.0 4.3 4.8 2.1 1.4	3.0 2.2 1.4 2.4 0.5 1.0	2.1 1.9 2.9 1.9 0.5 1.2	0.7 0.7 0.5 0.5 0.3 0.3	2.8 2.0 0.8 1.5 0.5 0.8	2.4 2.4 1.3 1.5 1.3 0.6	0.1 0.1 0.1 — — 0.4	
年	18.0	60.0	43.3	43.4	9.1	28.1	12.3	31.9	4.1	43.0	17.2	21.5	26.5	18.7	20.2	9.0	50.0	33.7	20.3	22.9	5.9	16.1	21.5	11.6	2.9

各月における平均の発生回数

表-1 セイシユの周期, 波高, 継続時間および季節変化 (2)

地点番号	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
地名	淡輪	大阪	神戸	呉	高松	小松島	松山	宇和島	土佐清水	高知	油津	鹿屋島	名瀬*	水俣	富江	女神 (長崎)	大波止* (佐賀)	下関	外の浦	境	宮津	舞鶴*	岩崎	父島
期間	49-56	50-56	47-56	52-56	47-56	51-56	50-56	47-56	36-56	49-56	46-56	50-56	57-59	48-52	36-56	36-56	50-51	53-56	36-56	51-56	49-56	1952	46-55	33-44
(min)	48.4	5.5	29.2	—	28.0	33.0	11.0	9.7	1.2	11.7	2.7	12.7	—	80.0	—	1.1	9.4	—	5.7	3.1	—	—	—	1.9
局	1~	20.2	3.4	100.0	37.3	37.0	86.9	20.8	23.9	67.5	73.3	21.5	96.4	20.0	8.7	12.3	20.9	—	92.5	0.5	6.2	—	—	1.1
の	21~	8.6	11.3	—	5.6	19.1	1.4	48.3	63.8	17.6	23.1	65.9	3.6	—	68.4	10.3	32.8	—	0.1	2.2	1.8	—	—	92.8
期	31~	8.0	11.3	—	4.2	33.7	0.3	5.8	0.8	—	0.9	—	—	—	21.0	69.8	26.0	—	0.2	5.8	0.9	—	—	5.4
の	41~	5.3	13.4	—	6.3	6.2	—	7.5	0.1	2.9	0.3	—	—	—	—	5.4	8.9	50.0	—	42.6	47.4	—	—	3.3
頻	51~	5.3	29.3	—	12.6	—	—	8.1	—	—	—	—	—	—	—	—	0.4	1.4	—	23.9	42.0	—	—	—
度	61~	—	1.2	—	2.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.2	0.2	—	13.3	1.8	—	—	—
(%)	71~	—	2.0	—	0.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.1	0.1	—	7.4	—	—	—	—
の	81~	—	0.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.1	—	—	—	—
期	91~	1.1	2.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.1	—	—	—	—
101~	3.1	10.4	—	—	—	0.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(cm)	23	13	33	—	4	17	175	25	230	13	13	4	—	—	—	—	—	1	273	57	37	—	—	5
波高別の出現回数	20~	1	7	—	—	—	104	8	164	13	41	1	—	—	—	—	—	1	176	16	21	31	—	2
波高別の出現回数	30~	—	1	—	—	—	46	—	47	—	21	—	—	—	—	—	—	1	81	9	9	—	—	4
波高別の出現回数	40~	—	—	—	—	—	19	1	12	—	3	—	—	—	—	—	—	—	21	1	—	6	—	1
波高別の出現回数	50~	—	—	—	—	—	4	5	2	—	3	—	—	—	—	—	—	—	10	—	1	1	—	—
波高別の出現回数	60~	—	—	—	—	—	5	—	2	—	2	—	—	—	—	—	—	—	4	—	—	—	—	—
波高別の出現回数	70~	—	—	—	—	—	3	—	—	—	2	—	—	—	—	—	—	—	4	—	—	—	—	—
波高別の出現回数	80~	—	—	—	—	—	2	—	—	—	2	—	—	—	—	—	—	—	4	—	—	—	—	—
波高別の出現回数	90~	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—	—	—	—	—
波高別の出現回数	100~	—	—	—	—	—	—	1	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—	—	—	—	—
最大波高	29	48	53	17	23	63	93	130	121	29	120	34	235	18	130	125	126	34	108	50	67	63	61	46
(cm)	58	196	137	6	137	77	281	86	347	17	140	21	—	—	—	—	—	—	127	8	11	—	—	43
波高別の出現回数	0.5~	31	12	—	1	34	62	89	164	13	89	23	—	—	—	—	—	—	96	4	35	—	—	44
波高別の出現回数	1.0~	7	25	—	—	12	12	35	35	—	35	14	—	—	—	—	—	—	25	18	18	—	—	5
波高別の出現回数	1.5~	9	11	—	—	4	2	27	9	1	25	5	—	—	—	—	—	—	73	17	16	—	—	2
波高別の出現回数	2.0~	1	6	—	—	1	—	12	6	2	11	4	—	—	—	—	—	—	54	15	3	—	—	—
波高別の出現回数	2.5~	5	5	—	—	3	—	9	5	—	4	4	—	—	—	—	—	—	64	13	7	—	—	—
波高別の出現回数	3.0~	1	4	—	—	—	—	34	7	—	12	4	—	—	—	—	—	—	102	93	13	—	—	—
波高別の出現回数	3.0~	10~	0~	10~	0~	10~	20~	0~	20~	10~	10~	0~	30~	0~	30~	30~	40~	—	20~	10~	10~	30~	0~	10~
波高別の出現回数	1	4.6	2.0	—	1.3	2.2	4.5	3.5	3.1	0.7	1.3	1.5	0.5	—	—	—	—	—	2.7	2.8	1.6	5	—	0.3
波高別の出現回数	2	2.5	1.7	—	2.1	1.7	5.6	3.3	4.2	0.4	1.4	1.7	6.5	—	—	—	—	—	3.2	2.8	1.4	7	—	1.3
波高別の出現回数	3	1.0	1.7	0.3	1.8	2.0	5.4	3.5	3.5	0.1	2.1	1.7	1.5	—	—	—	—	—	2.3	1.0	0.9	6	—	0.5
波高別の出現回数	4	1.2	1.3	—	1.5	1.3	4.6	3.5	2.3	—	1.0	1.2	1.7	0.5	1.2	2.4	15.0	—	3.4	2.5	1.8	3	—	—
波高別の出現回数	5	1.2	3.0	0.3	2.6	2.2	4.6	3.1	1.6	—	0.6	1.0	0.5	—	0.8	1.6	6.0	—	2.8	2.3	1.4	2	—	0.3
波高別の出現回数	6	2.4	3.7	1.1	2.9	2.7	6.7	3.8	1.5	0.4	0.3	0.8	0.0	1.0	0.2	1.7	8.0	—	2.3	2.3	2.3	6	—	0.3
波高別の出現回数	7	1.0	2.9	0.3	0.9	1.9	3.1	2.4	0.1	0.1	0.2	—	0.0	0.5	—	0.2	3.0	—	1.1	1.7	0.7	—	—	—
波高別の出現回数	8	1.4	1.4	0.7	0.4	1.0	1.4	1.9	0.1	0.1	0.4	0.2	0.0	—	—	0.1	0.5	—	0.8	1.8	1.0	—	—	—
波高別の出現回数	9	2.6	3.7	1.8	—	1.0	4.7	3.1	0.4	1.0	0.6	0.7	0.0	—	0.2	0.6	11.0	—	2.5	2.3	2.3	3	—	—
波高別の出現回数	10	2.7	3.7	1.6	0.2	2.2	3.3	3.3	2.0	0.4	0.6	0.8	1.0	—	0.2	0.5	10.5	—	2.8	2.0	2.0	5	—	—
波高別の出現回数	11	1.7	3.6	1.8	1.4	2.2	5.6	3.0	2.7	0.5	1.0	1.8	0.5	—	1.0	1.9	12.5	—	3.1	1.8	1.8	5	—	1.0
波高別の出現回数	12	1.0	3.2	1.0	1.0	2.4	4.3	3.1	2.8	0.8	1.2	1.8	1.0	—	1.0	2.4	19.0	—	2.5	2.3	0.5	5	—	2.0
波高別の出現回数	年	20.4	35.3	21.0	1.9	17.1	23.1	53.8	37.5	24.4	10.7	13.2	13.2	3.0	8.5	20.9	145.5	—	29.2	28.6	17.8	47	11.7	5.7

