

清水港の振動特性

小 菅 晋*・宇野木早苗**・斎 藤 晃***

要 約 清水港の検潮記録、港内4点における同時観測、および水理模型実験に基づき、清水港におけるセイシェ（潮汐の副振動）の卓越周期、振動モード、発生回数と発生条件、季節変化などを検討した。その結果、今までの検潮所1点のみの観測では把握できなかった清水港の振動特性をかなり明らかにすることができた。卓越周期は、約 10 min, 20 min および 40 min の前後であるが、振動の応答曲線は場所により著しく異なる。一方、清水港の拡張計画に基づく外防波堤や埋立等が、振動特性におよぼす影響についても実験的に検討し、振動のモードにはあまり大きな変化は現われないが、振幅はある程度減少し、その効果は周期の小さい方に大きいことが認められた。

1. ま え が き

港湾は一種の流体振動系なので、外洋からの長周期波の来襲や、直接的な外力の作用により、容易に振動（港湾のセイシェ、または潮汐の副振動）を開始し、時として港湾の機能を阻害し、また大きな被害を与えることもある。図—1 に示す清水港（長さ 6.5 km, 港口幅 3 km）も、その形状から推察されるように振動が起こりやすく、微小な振動は絶えることが無いといっても過言ではない。そして津波や台風高潮に附随する振動のため、低

地部に浸水が見られることがあるが、特に 1960 年 5 月 24 日のチリー地震津波の際には（図—3 C）、海水の越流による広範囲の浸水の他に、約 10 万本の材木が流失し、さらに港奥部の折戸湾内（図—1）の真珠、カキ養殖場が全滅するという損害を蒙った¹⁾。

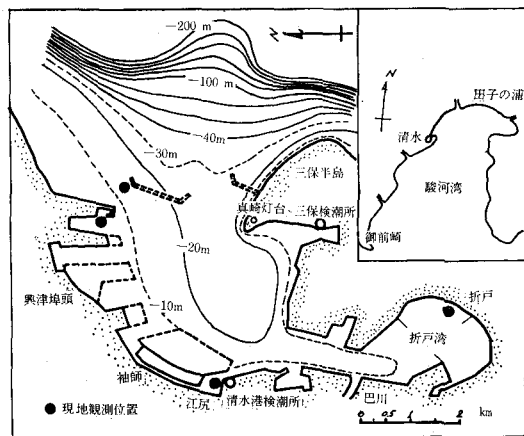
清水港の副振動については、天野²⁾が静岡地方気象台管理の清水港検潮所における 1959 年の 1 年間の記録に基づき、波高と周期の頻度分布、季節変化と日変化および気象条件との関係について検討し興味深い結果を報告している。しかしながら、局地的影響を強く受けている 1 点における観測記録からのみでは、港湾全体の振動特性を把握するのはなかなか困難で、振動モードの決定も任意性が強い。一方、最近の港湾施設の不足を解消するため、清水港拡張計画が策定され、現在外防波堤の構築、埠頭の建設や埋立が進捗中である。このため、地形状況にかなりの変化が生じて、港湾の振動特性が異なってくる可能性があり、災害対策の面からも、その変化を把握しておく必要が感じられる。

そこでわれわれは、過去 13 年間の検潮記録に現われた顕著副振動をとりまとめるとともに、現地観測および水理模型実験を実施し、清水港の振動特性を全体的に明らかにするように努めた。本報告では、これらの観測と実験の結果を示すとともに、港湾拡張に伴う振動特性の変化について述べる。

2. 検潮記録に現われた顕著副振動

清水港は 図—1 に示されるように長さ約 1.5 km, 幅数 100 m の狭い水道によって、外洋に近い比較的深くて幅の広い狭義の清水港と、狭くてきわめて浅い湾奥部の折戸湾に分けられる。清水港検潮所は、前者の海域の奥に位置する江尻に設けられている。しかし、近年その機能が悪化したため、1971 年にはこの検潮所は廃止になり、新たに三保半島の尖端付近に新検潮所が建設された。われわれは 1958 年 1 月から 1970 年 12 月まで 13 年の間に旧検潮所で得られた副振動の記録と検潮概報の記事に基づいて検討を行なうことにする。

図—2 と 3 に代表的な清水港の振動記録例を示す。図—2 の A は台風 26 号（1966 年 9 月）による場合で、一般的な水位上昇（高潮）の上に、周期 20 min の振幅が卓越し、さらに 10 min や 5 min の振動が見出される。



