

台風15号通過時の東京湾北部海盆減衰副振動と減衰係数、線形摩擦係数について

金 成 誠 一*

1. はじめに

港湾の副振動は、低気圧擾乱の通過によって増幅され、低気圧通過後に減衰しながら通常の副振動振幅に回帰することがしばしば起こる。このような減衰振動を解析することにより、その港湾のバルクの摩擦係数を見積もることができる。2001年9月11日の台風15号の東京湾通過に際して、東京湾北部海盆で励起された副振動が、台風通過後に、減衰振動を生じた例が潮位データに記録されていた。東京湾 (Fig. 1) は、三浦半島先端と房総半島先端を結ぶ線が湾口を形成しているが、浦賀水道近辺で、湾軸がほぼ直角に近いかたちで屈曲しているために、外力条件によっては、富津 観音崎を結ぶ線より北側の海盆 (ここでは北部海盆と呼ぶ) が、両端閉の振動を生ず

ることがある。したがって、こうした副振動では、東京湾全体の湾振動と、北部海盆の振動が合成された形の振動となる。台風15号通過の際には、たまたま、このような形の振動が励起されたようである。ここでは、北部海盆の振動のみに着目し、励起された減衰振動を解析し、東京湾の減衰副振動に伴う減衰係数を評価すると同時に、これまでに、世界各地の湖沼で得られた減衰係数データと、線形減衰振動モデルを併用して、減衰係数の定式化を試みた。

2. 潮位変動と気象変化

潮位データは、海上保安庁海洋情報部が公開している5分毎の異常潮位時系列データを使用した。また、風、および気圧に関する1時間毎の時系列データは、気象協会提供のものを用いた。解析に使用したデータのうち、潮位に関するデータを Fig. 2 に示す。Fig. 2 (a) は気圧偏差 (1013hPa からの偏差) を水位に換算した時系列を、また、Fig. 2 (b) の実線は芝浦の実測潮位、破線は芝浦の推算潮位を示す。また、Fig. 2 (c) は、気圧偏差水位と推算潮位を差し引いた異常潮位成分を示す。横軸は、いずれも5分単位で表した時間で、9月11日0時を0として表してある。Fig. 2 (c) の横軸120~180 (×5 min) の付近に、長周期副振動の一部に乗ったきれいな減衰振動が現れているのがわかる。Table 1 は当日の気象の時系列データを示したものであるが、11時に海面気圧が976.8hPaの最低値を記録し、17.7m/secの北東風が湾上を吹送し、その後、台風の移動に伴って約2時間で急速に風向を西、南西へと変化させ、その後は、ほぼ南西風を維持しつつ、風速が徐々に低下しているのが見て取れる。11時の北西風は、北部海盆で、湾内の海水を横須賀側へ押しつけ、12時以降の風向きの変化により、湾南西側への拘束が解かれて、急激な逆流が生じ、湾北部海盆内で大きな副振動を発生させたものと見ることができる。その結果、周期約2時間の減衰振動を誘起したもの

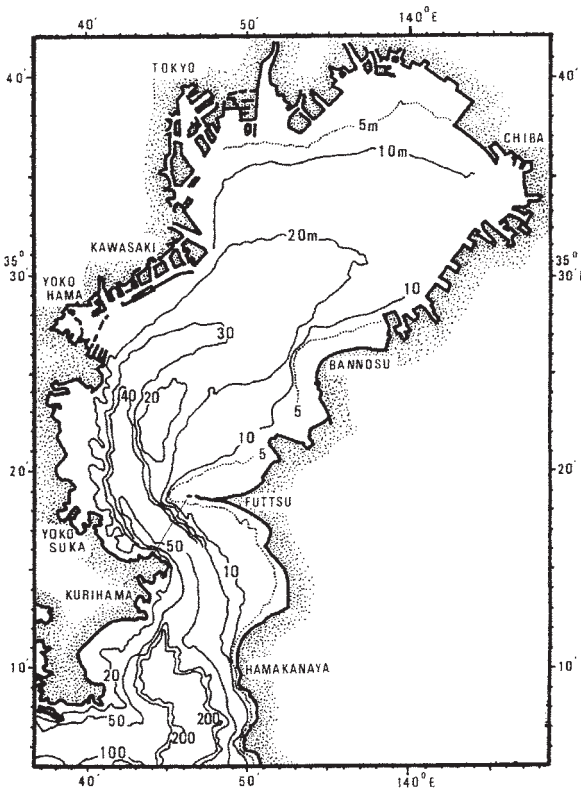


Fig. 1. Map of Tokyo Bay (Ikeda, et al, 1981).