* 名瀬は水路部の資料による, 大波止は文献 (17) による, 舞鶴は水理公式集 (土木学会) による。

表-2 各港湾のセイシュの最大と次大 (観測期間は 表-1 参照)

地 名	年	月 日	周期 (min)	波高 (cm)	気 象 現 象	地 名	年	月 日	周期 (min)	波高 (cm)	気 象 現 象
稚 内	{1956 "}	1 7 12 22	39 53	99 91	M(Lj,C.F.) M(Ln)	串 本	{1952 "}	11 5 2 18	12 20	143 125	T (Agnes) F
網 走	{1956 "}	12 22 11 18	3 6	53 47	M(Ln) NE 方に L	下 津	{1953 "}	8 27 4 3	18 16	57 36	S.F. C.F.
釧 路	{1952 "}	11 5 3 4	46 42	95 54	(カムチャッカ地震) (十勝沖地震)	和 歌 山	{1953 1954}	8 29 9 7	25 25	56 51	S.F. T (No. 12)
函 館	{1956 1958}	6 13 3 2	55 55	87 56	Lj(F.) Lj(F.)	淡 輪	{1953 "}	2 12 7 5	7 30	29 29	S.F. S.F.
八 戸	{1948 "}	10 5 10 30	80 60	38 37	Ln(C.F.) 弱い C.F.	大 阪	{1953 1954}	6 6 11 1	110 300	48 32	T (Judy) Lj (C.F.)
宮 古	{1947 "}	4 1 4 2	47 27	145 140	移動性 High Lj	神 戸	{1955 1956}	9 27 9 10	— —	53 52	T (No. 22) T (No. 12)
鮎 川	{1952 1955}	11 5 12 26	7 8	192 117	(カムチャッカ地震) Lj	呉	{1954 1953}	7 26 3 11	15 15	17 11	Lj (C.F.) Lj (C.F.)
小 名 浜	{1952 "}	11 5 1 3	12 23	155 79	(カムチャッカ地震) Lp	高 松	{1954 1953}	1 2 5 12	14 28	23 20	Lp,Lj 2本のF
銚 子	{1952 1950}	3 4 10 12	17 5	75 64	(十勝沖地震) T (Ruby)	小 松 島	{1952 1956}	11 5 9 25	35 40	63 35	(カムチャッカ地震) T (No. 15)
名 洗	{1955 1956}	12 26 9 27	40 35	38 38	Lj T (No. 15)	松 山	{1956 1950}	5 13 6 20	14 13	93 90	弱い C.F.
布 良	{1944 1943}	12 7 10 3	22 5	283 169	(熊野灘地震) T	宇 和 島	{1950 1952}	7 18 6 5	29 8	130 55	T (Grace) 弱い C.F.
東 京	{1952 1955}	11 5 8 3	70 105	45 20	(カムチャッカ地震) C.F.(Lj)	清 水	{1952 1941}	11 5 11 19	24 20	121 119	(カムチャッカ地震) (日向灘地震)
品 川	{1937 1938}	10 16 1 13	76 82	12 9	L M	高 知	{1953 1950}	9 25 9 3	18 17	29 27	T (No. 13) T (Jane)
岡 田	{1953 "}	11 26 12 24	4 2	34 19	(房総沖地震) 弱い S.F.	油 津	{1952 1954}	11 5 9 9	30 4	120 110	(カムチャッカ地震) T (No. 12)
伊 東	{1946 1949}	12 21 8 30	13 6	70 66	(南海道地震) T (Kitty)	鹿 児 島	{1951 1950}	6 22 12 7	19 8	34 25	F C.F.
内 浦	{1946 1952}	12 21 11 5	16 9	204 87	(南海道地震) (カムチャッカ地震)	名 瀬	{1959 1958}	2 3 2 7	15 16	235 120	C.F. Lj
御 前 崎	{1952 "}	2 18 11 7	15 26	77 69	C.F. 弱い L	富 江	{1942 1940}	4 14 2 29	28 33	130 126	High High
舞 坂	{1953 1940}	9 25 8 11	7 5	52 35	T (No. 13) L	女 神	{1955 1943}	3 22 1 3	36 35	125 118	2本のF —
名 古 屋	{1956 "}	9 25 10 30	140 86	77 75	T (No. 15) Lp,Lj	外 の 浦	{1956 "}	4 19 4 11	34 27	108 104	L —
鳥 羽	{1953 1950}	9 25 5 13	9 9	37 22	T (No. 13) C.F. と 違 い T	境	{1956 "}	3 16 6 6	50 45	50 41	Lj Lp
尾 鷲	{1954 1953}	9 17 9 25	20 4	60 56	T (Lorna) T (No. 13)	宮 津	{1952 1954}	6 6 9 26	50 45	67 59	弱い C.F. T (No. 15)
浦 神	{1953 "}	9 25 11 26	13 13	88 51	T (No. 13) (房総沖地震)	岩 崎	{1951 "}	1 9 2 26	23 17	61 56	M M

