

長期検潮記録を用いた平均水位・潮位・長周期波解析

永井紀彦* ・菅原一晃** ・渡邊 弘***
川口浩二**** ・三原正裕***** ・高島勝美*****

1. はじめに

東京湾口に位置する久里浜検潮所で観測された1958年2月から1995年12月までの約38年間のデータを対象として、アナログ記録紙上に紙送り速度2 cm/時間で記録された波形記録を1時間毎に読み取り整理数値化した。本研究は、長期間の検潮記録を基に、平均水面の経年変動特性、調和分解計算結果の変動特性および津波や気象擾乱に伴う長周期波形記録の解析を、試みたものである。

2. 潮位観測の概要

久里浜検潮所は、図-1に示す位置(北緯35度13分28秒, 東経139度43分27秒)で行われている。図-2は、検潮井戸の断面図・平面図を示したものである。検潮井戸は、内径1200 mm、深さ約5 mであり、導水管は内径が131 mm、長さが地中部3.7 m、海中部約4.0 mとなっている(佐々木ら, 1979; 菅原ら, 1984; 菅原ら, 1988)。

なお、検潮井戸の周波数応答は、1996年イリアンジャや地震津波の際に、同じ位置に1995年以降に新設された空中発射型超音波式波高計との比較から、周期5分以上の長周期波に対しては波形記録は正確であることが、明らかにされている(小舟ら, 1996; 永井ら, 1996)。

3. 平均水面の変動解析

3.1 平均水面の変動

表-1は、1958年2月から1995年12月にかけての観測データについて、各年ごとの年最高潮位、朔望平均満潮位、平均潮位、朔望平均干潮位、年最低潮位、および各月ごとの平均潮位をまとめた結果である。表中の年最高潮位および年最低潮位は、それぞれ、各年において観測された潮位の瞬間最高値および最低値である。年最高潮位の最大値は、1979年の台風20号による313 cmであ

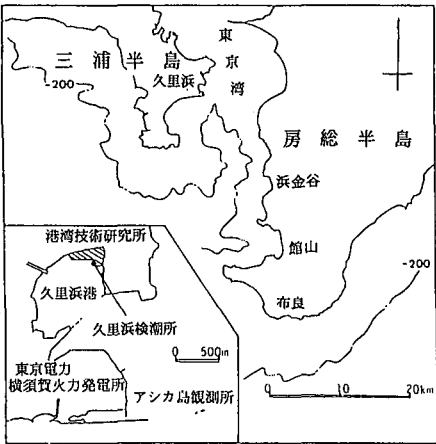


図-1 久里浜湾検潮所位置図

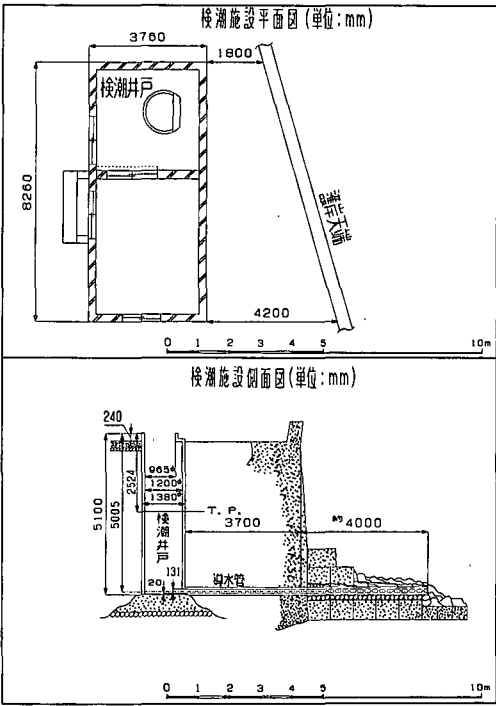


図-2 検潮井戸断面図・平面図

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部海象調査研究室長
** 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官
*** 運輸省港湾技術研究所水工部海象調査研究室
**** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部海象調査研究室
***** エコー(株) 波浪プロジェクト室 課長代理
***** 正会員 沿岸海洋調査(株) 技術サービス部 部長

