

仙台港における既存資料および現地観測からの副振動解析

沼田 淳*・阿部至雄**・高橋敏彦***・相原昭洋****

1. はじめに

塩釜港・仙台港区は、宮城県仙台市より東方へ約 10 km の所に位置しており、東北地方の流通拠点港湾として益々重要な役割を担いつつあるが、反面、船舶の安全性と港湾の稼働率向上のため、港内の振動特性を把握しておくことが必要であると考えられる。

そこで本研究では、まず同港区における最近 6 年間(1974 年～1979 年)の検潮記録より副振動の波高・周期を読みとり、異常な副振動が発生するときの気象・海象条件について検討を加えた。つぎに、台風 7920 号を例にとり台風通過時の湾水振動特性の経時変化について考察し、最後に、港内 3 地点の同時観測記録と一数值計算結果を比較検討することにより、仙台港の副振動現象の実態を把握することを目的とした。

2. 検潮記録に現われた異常な副振動

塩釜港仙台港区では、昭和 46 年頃から中央航路入口の船だまり奥部(図-1 参照)にフース型検潮器を設置し、潮位観測を実施しているが、最近 6 年間(1974 年～1979 年)の潮位記録から、毎偶数時の前後 1 時間内における副振動の最大波高およびその周期を読みとり、その中から最大波高が 45 cm 以上になった場合を異常な副振動と定義し、検討の対象と考えた。

表-1 は、異常な副振動が観測されたときの副振動の

* 正会員 工博 東北工業大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 工博 東北工業大学助教授 工学部土木工学科
*** 正会員 東北工業大学助手 工学部土木工学科
**** 正会員 東北工業大学 工学部土木工学科

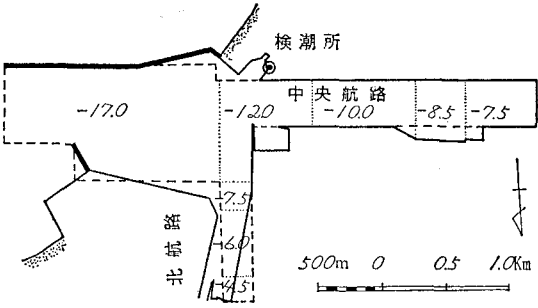


図-1 仙台港平面図

最大波高と周期およびその期間中の気圧、風速、有義波高のピーク値と発生時刻を一覧にしたものである。摘要

表-1 仙台港の異常副振動一覧

発生年月日時	副振動		最低気圧 (mb)	最大風速 (m/s)	風向 (16方位)	MAX H _{1/3} (m)	継続時間 (hr)	摘要
	波高 (cm)	周期 (min)						
1974 8.16. 4	48	22	b ₁₃ 1 005	b ₁₄ 7.4	ENE	b ₈ 2.7	22	三陸沖に低気圧。日本列島と平行に寒 冷前線。小笠原諸島付近に台風 14 号
1974 11.18.10	52	50	a ₅ 988	a ₈ 9.2	W	a ₂ 3.8	10	二つ玉低気圧急北上し発達
1975 7. 4.16	51	51	b ₁ 997	b ₄ 3.1	N	a ₄ 1.4	—	前線を伴う低気圧。日本の南岸沿いから 陸城部を北上
1975 9. 8. 4	45	18	a ₁₄ 995*	a ₃₀ 13.1	NW	b ₁₈ 3.2	22	台風 8 号小笠原諸島付近に停滞後太平洋 上北上
1975 11.23.18	56	37	1 001*	b ₁₄ 9.7	NW	1.8	18	三陸沖の低気圧北進台風 20 号太平洋 上北上
1975 12.22. 6	54	25	a ₆ 994	a ₁₂ 2.8	W	0.8	10	二つ玉低気圧発達東進
1976 10. 9. 8	53	26	a ₁₀ 1 013*	a ₁₂ 11.3	ENE	a ₁₂ 1.1	4	オホーツク海と四国沖に低気圧
1977 2.10.16	48	27	a ₂ 1 004*	b ₇ 2.8*	N*	a ₂ 1.1	6	二つ玉低気圧北東進
1979 11.29.12	48	27	b ₆ 1 001*	a ₂₂ 7.7	NNW	欠	2	二つ玉低気圧北上、前後に 30 cm 以 上の副振動

b, a: 副振動の最大波高発生時刻の前、後を表わし、添字はその発生時刻からの時間を表わす。 欠: 欠測
*: 仙台管区気象台観測、その他は運輸省塩釜工事事務所観測
継続時間: 波高 30 cm 以上の副振動が継続した時間を示す。