(註) M: 冬の季節風 S.F.: 定常前線 Lp: 日本の太平洋側を通った低気圧
T: 台風 C.F.: 寒冷前線 Lj: 日本海を通った低気圧
F: 前線 L: 低気圧 Ln: 日本の北方を通った低気圧

ようになる。a) 狭い周期帯にエネルギーが集中しているもので、頻度分布に1つのピークが現われる。細長い湾に多く、土佐清水、外の浦、長崎などがこの例である (図-3 ④)。b) 2つの振動系が特に頻繁に出現するので、宮古、内浦などがこれに相当する (図-3 ⑤)。以下は複雑な振動系の例である。c) 東京湾、大阪湾、伊勢湾、鹿児島湾などの大湾では、高調波や部分振動をふくめて広い周期帯が現われ、ときとして数時間周期の振動も見られる (図-3 ⑥)。d) 鳥羽、舞坂 (浜名湖) などは出入の多い形状をしているため各種の振動が見られる (図-3 ⑦)。e) 口の広く奥の浅い入江にある八戸、小名浜、岩崎などでは、振動系の決定が困難で、節の位置も常に変動していると考えられる (図-3 ⑧)。f) 湾入が少なく棚セイシュや島セイシュの可能性がある水域で、銚子や岡田がこの例である (図-3 ⑨)。場所によっては周期が次第に増加または減少する傾向がある。たとえば東京で周期が 60→65→70→80→105→105→105→75→55→65→85→120 min と変化した例もある。これはスペクトルの成分波間のエネルギーの受授を考える上に興味ぶかく、また進入波の周期が比較的短かくとも、セイシュが起る可能性があることを暗示している。

波高は検潮所の位置 (たとえば腹か節か)、および検潮所の構造 (特に導水管の大小) によっていちじるしく異なるから、違った場所の波高を比較する場合は十分注意しなければならない。一般的に単純で細長い湾では波高が大きく、1m を越すものもまれではない。これは振動系が明瞭で、共鳴を起しやすく、またエネルギーの逸散が少ないためであろう。宮古、鮎川、清水、女神、外の浦などがこの例である。大きい湾では多量のエネルギーを要するから波高は低い。東京湾では大部分は 10 cm、大阪、伊勢、鹿児島湾の諸湾では大部分は 20 cm 以下である。複雑な湾や口の広い湾、および直接外海に面した所では両者の中間にあり、波形も不規則である。布良では

図-3 周期の頻度分布と水深分布 (周期はセイシュ継続期間中の平均周期)

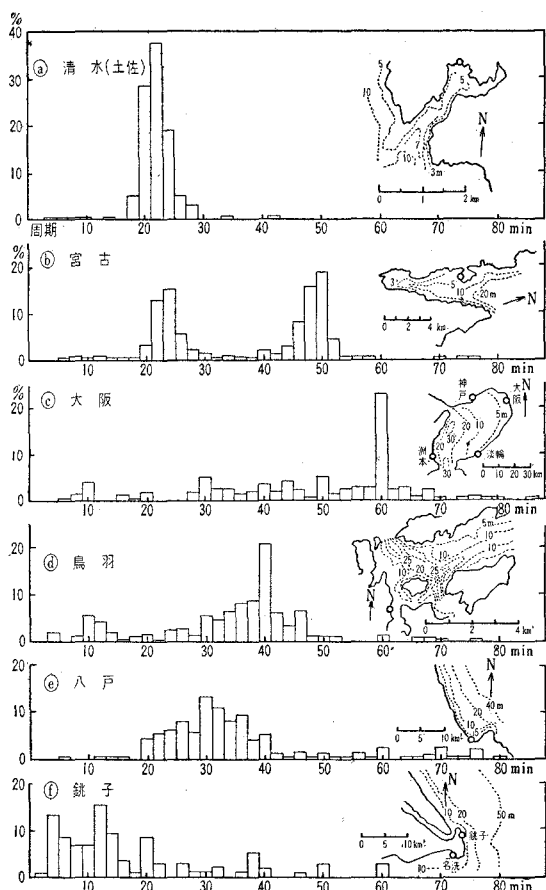
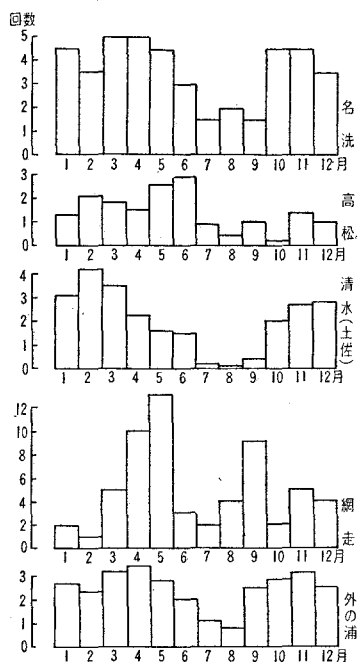