表-1 平均水面等の変動総括表

	通 年 値					月 別 平 均 値											
	年最高潮位 (H.H.W.L.)	朔望平均満潮位 (H.W.L.)	平均潮位 (M.S.L.)	朔望平均干潮位 (L.W.L.)	年最低潮位 (L.L.W.L.)	1月 (JAN.)	2月 (FEB.)	3月 (MAR.)	4月 (APR.)	5月 (MAY.)	6月 (JUN.)	7月 (JUL.)	8月 (AUG.)	9月 (SEP.)	10月 (OCT.)	11月 (NOV.)	12月 (DEC.)
1958	282.0	225.7	161.5	72.1	47.0	-----	161.4	160.6	154.5	164.9	161.3	155.0	149.7	148.4	173.7	176.9	170.6
1959	273.0	241.6	173.8	84.4	52.0	166.8	157.3	159.4	163.4	163.7	180.3	182.2	182.3	185.6	186.3	179.8	178.1
1960	298.0	242.8	175.9	87.3	48.0	173.4	169.9	168.0	166.5	175.0	177.5	179.0	184.4	186.5	180.2	176.9	172.9
1961	262.0	238.2	175.4	86.1	61.0	170.8	170.2	167.0	163.8	168.0	180.2	182.3	190.1	186.1	-----	-----	-----
1962	272.0	243.2	177.6	87.5	62.0	175.7	168.3	165.6	166.8	172.9	182.9	189.1	179.7	182.8	190.6	178.7	178.2
1963	256.0	234.8	169.5	76.4	41.0	180.0	165.0	158.2	152.4	164.8	169.0	170.8	174.7	175.5	178.6	175.5	168.8
1964	263.0	236.3	171.3	76.0	48.0	166.5	166.5	160.8	155.6	175.3	171.7	170.7	177.6	184.7	175.4	179.4	171.6
1965	269.0	238.7	171.6	76.2	44.0	171.1	164.5	163.9	158.5	165.6	180.3	178.7	174.4	179.0	176.2	178.9	167.7
1966	265.0	239.1	173.3	76.7	42.0	170.9	166.7	167.6	171.4	163.9	172.3	172.7	182.7	182.1	180.0	173.1	176.8
1967	270.0	237.4	173.7	75.8	48.0	169.9	160.4	157.1	157.5	166.6	180.9	186.7	182.6	190.4	181.0	177.7	173.0
1968	273.0	237.2	172.0	80.0	49.0	175.5	170.0	160.7	156.6	162.4	163.9	175.8	191.8	180.9	179.8	173.1	173.4
1969	273.0	242.0	175.7	80.6	54.0	171.8	162.1	168.6	172.4	183.4	179.9	181.9	179.8	177.8	177.6	179.6	173.9
1970	266.0	238.7	173.8	77.2	47.0	174.9	172.0	166.5	160.1	168.1	172.1	172.4	174.5	179.6	184.0	188.1	173.5
1971	272.0	241.6	175.0	78.3	54.0	181.0	168.5	166.4	160.6	165.7	176.0	180.4	188.3	193.5	184.8	170.0	164.8
1972	271.0	248.9	180.9	88.1	52.0	176.5	175.6	171.7	165.4	175.3	179.9	191.0	189.6	192.8	188.3	184.4	179.8
1973	265.0	245.0	178.9	83.6	49.0	170.0	171.6	174.5	179.9	172.7	180.6	181.3	181.5	184.7	184.9	188.5	176.6
1974	278.0	246.8	179.1	85.9	59.0	177.1	173.0	168.4	170.5	175.2	187.8	182.6	183.4	191.3	186.2	176.3	177.5
1975	289.0	247.2	181.9	91.4	66.0	180.3	178.0	169.9	167.8	174.4	178.7	182.5	193.7	196.0	190.7	185.6	185.5