の欄には、異常副振動の発生要因と思われる台風または、低気圧の気象概要を併記した。前述した定義による異常副振動の発生回数は、最近 6 年間 9 でケースであった。年別発生回数では、1975 年の 4 回が最も多く、つぎに 1974 年の 2 回である。他は 1 回または 0 回となっ

ている。季節別では、台風来襲時期の秋頃が最も多くなっている。

図-2 は資料解析期間中、最大波高（波高 56 cm，周期 37 分）を記録した 1975 年 11 月 23 日の副振動の波高・周期と気圧，風向，風速および沖波有義波高の経時変化の様子を比較したものであり，図-3 は，その期間中および前後の台風・低気圧の 3 時間ごとの移動経路と，副振動がピーク値を示した 18 時の地上天気図とを重ねて示したものである。このときの沖波の有義波高は 2 m 以下でそれほど高くはないが，周期 14~15 秒程度のうねり性の波が観測されており，また，波高 30 cm 以上の副振動が 18 時間と比較的長い時間継続している。これは図-3 にみられるように，房総半島沖で停滞していた低気圧と，低気圧と入れ代わりのように北上して来た台風 7520 号の複合影響ではないかと考えられる。

図-4 は，波高 30 cm 以上の副振動の継続時間が最長（22 時間）を記録した 1974 年 8 月 16 日（最大波高

48 cm，周期 22 分）の気象・海象条件の時系列的な変化の様子を示したものであり，図-5 は，その前後における台風・低気圧の移動経路と副振動がピーク値を示した 4 時近くの地上天気図を重ねて示したものである。この場合は，小笠原諸島付近に停滞していた台風 7414 号と北海道東方海上の低気圧が関与していると思われるが，いずれの影響が卓越しているかは分らない。同じく継続時間 22 時間を記録した 1975 年 9 月 8 日（最大波高 45 cm，周期 18 分）の場合も，小笠原諸島東海上で 3 日程度停滞していた台風 7508 号が関与したと考えられる。

異常副振動の中で，継続時間が最も長いこれら 3 ケースは，いずれの場合も台風が関与しており台風が小笠原諸島付近に停滞しているか，その付近をゆっくり北上している場合に比較的波高が大きく，継続時間の長い副振動を発生させているように思われる。