図-4 各月におけるセイシュの平均の発生回数 (表-1 参照)



短周期の波高が大きい、導水管が具合が悪いためである。なお 1953 年の 13 号台風のとき八丈島八重根で、周期が 2 分前後最大波高 3.5 m の波動が記録された (図-5 (b))²⁰⁾。津波や台風の際に大きなセイシュが見られるのは当然であるが (表-2)、一般的には強い風のとき必ずしもセイ

シュは発達してない。すなわち弱い前線で大きいセイシュが見られるのに、強い前線でそれほど顕著なものがない。また前線とか低気圧とか特別の気象現象が見られないのに、大きいセイシュが起っている例がかなりある。

次に季節変化について考えよう (図-4)。本邦東岸では名洗や鮎川で代表されるように、低気圧の通過回数の多い春と秋にセイシュの発生が多い。本邦南岸では東京や土佐清水に見られるように、むしろ季節風の強い冬に多く天気が安定している夏に少ない。本邦西岸の富江、女神も同様である。しかるに内海や大阪湾の諸港湾では 6 月にいちじるしく多い。これは多分梅雨前線の動向と関係しているであろう。冬はそれほど多くなく、8 月が最も少ない。オホツク海側は冬は結氷のため少なく、春と秋に多い。日本海側では夏に少ないのは大体共通しているが、多い季節はあまり定まっていない。外の浦では春と秋に多い。セイシュの始めと終りは明瞭でないから表-1 の継続時間はあまり正確ではないが、大体の傾向として規則正しい湾では継続時間が長く、2~3 日継続することもまれではない。定常前線が長期間存在しているときに、継続時間がいちじるしく長く数日に達した例もある。

4. 長周期波の起源

港湾は流体振動系であるから、この固有周期に近い周期をもった長周期波が進入してくれば、進入波の波高は小さくとも共鳴のために大きなセイシュが起りうる。しかも進入波は一般にスペクトルを構成し、かつ港湾のもっている若干の固有周期もそれぞれある巾をもっているから、選択作用によって共鳴する機会はかなり多いであろう。進入する長周期波の最も典型的な例は津波であるが、まれにしか起らないのでここでは問題にしないことにする。これから津波以外の長周期波の起源を調べてみよう。

(1) 波高の変動性に基因する長周期波

長周期波が風浪と同じ機構で発生することは、波があまりにも速いので考えにくい。しかるに波浪の非線形性

のために数分周期の波が生じることが Munk²¹⁾ と吉田²²⁾ によって示された。波浪の特性として相次ぐ波高は決して一様でない。Munk²¹⁾ によると砕波帯付近の水位は高い波群が続いてきたときは高まり、低い波群のときは低くなるので、長周期 (1分~5分) の水位変動が生ずる。この水位変動が surf beat であって、これは沖に向って進み、大洋を越え、あるいは全反射をくり返して岸に沿って伝わってゆき³⁴⁾、他の港湾にもセイシュを誘起することが期待される。彼は、いそ波帯のすぐ外側における surf beat の波高は、平均砕波高の 10% なることを示した。このような発生機構は洗練された方法で Tucker²³⁾ によっても確かめられた。一方において吉田²²⁾ は、波浪のスペクトルの一般的構造から海の波には数分周期のうなりがあり、これが非線形であるために数分周期の波動が生ずることを理論的に示した。それゆえ波の荒い外洋においてもまた、長周期波の発生が可能である。Munk と吉田のこの結論はきわめて注目すべきものと思われる。

静岡県御前崎地方では台風のうねりが来襲すると、海岸付近では長周期 (1~4 min) の水位の昇降が目立ってくる^{42), 43)} 一例を図-5 (c) (d) (e) に示す。これは当地方で「やっぴき」といわれているが、台風が遠くにあっても現われ、うねりと大体平行して発達または減衰をする。また台風が猛烈なほど「やっぴき」の波高や周期が大きい。その発生機構に関しては、Munk と同様な考え方も行われているが⁴³⁾、図-5 (e) によると最盛期においては、長周期波の波高はうねりの波高の 50~90% にも達しているの、量的に説明できるかどうか、検討を要する。なお発達した低気圧が日本海側を東進する場合にも、同様な長周期波が見られることがある。

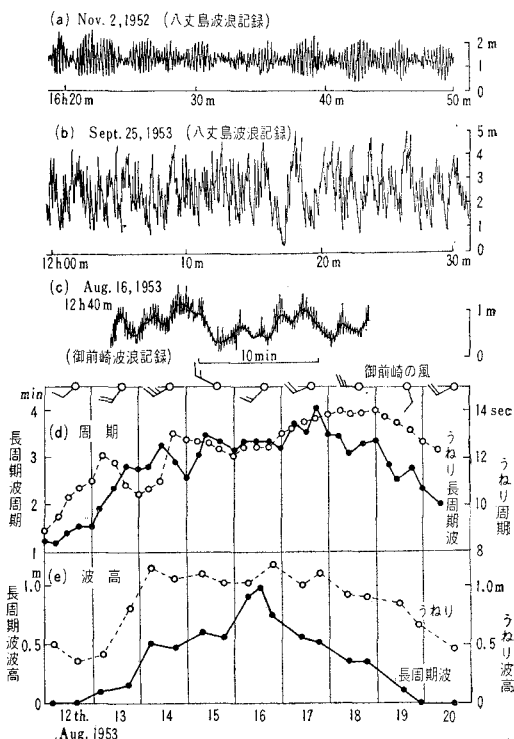
しかるにその付近に風も波も穏かであるのにセイシュが大きいとか、長周期波が進入してきて港湾が被害を受けたという例は相当に多い^{2), 17), 24), 25), 26)}。数分ないし数十分の周期と数mの波高をもって押寄せ、大きな被害を与える富山湾の寄廻り波も、普通の波浪で生じたものであるという考えもあるが²⁷⁾、まだ説明しにくい点がある。これを明らかにするには、まず何よりも寄廻り波の正確な記象が得られねばならぬ。駿河湾のいわゆる田子の浦津波¹⁾ も同様な事情にある。また城ヶ島や八丈島の波浪計に長周期の波動がしばしば記録されたが、波浪の波高と長周期波の波高とは無関係な場合が少なくなく、かつうねりのうなりが、いちじるしく顕著であっても、surf beat が現われない例も多い (図-5 (a))。これらは、surf beat の発生は地形的に制限を受けるということ、波浪に関係しない他の発生機構をも考えねばならぬことを示している。