図—1 清水港概略図

* 正会員 東海大学講師 工学部
 ** 正会員 理博 理化学研究所主任研究員
 *** 正会員 工修 東海大学助教授 工学部

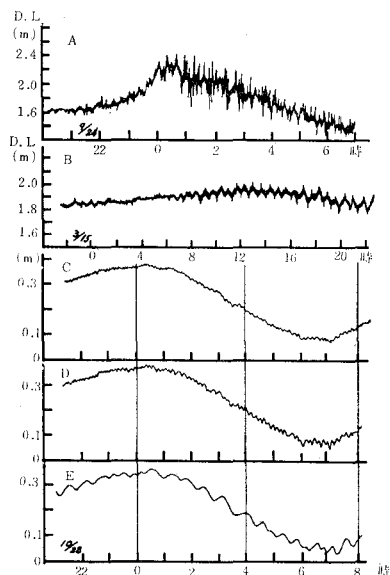


図-2 水位の振動記録

A: 1966. 9.24~25 (江尻) 26号台風
 B: 1960. 3.15 (江尻) 発達中の二玉低気圧通過
 C: 1970.10.28~29 (興津)
 D: 1970.10.28~29 (江尻) } 三点同時観測
 E: 1970.10.28~29 (折戸)

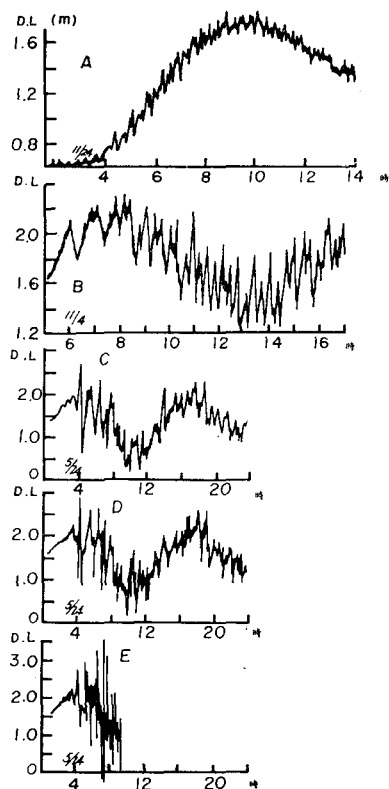


図-3 振動記録例

A: 近地震津波 (房総沖地震), 清水, 1951.11.24
 B: 遠地震津波 (カムチャッカ地震), 清水, 1953.11.4
 C: 遠地震津波 (チリ地震), 清水, 1960.5.24
 D: 遠地震津波 (チリ地震), 内浦, 1960.5.24
 E: 遠地震津波 (チリ地震), 御前崎, 1960.5.24

図-2 の B は発達中の低気圧 (1960 年 3 月) が通過した場合で周期 20 min の振動が卓越しており, 振幅が徐々に発達していく過程がうかがえる。

しかし, 清水港で振動が特に発達するのは, 地震津波の場合で, 過去 13 年間における最大のものは, チリ地震津波によるものであって, そのときの記録を 図-3 C に示す。卓越周期として 60 min が認められる。同図の D, E には, 同じ駿河湾内に位置する内浦と御前崎 (図-1 内挿図) における津波の同時記録が, 比較のために示されているが, いずれも 60 min 周期が卓越し, 最初の数波は 3 地点とも位相はきわめてよく一致している。したがって, この長周期の振動は清水港自体のものではないと考えられる。また一方駿河湾外の大島岡田港, 伊豆東岸の伊東や河津浜の記録とも類似していること, および湾口の御前崎で大きいことから, 駿河湾全体の振動とも考え難く, 湾外からの進入波に直接強制されたものと見なされる。図-3 B のカムチャッカ地震による津波にも同じような長周期の振動が現われている。しかるに同図の A に示されるような近地震の場合には, 周期 12 min の短かい振動が卓越し, 前記の遠地震の場合と著しい対照をなしている。

検潮概報に記載されている 646 個の副振動について, 周期と波高を集計し, それらの頻度分布を 図-4 に示す。明らかに 20 min, 10 min, 5 min 前後の周期の所にピークがあり, 天野²⁾の報告と一致している。これらが全体の中に占める割合は 18~21 min のものが 40%, 9~12 min が 25%, 5~6 min のものが 15% である。それぞれがどのような振動モードであるかは後で議論する。なお, 40 min の所に小さなピークがあることに注意を要する。波高の出現は 10 cm の所にピークがあり, それより