1976	272.0	250.4	184.0	94.6	67.0	179.6	177.5	173.8	177.5	182.8	187.4	185.9	188.5	196.9	192.5	185.1	180.6
1977	270.0	245.1	181.5	91.6	60.0	177.3	175.9	171.2	172.4	175.5	185.4	183.1	189.1	191.3	187.9	183.6	184.8
1978	276.0	250.9	184.0	93.6	65.0	182.5	178.4	176.5	178.9	178.3	180.8	191.1	193.5	192.8	190.3	185.6	179.5
1979	313.0	253.0	184.3	95.6	62.0	176.0	178.4	179.5	175.8	179.6	183.9	193.9	188.0	191.6	194.1	185.1	185.8
1980	288.0	249.3	182.4	91.1	63.0	186.3	169.4	172.3	169.6	181.9	178.8	186.6	186.9	188.7	189.7	187.4	191.6
1981	261.0	244.1	178.7	84.2	67.0	180.1	176.9	168.8	177.9	177.9	186.2	-----	-----	-----	-----	181.5	179.9
1982	281.0	246.4	182.0	89.1	57.0	177.7	170.2	168.9	175.3	184.8	187.2	181.7	190.6	193.1	193.8	181.0	180.2
1983	279.0	248.9	184.6	91.1	65.0	176.2	177.3	175.0	171.1	182.4	190.3	194.9	195.5	193.2	187.3	187.1	185.1
1984	272.0	244.5	180.3	86.5	61.0	177.4	173.9	169.9	167.9	171.5	188.6	182.8	180.9	185.3	196.0	186.4	182.7
1985	281.0	244.1	178.5	82.8	59.0	169.8	171.6	163.1	169.3	173.8	186.6	189.6	180.6	182.7	188.7	190.4	175.2
1986	266.0	245.6	179.8	82.8	55.0	175.2	175.4	177.3	170.4	173.0	176.8	182.9	185.5	189.2	183.8	180.0	187.6
1987	264.0	246.9	181.7	87.3	62.0	155.4	179.1	176.1	174.0	182.6	185.9	189.2	191.7	194.6	186.2	183.4	182.7
1988	273.0	250.2	183.9	87.3	50.0	177.8	178.5	177.3	182.0	183.5	186.1	188.6	184.5	191.5	195.7	187.0	174.6
1989	272.0	246.4	180.8	84.8	55.0	172.3	169.5	172.0	170.6	181.6	180.4	185.3	190.3	186.3	185.8	185.0	191.1
1990	295.0	252.0	185.3	88.3	47.0	181.0	168.6	177.5	182.9	176.3	186.5	192.6	199.5	196.2	194.9	188.3	179.8
1991	277.0	253.6	186.3	89.7	57.0	185.9	180.1	182.2	173.3	178.0	182.2	189.3	199.0	192.2	197.4	189.7	185.9
1992	272.0	252.7	187.3	93.6	62.0	185.0	181.6	179.4	189.0	187.5	189.2	188.7	184.5	194.3	200.4	185.0	183.5
1993	276.0	252.9	184.6	91.0	71.0	182.5	180.3	182.6	185.0	180.9	181.0	184.0	191.3	191.9	194.5	180.0	181.8
1994	267.0	251.2	186.9	97.2	69.0	188.3	184.9	175.9	184.1	182.8	187.5	192.6	189.2	197.9	191.8	182.7	184.9
1995	286.0	254.6	188.8	97.8	74.0	185.2	184.1	178.4	183.9	189.2	192.9	191.7	187.6	192.9	193.0	195.6	191.5