(2) 微気圧変化に基因する長周期波

外洋に存在している長周期波をとらえることは、技術的に非常に困難で、現在のところその存在は岸近くで確かめられているにすぎない。Bascom²⁸⁾ は Oregon 州の Depoe 湾で 10~20 分間隔で 40 sec 周期の波が 3~5 コずつ群をなして進んでくるのを観測した。Knapp²⁹⁾ は特殊な反射器をつけた浮きをレーダーで追跡し、その振動状態を調べて距岸 23 km の沖にも長周期波が存在していると述べている。Munk 等³⁰⁾ は 6.4 km 沖に数分から 30 分程度の周期の波が存在していることを津波計で確かめた。Wilson²⁵⁾ は、セイシュの波高が満潮の時最大で、干潮の時最小になっている例をあげ、これは進入してきた長周期波が、潮流の影響を受けたためであると述べている。

一方において気圧や風の急変もしくは振動をとともう雷雨, squall line, pressure-jump line, 前線などが、

図-5



- うねりのうなり (beat) が顕著な例、しかし長周期波は現われてない (宇野木・中野²⁰⁾ による)。
- いちじるしい長周期波が現われている例、13号台風 (Tess) の場合 (宇野木・中野²⁰⁾ による)。
- 御前崎における長周期波「やっぴき」の例、Nina 台風の場合 (三宅⁴³⁾ による)。
- 同上台風による御前崎のうねりとやっぴきの周期の変化 (太田⁴²⁾ による)。
- 同上台風による御前崎のうねりとやっぴきの波高の変化 (三宅⁴³⁾ による)。

湖湾の上を通過する際にセイシュが発達することは, Forel, Chrystal³¹⁾ 以後多くの人によって指摘され, 理論的にも証明されている^{34), 36)}。従ってこのような気象現象が洋上に存在しているときにも長周期波が発生することが考えられ, 検潮記録と天気図を対応させたくわしい研究が中野³²⁾, Wilson²⁵⁾, 寺田・安井・石黒¹⁷⁾などによって行われた。

低気圧がわが国の太平洋側を通過した際, 各検潮所に現われた普通の周期のセイシュと数分周期の波動について中野³²⁾は次のように述べた。a) セイシュは低気圧接近の 6~12 時間前に起り始め, 長周期波は一般にこれより多少遅れる。低気圧が最も接近するころ波高は最大に達する(図-6)。b) 両波動とも付近の気象要素すなわち風, 気圧変化, 気圧傾度, 前線通過と直接関係していない。観測点と低気圧中心を結ぶ線上の平均気圧傾度の時間的变化 dG/dt が大きいとき, 波高も大きい。c) 結局これらの波動は低気圧の中心に近い所に起された波が伝播したもので, その原因は中心付近の微圧変化であろうと推論した。Wilson²⁵⁾ は同様な解析を多数行って, すべての強い低気圧は大い長周期波を生ずるもので, これは気圧と風の振動によるものであろうと述べている。風の振動を考慮しているのは注目される。

長崎海洋気象台¹⁷⁾の入念な調査によると, 長崎港奥において, 波高 50 cm 以上のセイシュは 2 年間に 115 回起ったが, そのとき長崎で明瞭な気圧振動が認められたのが 70 回 (61%), 不明瞭な気圧振動は 18 回 (16%) であった。長崎で認められなくとも, 西方 100 km の富江に気圧振動が起っている例も少なくない。このとき約 45 分の時間差があるが, これはちょうど長波が五島灘を伝わるに必要な時間に近く, 外海から長波が伝わってくることを意味している。このような例を加えると, 長崎港のセイシュの 83% は気圧振動と対応づけられ, さらに北または南に位置する場所の気圧振動を調べれば, この率はさらに増加することが期待される。

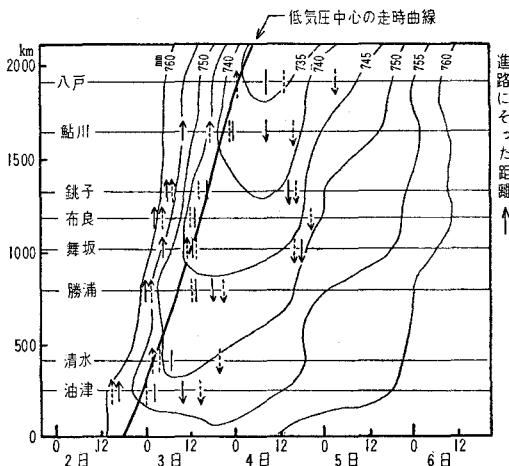
しかしながら, せいぜい数 mb の全振巾しかない気圧振動が, どうして 1 m 以上のセイシュを起しうるかという疑問が残る。たとえばメキシコ湾での観測によると, 静力学的に期待される値の約 70 倍の波高が生じている⁴¹⁾。今年の 2, 3 月頃本邦南部の各地に異常な水位昇降が起り, 名瀬では最大 235 cm にも達し(表-2), 騒がれたことがある。日本津波研究会(委員長: 地震研 高橋教授)は検討を重ねているが, 次のような見解に傾いている。おそらく海底火山の爆発や海底変動によるのではなく, 付近に寒冷前線が位置していて, 周期 10~30 min の気圧振動が記録されているから, 長周期波が発生したためであろう。鹿児島島の微圧変化は 3 mb であるが, 静力学的には 3 cm の波しか起らない。しかし東海は浅くて, その長波の速度は前線の速度に近いから, 前線が名瀬沖にきたときは静平衡値の数 10 倍の波高に達することが理論的に期待できる。これが湾内に進入すると, 津波の場合と同じくさらに増巾されるので, 2 m 程度のセイシュが起っても不思議ではない。検討は今なお続けられているので, その当否と詳細は同委員会の最終結論を待たねばならぬが, 量的な考え方の一例としてここに述べた次第である。