二つ玉低気圧が北上または東進した 1974 年 11 月，1975 年 12 月，1977 年 2 月，1979 年 11 月にも最大波高

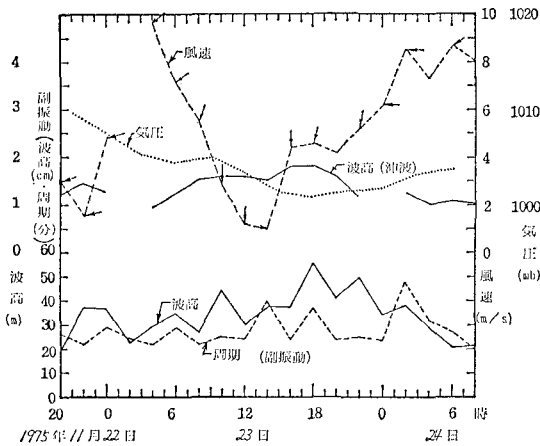


図-2 副振動と気象・海象条件

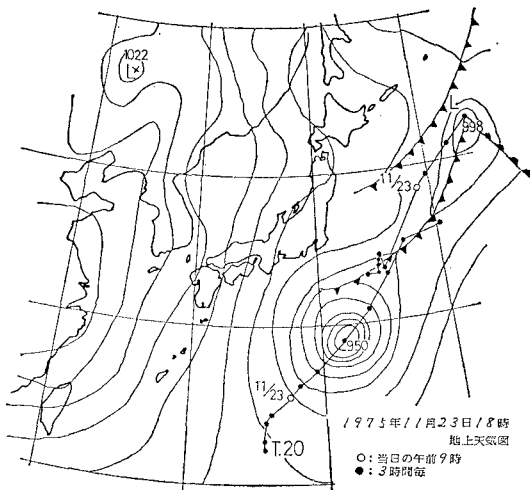


図-3 台風・低気圧の移動経路および地上天気図

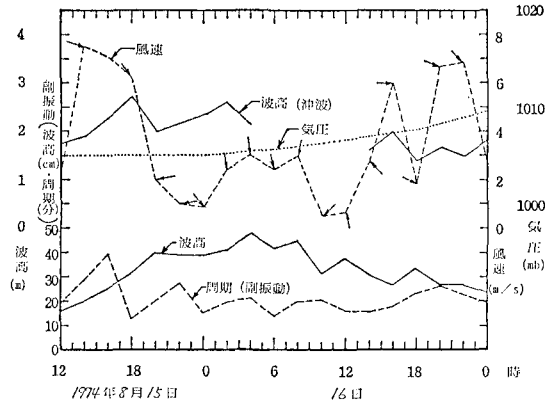


図-4 副振動と気象・海象条件

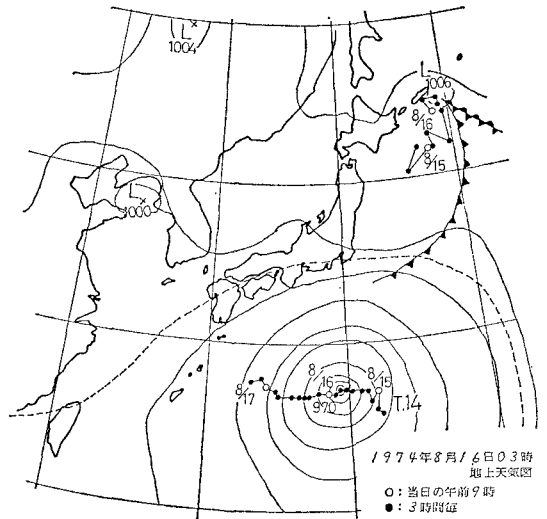


図-5 台風・低気圧の移動経路および地上天気図

50 cm 前後の副振動が発生し、波高 30 cm 以上の副振動が 2~10 時間程度継続している。

図-3 のように副振動の発生要因が北上しつつある台風または、低気圧に起因すると考えられる場合には、図-2 にみられるように副振動の波高と気圧および沖波波高とはかなり良い相関を示すが、図-5 のように停滞中の台風・低気圧が発生要因と考えられるケースでは、ほとんど相関性は認められない。また、表-1 より副振動の最大波高と現地の最大風速値との間には、ほとんど相関は認められず、また、最低気圧値との間にもそれ程の相関性は認められないようである。これは、台風または低気圧等の気象擾乱に伴って外洋に発生した長周期波が湾内に入り、湾水振動を引き起こしていることを示唆していると思われる。

つぎに、異常な副振動が発生した時の低気圧・台風の移動経路を5つのタイプ(表-2)に分類し、タイプ別の発生割合を示したのが図-6である。ただし、1974年8月と1975年9月はC型とE型に重複して分類した。発生回数の最も多いのはD型で37%、続いてC型、E

型の27%、B型の9%となっている。発生回数の最も多いD型は、二つ玉低気圧のうち太平洋側を進む低気圧が、関東沖から三陸沖で著しく発達する²⁾場合の気象擾乱により、比較的波高の大きい副振動が発生すると考えられる。次に多いC型は、低気圧・台風が太平洋上を北上し三陸沖付近に位置した場合の気象擾乱や、それ以前の長周期波の影響を受けるためD型と同様比較的波高の大きい、継続時間の長い副振動が発生すると考えられる。またE型は、気象擾乱で発生した長周期波が、エッジ波として伝わり湾内の振動を引き起こしているものと考えられる³⁾。

3. 台風 7920 号通過時の海水振動

1979年10月19日から20日にかけて日本を縦断した台風7920号は、塩釜港および松島海岸に高潮による浸水被害をもたらした。このときの仙台港の検潮記録をスペクトル解析することによって、台風通過前後の湾水振動特性について考察した。まず、データに含まれる潮汐成分を算術移動平均によって求め、それからの偏差値を海水振動成分として定常⁴⁾、非定常⁵⁾スペクトルを推定した。