* 立正大学地球環境科学部

Table 1. Hourly change of meteorological factors of Tokyo Bay area on 11, Sept., 2001.

地点番号	47662		地点名	東京			標高	6.1m	
緯度	35°41.2'		経度	139°45.8'					
要素	現地	海面気圧	気温	露点温度	蒸気圧	湿度	風向	風速	
時	(hPa)	(hPa)	()	()	(hPa)	(%)	16方位	(m/s)	
1	993.3	997.3	25	22.9	27.9	88	SE	2.9	
2	992.2	996.2	25.6	22.9	27.9	85	ESE	4.5	
3	991.8	995.8	25.3	23.2	28.4	88	ESE	4.2	
4	991.1	995.1	25.5	23.2	28.4	87	ESE	3.4	
5	990.2	994.2	25.5	22.8	27.8	85	ESE	6.3	
6	989.9	993.9	25.8	22.9	27.9	84	ESE	4.7	
7	988.6	992.6	25.8	22.7	27.6	83	E	7.3	
8	987.4	991.4	25.3	23	28.1	87	E	7	
9	985.6	989.6	25.5	23	28.1	86	E	8.9	
10	982	986	25.5	23.2	28.4	87	ENE	8.2	
11	972.8	976.8	24.9	23	28.1	89	NE	17.7	
12	978.1	982.1	24.8	23.2	28.4	91	W	10.7	
13	984.4	988.4	24.9	23.1	28.3	90	WSW	8.7	
14	987.3	991.3	25.1	23.3	28.6	90	SW	7	
15	988.6	992.6	25.5	23.5	28.9	89	SW	5.5	
16	989.7	993.7	26.8	23.9	29.7	84	SSW	2.3	
17	990.3	994.3	27.2	23.7	29.3	81	SW	4	
18	991.3	995.3	27.4	23.4	28.8	79	SW	3.7	
19	992.3	996.3	27.7	23.3	28.6	77	S	2.3	
20	993.3	997.3	27.4	23.4	28.8	79	SW	2.1	
21	994	998	26.5	23.4	28.8	83	SW	1	
22	994.8	998.8	27	23	28.1	79	S	3.5	
23	995.4	999.4	26.7	23.4	28.8	82	SSE	2.2	
24	996.1	1000.1	26.6	22.2	26.8	77	S	1.8	
平均・合計	989.2	993.2	26		28.4	85		5.5	
最高・最大			27.8					17.7	

と考えられる。湾北部海盆の、安浦から横須賀に至る湾長軸長は約55Kmで、東京湾1Kmメッシュの数値モデル用の深度分布から計算した北部海盆の平均水深は20.0mである。したがって、浦安 - 横須賀を両端閉とする副振動周期を見積もると、約2時間の周期となり、実際の振動周期とほぼ一致する。これに対し、東京湾全体の湾振動周期は4～5時間と見積もられる。Fig. 2 (c) にみられる、減衰振動周辺の長周期トレンドは約6時間前後になっており、これは、風の強制力でやや周期が伸びたものと思われる。

3. 減衰係数の評価

Fig. 2 (c) のデータから4時間以上の長周期を除去して、減衰振動部分だけを取り出したものを Fig. 3 に示してある。このグラフから、山、谷の時間と水位を読み取った結果を Table 2 に示す。この結果から、減衰振動の山と谷の平均時間を求めると、57.75分となり、したがって、平均の周期は115.5分すなわち、1時間55分と