しかるに気圧振動といってもいろいろな種類がある。山元³³⁾によると, 気圧波 (microbarographic wave) は数個の山をもち, 周期は 2~30 min, 波速は 3~30 m/sec, 波長は 2~30 km 程度であるが, 全振巾は 1 mb にも達しない。気圧波の中にはこのほかに, 50~80 m/sec の非常に速い種類のものも, 時として見出される。一方ただ一つの山または谷からなる孤立波的な気圧変化も見られるが, その継続時間は 30 分か 1 時間程度, 波速は 10~40 m/sec, 気圧変化量はかなり大きく 0.5~7.0 mb である。このほかによく知られているのは squall line 上の顕著な pressure jump である。これらは波形や気圧変化量が異なるだけでなく, 発生原因, 発生場所も異なる。気圧変化のみ生じて他の気象要素には何らの変化を見ないこともある。従って長周期波の発生に関しては, 気圧変動の性格がもっと詳細に調べられねばならない。

(3) edge wave としての長周期波の伝播

surf beat が沖に向うとき, あるいは外洋から進入した長周期波が岸で反射して再び沖に向うとき, 水深変化の

図-6 低気圧によって各検潮所に生じた固有振動(縦の短い実線)と長周期波動(縦の短い点線)の起時(上向きの矢), 最大時(矢がない), 終時(下向きの矢)【中野³²⁾による】



ため反射または全反射をくり返して、浅海に捕えられ岸に沿って進むことが考えられる³⁴⁾。edge wave はこのような機構で生ずると思われるが、その存在は最初 Stokes³⁵⁾ によって理論的に見出された。この波は岸に平行に進み、波速は周期に関係する。たとえば海底の傾きが β になるとき、周期 T の波の速さは $C=gT \sin \beta/2\pi$ である。edge wave が伝わる沿岸では長周期波が記録され、湾内ではセイシュが誘起される。一例を図-7 に示す。California の Scripps において、pressure jump が通過するとともに津波計に数 cm の長周期波が記録された。しかしその北方 38 km の Oceanside においては気圧変動が無いにもかかわらず、Cauchy-Poisson 波型の長周期波が観測された。Munk 等³⁰⁾ は、後者の波は前者でできた edge wave が伝わってきたものと考えた。edge wave の存在を示す他の例も二、三彼等はあげている。なお、潮水に生じた edge wave も研究されている³⁶⁾。しかしながら、edge wave の実在性はまだ検討を要する点が多い。

5. 港内における長周期波の作用と被害対策

港内に進入する長周期波、あるいはそれで誘起されるセイシュは周期が非常に長いので、水粒子の水平運動が大きく、けい泊中の船を大きくゆり動かす。このため荷役作業が困難になることは日常経験されるし、ロープが切れたり、船が岸壁、ドック、棧橋、防波堤とぶつかって構造物や船体を傷める例も多数報告されている。港口がセイシュの節に当る所では流れが強くて、船が自由をうばわれ、事故が発生することもある。Los Angeles 港の海軍作業基地では周期 3 min の波が、わずかに 0.2 ft 以上の波高になるといつでも被害が生じている³⁷⁾。長崎では大きいセイシュが頻繁に現われるので、特にこの種の被害が多い。表-3 は被害例であるが、わずかに数カ月の間に相当数の事故が起っている。水が退いたとき底についた船が、水が差してきたとき浮び上がれず浸水沈没した例も少なくない。特に大きいときは水が陸上にあふれ、出水が起った例も報告されている。このようにセイシュをふくむ長周期波の存在は、港湾関係者にとって無視できないので、surge, scend, undulation, run, groundswell, ressac, range などの名前で注目されてきた²⁵⁾。特にその重要性を主張した先覚的港湾技術者は Mitchell³⁸⁾ であるといわれている。それ以後被害対策を講ずるため、観測や実験が重ねられてきた^{17), 26), 37), 39)}。

表-3 長崎港のセイシュによる船舶の被害
 【文献 17) による】

年 月 日	周期 (min)	波高 (cm)	船の 種類*	積荷	被害金額 (1000円)	被害内容
1949 12 18	15	142	H K	石炭 木材	1 000 450	4 隻沈没 船橋舷側破損
" 12 20	13	120	H K	鋼材 漁獲物	600 150	2 隻波損 舷側破損
" 12 26	20	178	H K	雑貨 船	300 500	1 隻坐礁沈没 1 隻船底大破
1950 1 2	20	99	H	雑貨	200	16 隻ロープ切断
" 1 30	12	120	H K	" "	200 300	労務者負傷、荷役中止 荷役中止
" 3 7	15	110	H K	石炭 "	700 200	2 隻船底大破 船底小破
" 6 18	13	100	K	"	200	舷側小破
" 6 25	12	121	K	雑貨	200	荷役中止
計					5 000	