解析期間は10月17日12時~20日24時の4.5日間で、データ読み取り間隔90sec、読み取り総数4289個である。なお、定常(MEM法)スペクトル解析に用いたフィルター項数は50、60である。

図-7は、台風通過前(17日12時~18日24時)、台風通過中(19日0時~20日12時)、台風通過後(20日12時~21日24時)のMEMスペクトルを解析周期帯域350~7分として計算したもので、縦軸は周波数スペクトル $S(f)$ の最大を100、最小を1として示してある。

台風通過に伴う湾水振動には、周期47~54分と周期20~28分の2つの振動系が存在している。後者は、仙

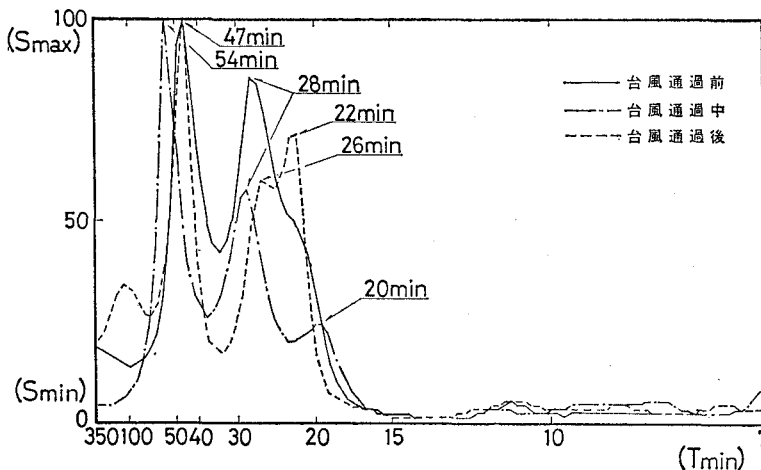
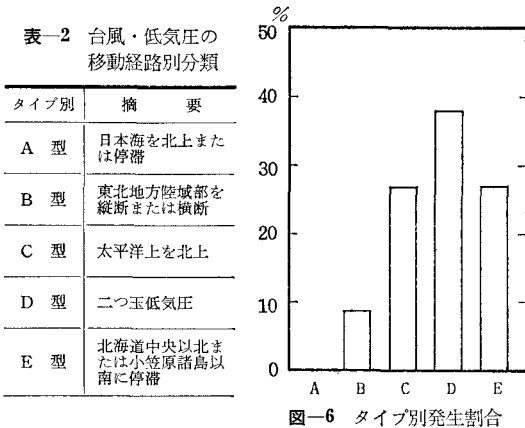


図-7 台風 7920 号通過時の MEM スペクトル

台港における基本モードの固有振動周期に対応するもの
と思われ、表一に示した異常な副振動発生時の最大波
高の周期とほぼ一致している。前者は、エッジ波に対応
する振動系ではないかと思われるが明らかでない。長周
期側の卓越周期は、台風の接近に伴い 47 分から 54 分
へと長周期側へ移動し、台風通過後は接近前の状態に
戻っている。また、短周期側の卓越周期は台風通過前、
通過中は 28 分であるが、台風通過後には 22 分と短周
期側に移動している。

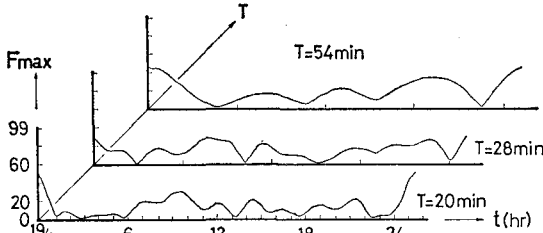


図-8 卓越周期に対するスペクトルの経時変化

図-8 は、周期帯域 1 分～89 分までを 2 分ごとに求
めた周期別エネルギー分布 $F(f, t)$ の値を、MEM スペ
クトルで得られた台風通過中の卓越周期別に図示したも
のである。解析期間は、台風通過中の 19 日 0 時から 20
日 2 時までとした。周期 54 分のスペクトルの強さは、
台風が同港に最も接近したと思われる 17 時頃その強さ
を増し、約 2 時間後の 19 時頃ピークに達しその高まり
は他の卓越周期よりも大きい。周期 28 分でも同様な傾
向を示すが、そのピークは 23 時頃である。周期 20 分
では、接近前の 9 時頃ピークとなり以後減衰する傾向を
示している。