(港研検潮器零位を基準)

り、これに次ぐ値は1960年チリ地震津波による298 cmであった。

図-3は、表-1中の年最高潮位、朔望平均満潮位、平均潮位、朔望平均干潮位、年最低潮位の経年変化を示したものであり、図-4は、月平均潮位の変化を、より詳細に示したものである。月平均潮位は、季節によって変動し、夏は平均潮位が高く、冬は低いことがわかる。こう

した季節変動に加えて、最小自乗法による回帰直線が示すように、長期的に平均潮位は緩やかに上昇している。この長期的な平均潮位の増加量は、検潮器零位を基準として、4.4 mm/年である。

3.2 地盤沈下量の評価

平均潮位の増加量、すなわち平均水位上昇量を考える際には、地盤沈下量を適切に評価することが重要である。

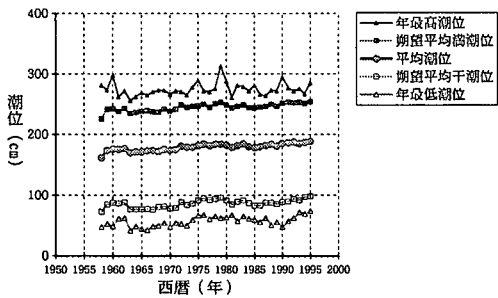


図-3 潮位の経年変動

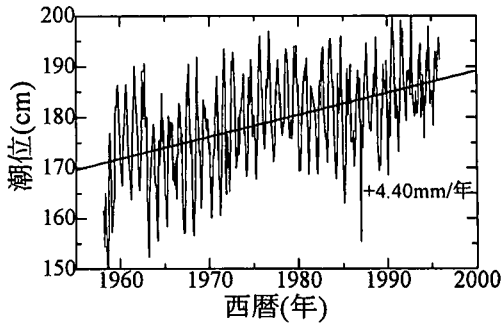


図-4 月平均潮位の変動

図-5は、検潮器零位の地盤沈下量の評価を試みたものである。すなわち、近傍の国土地理院第10845号一等水準点と検潮器零位間における1975年と1992年の2回の測量結果(標高差6.0709mおよび6.0488m)を、1969年と1990年に発表された同水準点の国土地理院平均成果(東京湾平均水位を基準として4.2989mおよび4.2218m)の2データを直線で結んだ水準点の標高変化直線につなぎ、1975年と1992年における検潮器零位の標高を、東京湾平均水位を基準として、それぞれ、-1.7940mおよび-1.8343mと考え、検潮器零位の沈下量を2.37mm/年と推定した。この値を、図-4に示す4.40mm/年から差し引くと、東京湾平均海面を基準とした久里浜検潮所の水位上昇量は、2.03mm/年となった。

3.3 気温変化との関係

平均水位の上昇問題は、地球温暖化とあわせて論じられている。図-6は、気象庁が発表した世界平均気温の年平均値の上昇データと、図-4および図-5で考察した平均水位上昇量との比較検討を試みたものである。

図-6の左縦軸(黒丸)は久里浜検潮所における年平均水位偏差を示したものであり、1958年から1995年までの平均水位を基準として示している。右縦軸(白丸)は、気象庁発表の世界平均気温の年平均値の偏差を示しており、同じ期間中の最小自乗法による回帰直線の傾きは、 $+0.014^{\circ}\text{C}/\text{年}$ であり、上昇傾向を示していた。図-6では、平均水位偏差と平均気温偏差の回帰直線の傾きが共通に

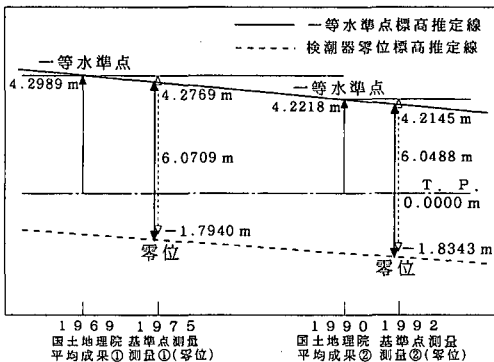


図-5 基準点の地盤沈下量

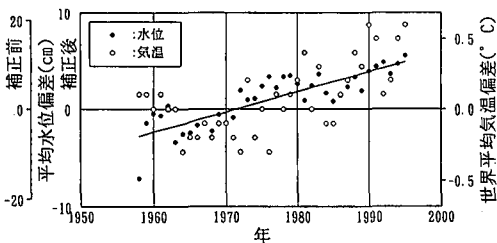


図-6 平均海面の上昇と平均気温

表-2 長周期波の周期と最大両振幅の出現分布

両振幅 (cm)	周 期 (分)			合 計
	-10	10-20	20-	
15-20	17	80	0	97
20-25	17	22	1	40
25-30	12	7	1	20
30-40	6	4	0	10
40-50	6	1	0	7
50-100	5	0	0	5
100-	0	0	1	1
合 計	63	114	3	180

*範囲は、以上-未満を表す

なるように右縦軸と左縦軸のレンジを調整表示している。

平均気温偏差と平均水位偏差のそれぞれの経年変動は、必ずしも年毎に一致するわけではないが、ともに1962年頃、1977年頃、1990年頃に極大値を、1964年頃と1985年頃に極小値を示しているようであり、10年から20年程度の周期で増加減少を繰り返しながらも、長期的には増加する傾向を示している。図-6によれば、平均気温が1度上昇するのに対応して水位が約15cm上昇することとなる。この割合は、西暦2100年頃に平均気温が2度上昇し海面が50cm上昇するというIPPC報告で示される割合よりも、若干低くなっている(IPCC, 1990; 気象庁, 1993)。