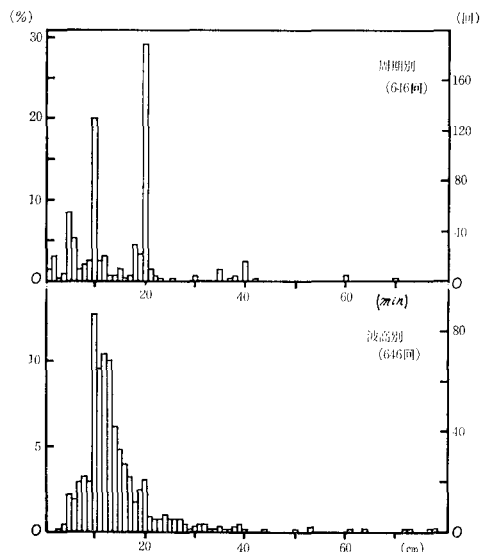


図-4 発生頻度分布 (1958.1~1970.12)

大きい方には指数関数的に回数が減少している。元来 10 cm より小さいものは、さらに出現回数が多いはずであるが、微弱なため読取られぬことが多く、図のような結果になったものと思われる。

いま波高が 30 cm 以上の大きな振動に注目すると、総数 31 個ほどである。大ざっぱに原因別に分類すると、台風によるもの 74%，台風以外の気象じょう乱によるもの 16%，地震津波によるもの 4%，その他原因が明りょうでないもの 6% となる。これらの中で、波高の大きい順に 10 個を選び、それらの平均周期、最大波高、継続時間とともに発生原因あるいは気象状況を示すと、表—1 のようになる。最大のものは波高 188 cm，周期 60 min の上記チリ—地震津波であって、その継続時間も他のものに比べて著しく大きい。地震津波としては、その他に 1952 年のカムチャツカ地震によるものが表—1 に含まれている。地震津波は、30 cm 以下のものも含めれば、平均して 1~2 年に 1 回ぐらいの割合で記録されている。

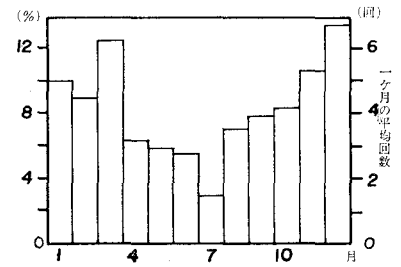
表—1

順位	年 月 日	平均 周期 (min)	最大 波高 (cm)	継 続 時 間	気 象 状 況	
1	1960	5.24	60	188	5.24.04～ 5.31.	チリ—地震
2	1958	9.25	5	78	9.25.21～ 9.27.24	台風 22 号 (狩野川台風)
3	1959	8.14	9	77	8.14.01～ 8.15.01	台風 7 号
4	1953	11. 4	40	76	11.4.06～11.11	カムチャツカ 地震
5	1958	9.18	6	73	9.13.23～ 9.18.24	台風 21 号
6	1959	9.27	8	72	9.25.07～ 9.28.14	台風 15 号 (伊勢湾台風)
7	1966	9.25	5	64	9.25.0 ～ 9.25.01	台風 26 号
8	1958	7.23	4	61	7.20.01～ 7.24.09	台風 11 号
9	1965	9.18	6	53	9.17.06～ 9.18.10	台風 24 号
10	1966	9.25	10	50	9.25.0 ～ 9.25.18	台風 26 号

大きさは津波に劣るが、顕著な副振動の中で発生回数が圧倒的に多いのは台風の場合であり、上記のように波高 30 cm 以上の 74% を占めている。台風の場合で最大のものは、1958 年の台風 22 号（狩野川台風）によるもので波高 74 cm，周期 5 min であった。低気圧や前線等によってはあまり顕著なものは現れない。しかし小さいものを含めると、こちらの方が回数が多く、特に、日本海に低気圧がある場合と、太平洋側の南岸に低気圧が存在するような気圧配置の場合に発生することが多い。なお気圧変動に伴って副振動が現われることがある。天野²⁾が 82 回の副振動について、気圧変動の有無を調べたところ、34 回には何らかの気圧変動が認められた。ただし、長周期波の発生は気圧変動の性質（周期、継続時間、場所等）に強く依存するので、直接的な対応関係をつけるには、もっと詳細な観測が必要である。