* H: はしけ船, K: 機関船

surge の波高を減ずる方法として、港口巾を航行にさしつかえぬ程度に減少することが考えられる。模型実験によると(図-8 ④)、港口巾を 2000 ft から 600 ft に減じたため、波高を 50% 以下に減ずることができた³⁹⁾。しかしこの減少度は周期によって異なることに注意されねばならぬ。また波長が大きいため回折が顕著になるので港口の位置は波高を減ずる上に、それほど重要でないといわれる。さらに別に防波堤を設けたり、あるいは港内を分割したりして、影響の大きいセイシュの型を変えることも考えられる。長崎港について実験された結果を(図-

図-7 コーシー・ポアソン波タイプの edge wave の例
 (Munk, et al.³⁰⁾による)

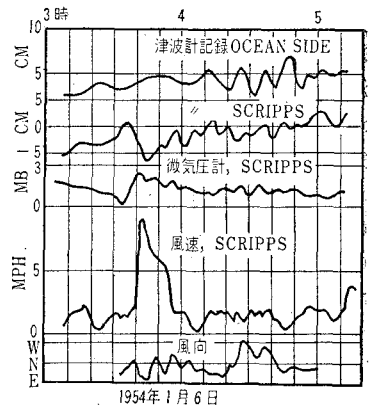
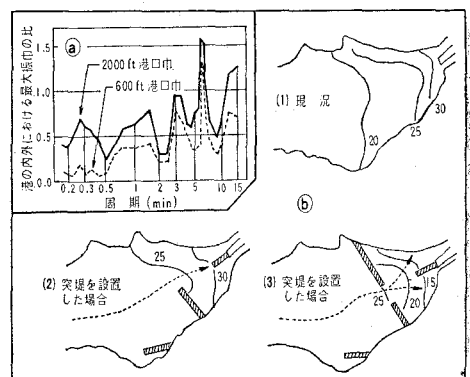


図-8



- ④ Los Angeles-Long Beach 港の海軍突堤付近のセイシュの最大振巾と周期との関係 (Vanoni and Carr³⁹⁾ による)
 ⑤ 突堤を設置した場合の、長崎港におけるセイシュ(第2振動)の振巾の変化 寺田・安井・石黒¹⁷⁾による)

8 ⑤ に示す。Wilson²⁵⁾ は、外側に緩衝水域を設けてエネルギーを吸収させ、この内側の水域を守るのが最も有効であると主張している、このような機能をもつ港として、Long Beach 港、Guam の Apra 港、Cape Town 港などの名があげられる。同じ港内でも場所によって水の動きが異なり、ときとして 10 倍も差がありうる。さらに振動のモードに応じて、この事情は異なってくる。そこでドック、棧橋、けい泊場所などを静穏域に設置することがまず何より必要である。これらに関しては水理模型実験が有効であるが、石黒¹⁸⁾ の行った電子工学の simulator を用うる実験法も有意義であると思われる。

一方において、船の運動を抑制するけい船方式の研究も二、三行われている^{25), 27)}。この場合けい船の自由周期が、港内で起りうる surge の周期に近くないことが必要である。しかし船、ロープをふくむこの振動系は非線形であるから、取り扱いが面倒である。普通の商船は 1 min から 25 sec の自由周期で動くが、ゆるくつながれているときは長い周期で、固くつながれているときは短い周期で振動ししやすい。その他消極的方法であるが、船の接触による圧力を緩和させるために、岸壁、棧橋、防波堤の縁辺に付加すべき緩衝装置や防護装置の研究も行われている。

さらに被害を予防するため、surge の予報が望ましい。長周期波の発生機構が明らかになって、天気図からその発生位置と時刻が見出され、また波浪予報が進歩して surf beat の予測がつくようになれば、津波の場合と同じようにその伝搬経路をあらかじめ求めておけば、surge の予報も必ずしも不可能ではないであろう。事実長崎においては、五島灘周辺に微圧計を設置して、気圧振動を捕えてセイシュを予報しようとする計画もあると聞いている。あるいは逆に Munk⁴⁰⁾ が述べているように、長周期波は storm よりいちじるしく速いので、うねりの前駆波よりもっと有効に、storm を追跡するに利用できるかも知れない。それにしても何よりもまず長周期波の性状を明らかにするのが必要であって、このためにはできるだけ沖合の長周期の水位変化をつかむことと、大洋の全域にわたり観測網を敷くことが要求される。昨年の地球観測年の海洋部門で、長波観測がとりあげられたのもこのような事情による。終りに、本報告で Dr. Wilson の論文²⁵⁾ を種々参照したことを付記しておく。