4. 長周期波

4.1 観測された長周期波

図-7は、長周期波の発生状況を年別および要因別にとりまとめたものである。ここでは長周期波として最大両振幅が15cmを越えるものを抽出したが、38年間で180ケース見られた。内訳は、津波の4ケースを除いて、他は気象擾乱に伴うものであった。

表-2は、抽出された長周期波の両振幅と、ゼロアップクロス法によって定義される平均的な周期の、結合出現

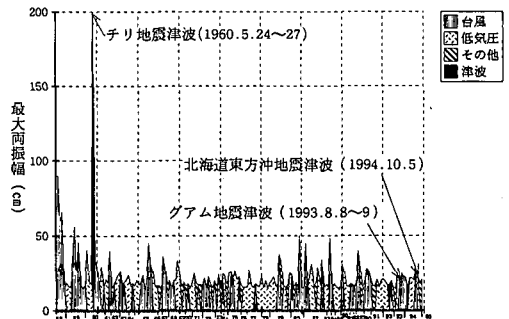
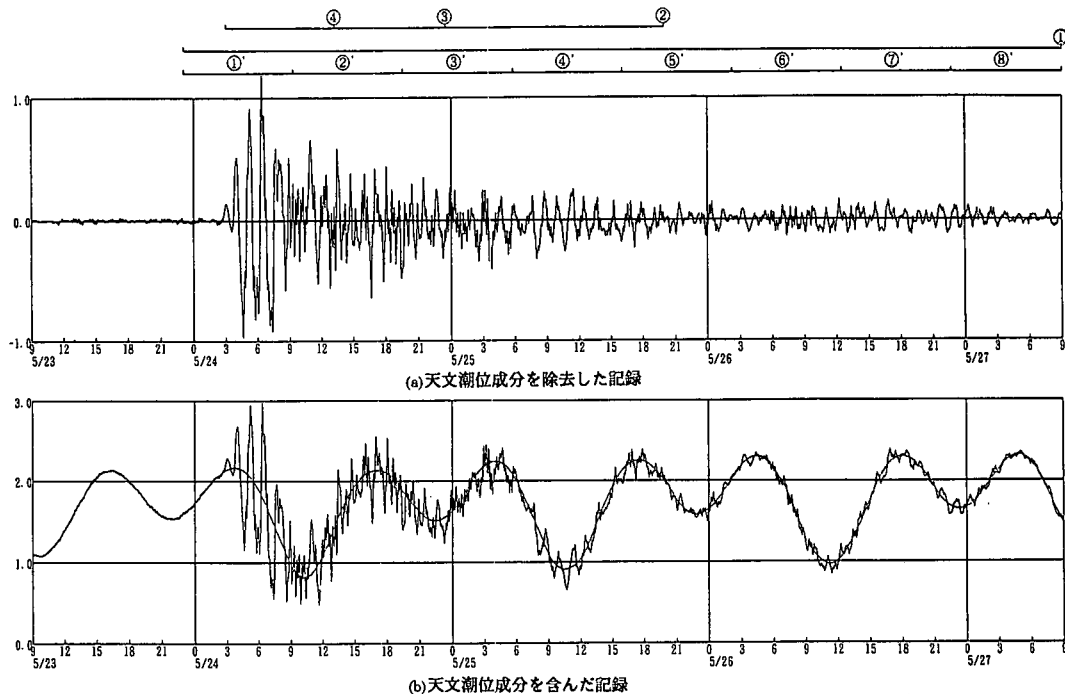


図-7 長周期波の発生状況



図—8 チリ地震津波波形

頻度分布を示したものである。気象擾乱に伴う長周期波の周期は、2—3分(久里浜湾内の固有周期)のものと、15分程度のもの(久里浜・金谷間の固有周期に対応)に大別された。これに対して、津波の周期は津波毎に異なったものであった。