読取りの精確をさけるため、10 cm 以上の波高をもつ副振動を対象にして、月別の平均発生回数を水めると、

図—5 のようになる。波高 10 cm 以上の発生回数は年平均 50 回で、11 月~3 月の寒候期に多い。これは低気圧や前線の通過が多いためである。一方、天気が安定している 7 月は発生回数が最も少ない。台風期は発生回数は少ないが波高の大きいものが多い。



図—5 月別発生回数(10 cm 以上)
(1958.1~1970.12, 566 回)

3. 現地観測による結果

前節に清水港検潮所の記録に基づいて清水港の副振動を調べたが、副振動は局地的な強いもので、この結果が必ずしも清水港全体を代表しているわけではない。たとえば、検潮所がある振動系の節の部分に位置していると、その振動系はほとんど記録されないか、あるいは微弱な波高しか現われないことになる。そこで港全体の振動を理解するため、1970 年の 10 月 26 日~11 月 7 日、および 1971 年の 10 月 19 日~11 月 20 日の 2 回にわたり、現地 4 点にて同時連続観測を実施した。観測点は図—1 に示されているように、振動のモードを考慮して、外防波堤（建設中）付近の観測塔、興津埠頭、江尻および最も奥の折戸湾奥部（東海大学海洋学部臨海実験場棧橋）であり、検潮所の記録と併用して解析を行なった。観測には、底部付近に外海と通ずる小孔を有する径 30 cm のパイプを海面に直立固定し、内部水面に小浮子を浮かべ、これの昇降を記録する方式の簡易水位計を使用した。なお、外洋に面する観測塔の場合には波浪が荒いため、簡易装置では満足できる記録は得られなかった。

興津、江尻、折戸の 3 点における同時記録例を図—2 の C, D, E に示す。このようにして水位計で得られた記録から、各振動ごとに周期、波高を読取り、また 3 点の位相を比較した。読取った波の数は興津 667 個、江尻 964 個、折戸 1163 個と、港口から港の奥に進むほど、数が増えていて、波高が大きくなることが理解できる。図—6 に 3 点における周期の発生回数を比較したものを示す。

図から明らかに、興津と江尻は発生頻度分布が比較的似ているが、折戸は著しく異なっていることが注目される。すなわち興津、江尻では、約 20 min のものが最も多く、次に約 10 min のものが第 2 ピークを形成している。（ただし興津においては、10 min 前後と 20 min 前後の分離が、江尻に較べて明りようで、しかも 20 min 前後における中心周期が、低い方に位置している）。しかるに折戸湾においては、約 20 min の周期は前二者と

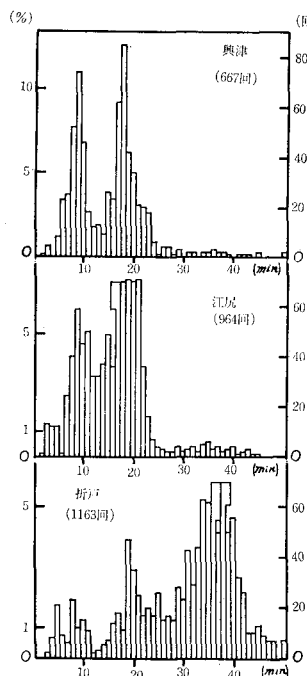


図-6 周期別発生頻度分布
(1970.10~11, 1971.10~11
の現地観測による)

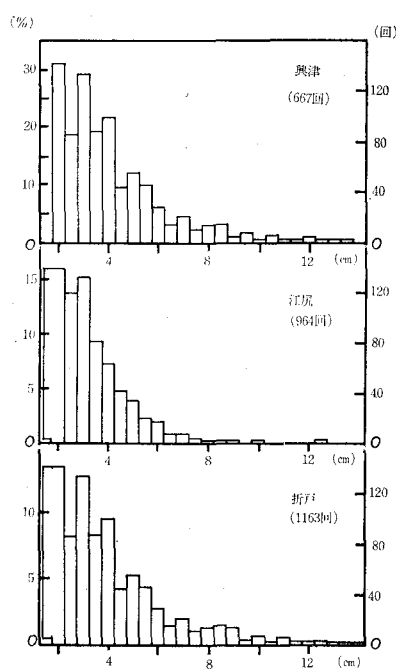


図-7 波高別頻度分布
(1970.10~11, 1971.10~
11の現地観測による)