4. 数値計算結果と同時観測値の比較

(1) 数値計算

仙台港の形状を図-1 の破線で示したような長方形港
湾で近似し、東西方向を x 軸、南北方向を y 軸にとり、
港内に 83 点の格子点を設置した。これら各格子点にお
ける波高分布関数 $f(x, y)$ に関する偏微分方程式

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + k^2 f = 0 \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $k=2\pi/L$ である。(1) 式を式 (2) に示すよう
な差分形に改め⁹⁾、各格子点における波高を未知数とす
る 83 次の連立一次方程式を導き、行列式の固有値、固
有ベクトルを求めることにより、仙台港の固有振動周期
と各格子点の波高分布を求めた。

$$\left(a_i + b_i + c_j + d_j - \frac{\omega^2}{g} \right) \cdot f_{i,j} - a_i \cdot f_{i+1,j} - b_i \cdot f_{i-1,j} \\ - c_j \cdot f_{i,j+1} - d_j \cdot f_{i,j-1} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $a_i = 2h_{ij} / \{ \Delta x_i \cdot (\Delta x_i + \Delta x_{i-1}) \}$
 $b_i = 2h_{ij} / \{ \Delta x_{i-1} \cdot (\Delta x_i + \Delta x_{i-1}) \}$

$$c_i = 2h_{ij} / \{ \Delta y_j \cdot (\Delta y_j + \Delta y_{j-1}) \}$$
$$d_j = 2h_{ij} / \{ \Delta y_{j-1} \cdot (\Delta y_j + \Delta y_{j-1}) \}$$

基本モード、第 2 次モードおよび第 3 次モードに対応
する固有振動周期はそれぞれ約 24.7 分、12.8 分および
7.5 分となった。なお、図-9、10 はそれぞれ基本モー
ドおよび第 2 次モードの波高分布を、湾奥の波高を 1 と
して等波高比線で表わしたものである。

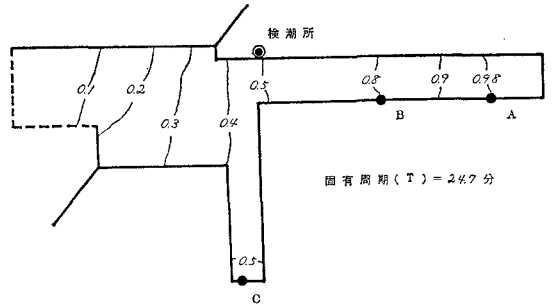


図-9 基本モードに対する波高分布図

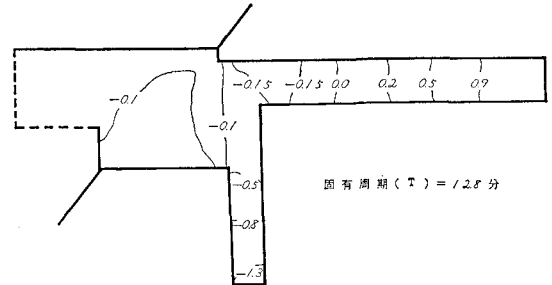


図-10 第 2 次モードに対する波高分布図

(2) 同時観測値との比較

図-9 に ● 印で示した A、B、C 3 地点で、圧力変
換器を用いて平常時 2～3 時間程度づつ水位変動の同時
観測を行った。表-3、4 は、それぞれ昭和 54 年および
昭和 55 年の観測結果を一覧にしたものである。表中の
周期は、A 点における水位変動をスペクトル解析 (読み
取り間隔 45 秒、データ数約 200、解析周期帯域 350～

表-3 昭和 54 年副振動観測結果

観測日	周期 (min)	A 点 (cm)	B 点 (cm)	検潮所 (cm)
9 月 22 日	23.0	12.0	15.0	7.0
		12.0	9.8	6.1
10 月 26 日	22.6	8.0	7.0	5.0
		8.0	6.5	4.1
11 月 9 日	24.1	12.0	11.0	11.0
		12.0	9.8	6.1
観測日	周期 (min)	A 点 (cm)	C 点 (cm)	検潮所 (cm)
11 月 28 日	21.2	10.0	3.0	5.0
		10.0	5.1	5.1
11 月 30 日	22.2	12.0	5.0	7.0
		12.0	6.1	6.1