参 考 文 献

- 1) 大森房吉 (1900): 日本に於ける津浪に就きて、震災予防調査会報告, 34
- 2) 本多・寺田・吉田・石谷 (1908): An investigation on the secondary undulations of oceanic tides, Jour. Coll. Sci. Univ. of Tokyo, 24
- 3) 日高孝次: 1931~1939 の間の 40 余のセイシュに関する論文、主に海と空, Geophys. Mag., Mem. Kobe Mar. Obs., 神戸海洋時報などに掲載
- 4) 壺井伊八 (1935, 1937): 平滑なる周辺を有し細長からざる湖水の自由振動, 海と空, 15, 189-194; 11, 212-213; (1936): 等深ならざる湖水の自由振動, 海と空, 16, 301-304
- 5) 市栄誉 (1956): On the secondary undulations caused by the Typhoon "5415", Oceanogr. Mag., 8, 97-122
- 6) 宮崎正衛 (1951): 大阪湾沿岸の高潮について, 海洋報告, 2, 103-114; (1957): On storm surges which recently struck the Japanese coast, Oceanogr. Mag., 9, 209-225 (第 3 回海岸工学講演会講演集, 1956, 1-8)
- 7) 中野猿人 (1937): On the accumulation and dissipation of energy of the secondary undulations of oceanic tides in a bay, Geophys. Mag., 12, 139-159
- 8) 高橋浩一郎 (1938): On the accumulation and dissipation of energy of secondary undulation of bays, Geophys. Mag., 12, 283-290
- 9) 高橋竜太郎 (1959): Long wave recorder, その記録と結果, 海洋物理基礎研究会講演
- 10) 大森房吉 (1918): 東京湾の津浪に就きて, 震災予防調査会, 89, 19-49
- 11) 中村左衛門太郎 (1919): 東京湾内津浪調査, 気象雑纂, 1, 189-210
- 12) 寺田一彦 (1935): 気象集誌, 13, 62-66, 408-413; 西村源六郎 (1935): 震研集報, 別冊, 2, 1 および 29; 広野卓蔵 (1936): 気象集誌, 14, 348-370; 山田彦児 (1936): 海と空, 16, 353-366; 和達清夫 (1938): 海と空, 18, 421-438; 和達・松尾 (1939): 海と空, 19, 70-76; 野満・竹上・松崎 (1940): 地球物理, 4, 93; 市栄誉 (1951): 海洋報告, 2, 191-198; 宮崎正衛 (1951): 海洋報告, 2, 103-113; (1952): Oceanogr. Mag., 4, 1-11
- 13) 力武恒雄 (1949): 潮静振に関する一例題, 海洋報告, 1, 207-211
- 14) 岡田・藤原・前田 (1913): On thunderstorms as a cause of seiches, Proc. Tokyo Mathe. Phys. Soc., 7, 210
- 15) 長岡半太郎 (1908): 文献 2) 本多・寺田・吉田・石谷の Preface
- 16) 中野猿人 (1933): Possibility of excitation of secondary undulations in bays by tidal or oceanic currents, Proc. Imp. Acad., 9, 152; 中野・阿部 (1958): Standing oscillation of bay water induced by currents, Geophys. Mag., 28, 375-397
- 17) 寺田(一)・安井・石黒 (1953): 長崎港の副振動について, 長崎海洋気象台報告, 4, 1-73
- 18) 石黒・藤本 (1955): An analytical method for the oscillations of water in a bay or lake, using an electric network and an electronic analogue computer, Journ. Oceanogr. Soc. Japan, 11, 191-197; 石黒 (1959): Phil. Trans. Roy. Soc., London, A 251, 303-340
- 19) 中野・宇野木 (1957): 日本沿岸における潮汐副振動について, 日本海洋学会講演 (印刷準備中)
- 20) 宇野木・中野 (1955): On the ocean waves at Hachijo Island, Pap. Met. Geophys., 6, 63-86
- 21) Munk, W.H. (1949): Surf beats, Trans. Am. Geophys. Union, 30, 849-854
- 22) 吉田耕造 (1950): On the ocean wave spectrum with special reference to the beat phenomena and the 1-3 minute waves, Jour. Oceanogr. Soc. Japan, 6, 49-56
- 23) Tucker, M.J. (1950): Surf beats, sea waves of 1 to 5 minute period, Proc. Roy. Soc., London, A 202, 565-573
- 24) Knapp, R.T. and Vanoni, V.A. (1945): Wave and surge study for the Naval Operating Base, Terminal Island, California, Rep. Hydr. Struc. Lab., CIT, 241 pp
- 25) Wilson, B.W. (1953): Generation of long period seiches in Table Bay, Cape Town, by barometric oscillations,

- Trans. Am. Geophys. Union, **35**, 733-746; Wilson, B.W. and Abramson, H.N. (1955): A further analysis of the longitudinal response of moored vessels to sea oscillations, Texas A. and M. Res. Found.; Wilson (1957): Origin and effects of long period waves in ports, 19th Int. Naviga. Congr. 49 pp
- 26) 大道寺・宇野木・梶浦 (1954): Tess 台風と Alice 台風による八丈島の波浪, 研究時報, **6**, 221-229
- 27) 北出正清 (1952): 「寄廻り」波の機構と予知, 海洋報告, **2**, 419-445
- 28) Bascom, W. (1950): Surging in Depoe Bay, Oregon, Bull. Beach Erosion Board, **4**, 32-39
- 29) Knapp, R.T. (1951): Determination of wave, surge and ship motion, Rep. to Bureau Yards and Docks, U.S. Navy
- 30) Munk, W.H., Snodgraas, F. and Carrier, G. (1956): Edge waves on the continental shelf, Science, **123**, 127-132
- 31) Chrystal, G. (1908): Investigations of the seiches of Loch Earn, Trans. Roy. Soc., Edinb., **46**, 455-517
- 32) 中野猿人 (1939): 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**, 140-154
- 33) 山元竜三郎 (1957): A study of the microbarographic waves (IV), Jour. Met. Soc. Japan, **35**, 37-44; A study of the microbarographic depression- and elevation-type, ibid, 105-116, 160-169
- 34) Isaacs, J.D., Williams, E.A. and Eckart, C. (1951): Total reflection of surface waves by deep water, Trans. Am. Geophys. Union, **32**, 37-40
- 35) Stokes (1846): Brit. Ass. Rep.; Lamb (1932): Hydrodynamics, 446; Ursell, F. (1952): Edge waves on a sloping beach, Proc. Roy. Soc. (London), A **124**, 79-97
- 36) Donn, W.L. and Ewing, M. (1956): Stokes' edge waves in Lake Michigan, Science, **124**, 1238-1242
- 37) Knapp, R.T. (1951): Wave produced motion of moored ships, Proc. 2nd. Conf. Coast. Eng., 48-61, (海岸工学 II, 丸善, 315-327)
- 38) Mitchell, J. (1919): Discussion at Symposium on wave action in harbors, Proc. ICE (London), **209**, p.244
- 39) Vanoni, V.A. and Carr., J.H. (1950): Harbor surging, Proc. 1st Conf. Coast. Eng., 60-68, (海岸工学, I, 丸善, 66-74)
- 40) Munk, W.H. (1951): Ocean waves as a meteorological tool, Compendium of Meteor., 1090-1100
- 41) IGY Bulletin, No.22 (1959)
- 42) 太田芳夫 (1958): 御前崎における台風と波浪, 天気, **5**, 223-229
- 43) 三宅 勉 (1955): 海岸付近に見られる長周期の波, 東京管区気象台東海地方東部地区研究会講演