共通して発現しているが、約 10 min のものはごく微弱になり、その代り前二者ではほとんど目だたなかった 34~40 min の周期の振動が著しく卓越してくる。このことは清水港の検潮記録からはとうてい想像できないことである。

波高の頻度分布は 図-7 に示してあるが、観測期間中にはあまり大きな波高は現われず、分布の型も、図-4 の波高別の場合と同じである。ただ 図-2 に明らかなごとく、折戸湾においては、卓越周期 34~40 min で他の測点にくらべ全般的に波高が大きい傾向にある。次に位相について調べてみると、20 min 前後の周期をもつ振動系では、興津と江尻は同位相で、折戸は逆位相になっていて、江尻と折戸の間に節があることが知られる。一方、約 40 min の振動系では、三者とも同位相であって、この振動系は港全体の振動なることが想像できる。

4. 水理模型実験による結果

上述の観測事実を確認し、また清水港の振動特性をさらに明確にするため、水理模型実験を実施した。模型は水平縮尺 1/2 500、鉛直縮尺 1/300 のひずみ模型で、10 m × 4 m × 0.6 m の水槽の一端に作製し、他端には気圧式造波装置を設けた。水位は圧力式波高計を用いて測定した。測定点は格子状(間隔 500 m)に配置された、港内約 30 点と沖波測定点である。Froude の相似則に従えば、時間縮尺は 1/144 となる。模型表面はモルタル仕上げと

したが、粗度を十分に調整することは困難で、波高に関する相似は必ずしも十分とはいえない。入射波高は 3 mm から 5 mm (原型 0.9 m ~ 1.5 m) とし、周期は 2 sec から 19 sec (原型 4.8 min ~ 45.7 min) の間を変化させた。以後実験結果はすべて原型に換算して示すことにする。

入射波の周期を種々変えた場合の港内水位の応答曲線を 図-8 に示す。図で黒丸は拡張前、白丸は拡張後である。港奥の折戸湾においては、20 min 前後と 40 min 前後の所にレスポンスの大きい所があり、現地の観測結果を裏書きしている。これらのピークでは波高は入射波高の 7 倍程度にも達するが相似の関係で、この数字がそのまま事実を十分近似しているとは断定できない。一方、港内の江尻付近における応答曲線によれば、折戸湾の湾奥の応答と異なり、20 min 前後の所に大きな、40 min, 10 min の所に小さなピークが見

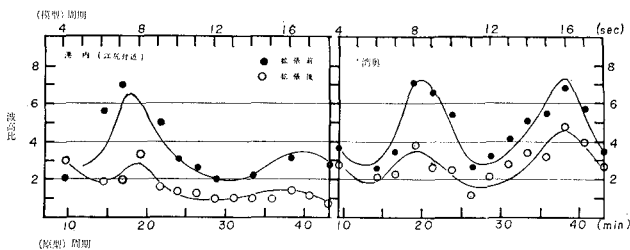
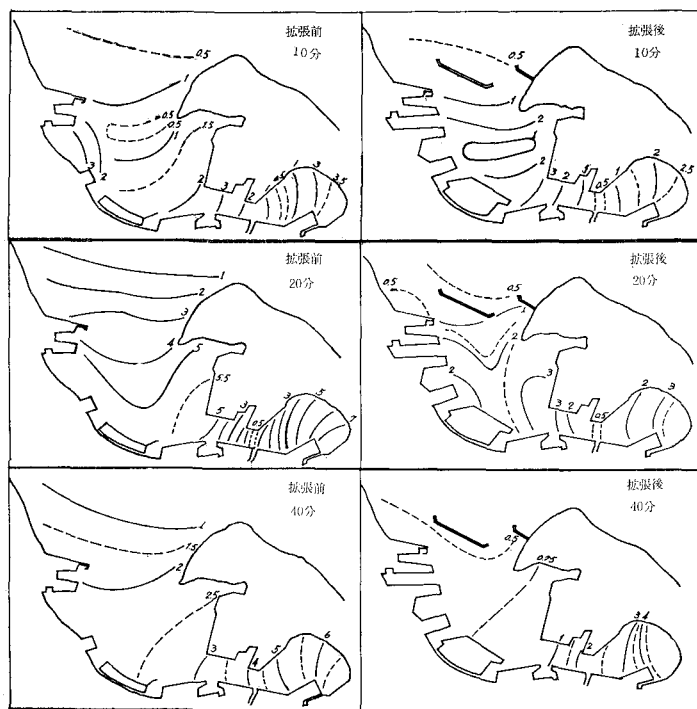