表-4 昭和 55 年副振動観測結果

観測日	周期 (min)	A点 (cm)	B点 (cm)	検潮所 (cm)
9 日 24 月	20.6	10.0	10.0	8.0
		10.0	8.2	5.1
10 日 1 月	23.3	11.0	11.0	7.0
		11.0	9.0	5.6
10 日 29 月	25.9	5.0	7.0	5.0
		5.0	4.1	2.6
11 月 5 日	23.3	3.0	3.0	3.0
		3.0	2.4	1.5
11 月 26 日	25.0	5.0	5.0	4.0
		5.0	4.1	2.6
観測日	周期 (min)	A点 (cm)	C点 (cm)	検潮所 (cm)
12 月 3 日	23.3	9.0	9.0	8.0
		9.0	4.6	4.6
12 月 5 日	25.0	7.0	5.0	5.0
		7.0	3.6	3.6
12 月 10 日	25.9	8.0	6.0	5.0
		8.0	4.1	4.1
12 月 11 日	24.1	7.0	5.0	6.0
		7.0	3.6	3.6
12 月 12 日	23.3	14.0	7.0	9.0
		14.0	7.1	7.1

7 分) して求めた卓越周期 (スペクトル波形は、ほとんど単峰性を示し、2 次以下の振動はみられなかった。) であり、上段の数字は当日観測された数波の副振動の平均波高、下段の数字は数値計算で求めた基本モードに対する各観測地点の波高比から、A 点の観測波高を用いて他の観測地点の波高を推定したものである。観測波の卓越周期は 21~26 分で、数値計算による基本モードの固有振動周期 24.7 分とほぼ一致している。また、各観測地点の波高も数値計算で求めた基本モードに対する波高分布とほぼ同じような傾向を示すが、B 点、検潮所、C 点の波高は計算値より幾分高くなることが多いように思われる。

5. 結 論

仙台港の潮位記録および現地観測をもとに、同港の副

振動の実態について考察してきたが、主要な結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 異常副振動の発生回数は、最近 6 年間で 10 ケース弱であり、最大波高は 56 cm 程度である。
- 2) 異常副振動発生時の台風・低気圧の移動経路が、C 型、D 型の場合には、副振動の波高と気象・海象条件の経時変化の相関性はよくなるが、E 型のような場合は、両者の相関性はほとんど認められなかった。
- 3) 台風通過前、通過中、通過後で MEM スペクトルの形状に若干の差異はあるが、主振動 47~54 分と同港の固有振動周期に近い 22~28 分の振動系が観測された。また、台風通過中のスペクトルの経時変化をみると、台風の通過に伴って周期の長い順に海水振動が励起される傾向が認められた。
- 4) 平常時の現地観測から求めた卓越周期は、21~26 分のもものがほとんどであり、数値計算によって得られた基本モードの固有周期とほぼ一致した。
- 5) 同時観測における波高比は、計算結果と同様な傾向を示すが、各地点の波高比にはかなりのバラツキがある。

本研究を進めるにあたり、資料の整理、現地観測等で元本学学生諸氏の協力を得た。また、仙台管区気象台、運輸省塩釜港工事事務所より資料を提供していただいた。ここに記して感謝の意を表します。尚、計算には東北工業大学計算センター TOSBAC-3400 を使用したことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 沼田 淳・高橋敏彦：塩釜港仙台港区における副振動の現状とその発生要因，第 33 回年講概要集，II-358，pp. 692~693，1978。
- 2) 大谷東平・斎藤将一 共著：天気予報と天気図，法政大学出版局，205 p.，1976。
- 3) 林 直樹・高橋秀彰・山本政光：外海における長周期波の観測，第 25 回海講論文集，pp. 14~17，1978。
- 4) 岩崎敏夫・阿部至雄・相原昭洋：1979 年宮城県沖地震津波による海水振動特性，第 26 回海講論文集，pp. 143~147，1979。
- 5) 神山 真：フィルター理論による強振地動の解析，昭和 48 年度東北支部技術研究発表会，pp. 18~20，1974。
- 6) 堀川清司・西村仁嗣：枝分れのある湾の振動特性について，第 14 回海講講演集，pp. 98~103，1967。