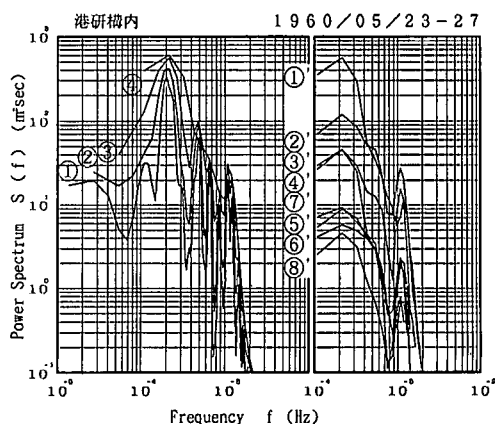
4.2 チリ地震津波

観測された長周期波の中で、最大の振幅と周期を記録したものが、1960年のチリ地震津波によるものであった。チリ地震津波は、約1日かかって太平洋を横断し、我が国太平洋岸に襲来し、広い範囲で被害を発生させた津波である。

図—8は、久里浜検潮所におけるチリ地震津波来襲時の波形記録を示したものである。波形記録は、検潮記録紙上の記録を細かくデジタイザーで読み取り数値化した。検潮記録紙の紙送り速度は2cm/時間であるため、0.2mm毎に読み取りを行ったので、データのサンプリング間隔は36秒となった。下段の図は、天文潮位変化を含めた記録であり、上段の図は、下段の図に滑らかな細線で示される天文潮位成分を除去した津波記録である。

図—9は、津波波形の周波数スペクトル解析結果を示したものである。しかしながら、津波のような非定常な現象に対しては、解析対象時間と同じ波形が無限回繰り返されるといふスペクトル解析の前提条件が満たされていないため、スペクトル解析の妥当性と信頼性に関しては、特に注意が必要となる。

そこで、解析対象時間を変化させた解析を試みた。図—8に示される①②③④と①'②'③'④'⑤'⑥'⑦'⑧'は、それぞれ、データサンプリング時間の設定を示しており、図—9に示すそれぞれの津波波形の周波数スペクトルに対応している。サンプリング時間は、①は8192データ(81時間55分12秒間のデータ)、②は半分の4096データ(40時間57分36秒間)、③はさらに半分の2048データ(20時間28分48秒間)、④はさらに半分の1024データ(10時間14分24秒間)であり、①'から⑧'までは、それぞれ、①の期間を8分割した1024データ(10時間14



図—9 チリ地震津波のスペクトル

表-3 主要4分潮の振幅の変動

	M_2 振幅 (cm)	S_2 振幅 (cm)	K_1 振幅 (cm)	O_1 振幅 (cm)	Z_0 振幅 (cm)
最大 年 振幅	1965 36.684	1960 17.492	1986 23.944	1986 19.006	1965 96.621
最小 年 振幅	1983 35.610	1983 16.968	1960 22.985	1976 18.247	1976 94.416
38 年平均	36.061	17.222	23.476	18.576	95.335
標準偏差	0.268	0.110	0.204	0.168	0.492

分24秒間)である。

図-9の左図中で、④はもっとも津波の高い期間について計算した結果で、スペクトル全体のパワーが最も高く、①は時間とともに減衰した波形の影響を受けてパワーは相対的に低くなっている。しかし、スペクトルの形状は、4ケースともよく一致している。図-9の右図中で、①-⑧から時間経過とともにスペクトルのパワーの減少が見られるものの、スペクトルの形状はあまり変化せず、チリ地震津波による水位変動は、3日間以上も継続したことがわかる。

スペクトルのピーク周波数は、 2×10^{-4} Hz 付近(83分)で、各サンプリング時間に共通している。①-⑧の経時変化に注目すると、久里浜と対岸の房総半島の金谷間のモードの固有周期に対応する周期約15分のピークが、時間経過とともに津波のピーク周期に比べて相対的に大きくなっていることがわかる。これらの結果は、チリ地震津波の周期に関する文献(高橋ら, 1961; HATORI, 1969)をさらに詳細に補足するものである。

5. 調和定数の経年変動

表-3は、各年毎に行った調和解算結果を主要4分潮の振幅と Z_0 (主要4分潮の振幅の和)の経年変動についてとりまとめたものである。表中には、振幅の最大値、最小値、38年間平均値および変動の標準偏差を、対応する観測年とともに示している。4分潮の振幅の年別の変動はそれぞれ±2%程度の範囲にほぼ収まっている。 Z_0 の最大値は M_2 分潮の振幅が最大値を示した1965年に、 Z_0 の最小値は O_1 分潮の振幅が最小値を示した1976年に見られ、それぞれの値は96.621 cm および95.335 cmであった。しかし、主要4分潮以外の分潮に関しては、周期の長い分潮ほど、1年以上の長周期変動の影響のためと考えられるが、年毎の変動が大きかった。