図-8 江尻と湾奥における振動応答曲線

られ、これも現地観測の結果とよく対応している。なお、白丸の拡張後の結果についてはあとでべる。

次に周期約 40 min, 20 min, 10 min 前後の場合の位相と波高の分布を港湾拡張前と後で比較したものを 図-9 に示す。まず拡張前のものについてみると、約 40 min のものは、港内全部が同位相で、奥に入るほど波高が大きくなっていて、この振動系は折戸湾を含めた清水港全体の基本縦振動なることが理解できる。なお、この流体振動系の節は、港より外側の水深が急激に深くなる付近に位置していて、単に陸上地形から推測することは困難である。一方、20 min の振動系は双節振動で、節は港口外側の急傾斜付近と巴川河口付近にあり、腹は江尻付近と折戸湾奥に認められる。10 min 周期のものは、図-9 に示すように 3 つの節線が認められ、振動の腹としては、興津埠頭付近、巴川河口付近、折戸湾奥部に波高の高まりが認められる。なお、この周期の振動系では興津側と三保半島側では逆位相になっていて、縦振動の高調波と



图—9 波高比分布

ともに、狭義の清水港の横振動も重なっているように思われる。検潮所で、割合発生率の高かった約 5 min 周期の振動は、港内における分布は複雑で節線の位置も確定せず、むしろ検潮所の位置した江尻港付近の小水域の局部的振動と考えられる。

次に、外防波堤や海岸埋立を含む港湾拡張後の振動について考察する。拡張によりつけ加えられる地形は、図—1 の点線で示されている。拡張前と拡張後の 2 点における応答曲線の比較は 図—8 になされている。湾奥の折戸湾について見れば、全般的に波高は小さくなっているが、その減少の割合は周期の短い方が顕著である。すなわち、40 min の振動では波高は 2/3 程度に小さくなるが、20 min では波高は約半分近くになっている。また、港内の江尻付近においてもほぼ同様な結果が得られている。振動のモードについては、模型が小さく精度があまり良くないこともあるが、図—9 の位相の分布から知れるように、拡張前と拡張後とで特に顕著な変化は認められなかった。

5. おわりに

検潮記録，同時現地観測，水理模型実験に基づき，清

水港の振動特性を検討した結果、約 10 min, 20 min, 40 min の振動が卓越することが認められ、その振動モードも明らかになった。特に約 40 min のものは従来の検潮記録ではほとんど現われなかったもので、これは折戸湾までを含めた清水港の基本縦振動なることが明瞭になった。この振動は、遠地津波のように長い周期の入射波に対しては、よく応答することが予想され、チリー地震津波の際、特に折戸湾で被害が大きかったことも納得できる。約 20 min 周期のものは双節の縦振動、約 10 min のものは3節の縦振動と狭義の清水港の横振動が重なったもので、狭義の清水港にのみ卓越する。

振動のモードが定まったので、水域の長さや平均水深を用いて、Merian の式から固有振動周期を計算すると基本振動系として 42.5 min, 2 節の振動系として 14.2 min, 3 節の振動系として 8.5 min となる。また、興津と三保半島尖端との間で生じる横振動系では 13.4 min となり、上記の振動周期に大体近値となった。な

謝 辞: 本研究を行なうに当たり資料収集に格別の配慮を賜った静岡地方気象台の関係諸氏, 特に文献と助言をいただいた天野充氏に厚くお礼申し上げる。また現地観測および模型実験に熱心に協力していただいた, 当時の東海大学海洋学部学生である久佐野晴政, 高橋法雄, 渡辺寛, 渡部隆夫, 山本直人, 片山裕功, 松浦和文の7君に深謝しなければならない。なお, この研究の一部は文部省科学研究費によって行なわれたことを付記し, 謝意を表する。

参考文献

- 1) The Committee for Field Investigation of the Chilean Tsunami of 1960 (1960): Report of the Chilean Tsunami of May 4, 1960, as observed along the Coast of Japan, Maruzen, 397 pp.
- 2) 天野充 (1962): 清水港の顕著副振動について, 東海地方気象研究会誌 第16巻, pp. 20~26.