6. 気象偏差

表-4は、各年の28分潮から計算される天文潮位と毎正時の観測潮位の偏差の大きい上位10個を示したものである。4.1で抽出した長周期波と重なっている気象偏差は10ケース中6ケース見られ、太平洋側を台風または

表-4 上位気象偏差一覧

単位: cm					
順位	発 生 期 間 年 月 日 時~年 月 日 時	最大偏差発生時 年 月 日 時	最大 偏差	気象要因	長周期波 間 振 幅
1	79/10/18 16時~ 79/10/20 2時	79/10/19 16時	51	台風 7920	38.0
2	58/ 7/22 5時~ 58/ 7/24 1時	58/ 7/23 9時	47	台風 5811	90.0
3	82/ 9/12 6時~ 82/ 9/13 8時	82/ 9/12 22時	42	台風 8218	45.0
4	70/ 1/30 17時~ 70/ 2/ 1 10時	70/ 1/31 9時	41	日本海低気圧	-----
5	85/ 6/30 7時~ 85/ 7/ 1 20時	85/ 7/ 1 3時	41	台風 8506	48.5
6	67/ 9/10 10時~ 67/ 9/19 11時	67/ 9/15 2時	40	台風 6722	-----
7	58/ 9/18 2時~ 58/ 9/18 17時	58/ 9/18 8時	38	台風 5821	60.0
8	59/ 9/26 12時~ 59/ 9/27 19時	59/ 9/26 23時	37	台風 5915 (伊勢湾台風)	45.5
9	69/ 8/23 5時~ 69/ 8/25 16時	69/ 8/23 15時	37	台風 6909	-----
10	58/12/25 22時~ 58/12/27 19時	58/12/26 16時	36	日本海低気圧	-----

低気圧が通ったときに発生している。最大気象偏差は、1979年10月17日から20日にかけて太平洋側を通過した台風7920号による51 cm(18日16:00)であった。

7. おわりに

本研究は、東京湾口に位置する久里浜検潮所で観測された1958年2月から1995年12月までの約38年間のデータを対象として、平均水面の経年変動特性、潮位調和解算結果の変動特性、および津波や気象擾乱に伴う長周期波形記録の解析を、試みたものである。

なお、本研究のとりまとめにあたって、建設省国土地理院、海上保安庁水路部、東北大学首藤伸夫教授から、御指導をいただいたことを記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 気象庁(1993): 気候変動に関する政府間パネル(IPCC)科学的評価~1990年報告書・1992年補遺概要~, 106 p.
- 小舟浩治・永井紀彦・橋本典明・平石哲也・清水勝義(1996): 1996年イリアンジャ地震津波の特性, 港湾技研資料 No. 842, 96 p.
- 佐々木弘・菅原一見・佐々木徹也・広瀬宗一・金子大二郎・高橋智晴・夷塚葉子(1979): 港研構内およびアシカ島における気象・海象観測, 港湾技研資料 No. 314, 130 p.
- 菅原一見・立花祐二・佐々木弘・広瀬宗一・橋本典明(1984): 港研構内およびアシカ島における気象・海象観測その2, 港湾技研資料 No. 481, 61 p.
- 菅原一見・成田 明・亀山 豊・小舟浩治・後藤智明・橋本典明(1988): 港研構内およびアシカ島における気象・海象観測その3, 港湾技研資料 No. 624, 70 p.
- 高橋龍太郎・相田 勇(1961): 津波スペクトルの研究, 地震研究所彙報 Vol. 39, pp. 523-535.
- 永井紀彦・菅原一見・渡邊 弘・川口浩二(1996): 久里浜湾における長期検潮記録解析, 港研報告, 第35巻, 4号, 35 p.
- HATORI, T. (1969): Analyses of Oceanic Long-period Waves at Hachijo Island, 地震研究所彙報 Vol. 47, pp. 863-874.
- IPCC WG1 (1990): Policymakers Summary of the Scientific Assessment of Climate Change, 27 p.