なる。一方、山 - 谷間の水位差の時間変化を片対数グラフとして表した結果を Fig. 4 に示す。ややばらつきはあるものの、相関係数0.943でほぼ直線(点線)の減衰をしていることがわかる。点線で与えられる振幅減衰式から振動の減衰率を求めると、 -0.0073 (1/5 min)、すなわち、 2.43×10^{-5} (1/sec) を得る。これが、東京湾北部海盆の副振動減衰係数である。

4. 減衰副振動モデル

ここで、東京湾北部海域を、平均水深 h の一次元モデルとして記述してみる。長軸方向に x 軸をとり、その方向の流速成分を、 u 平均水位からの水位偏差を η とすると、方向の運動方程式は

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここに、 ν は渦粘性係数、 g は重力の加速度である。また、連続の方程式を水深について積分すると

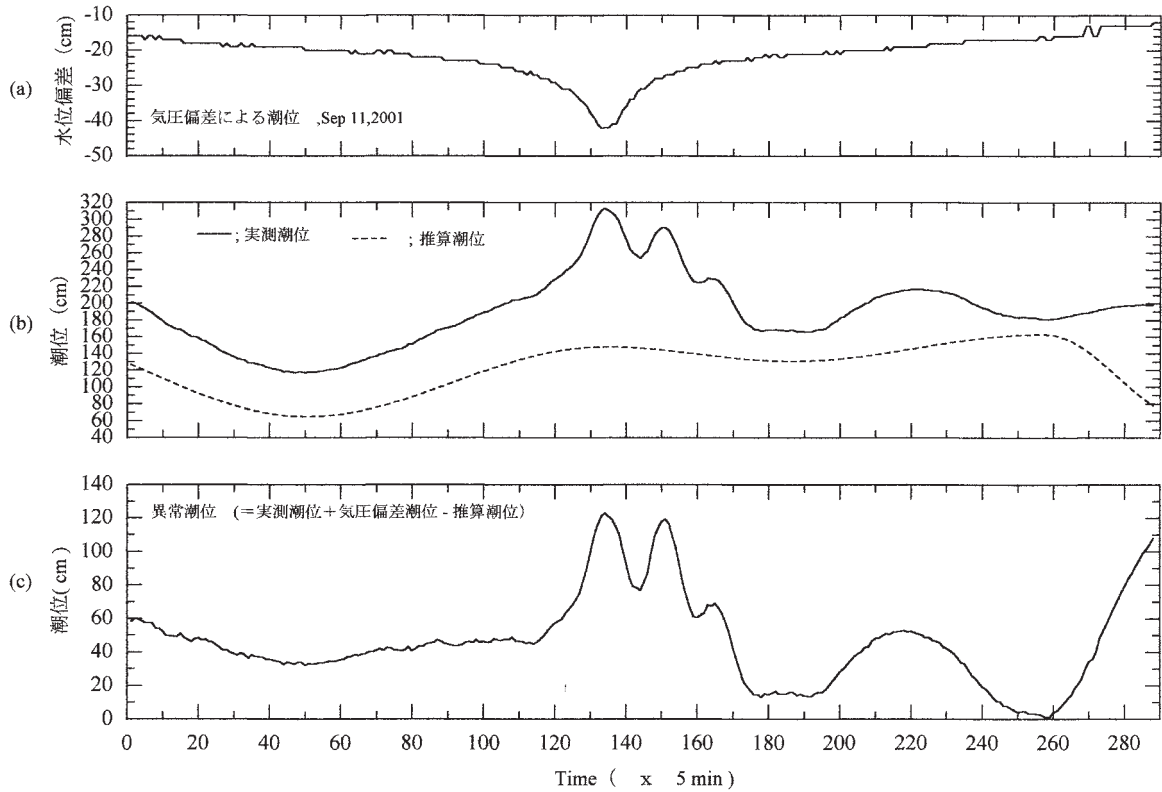


Fig. 2. Time series of tide level anomaly due to the atmospheric pressure anomaly (a), and time series of the observed tide level (solid curve in (b)), predicted tides (broken line in (b)), at Sibaura on 11, September, 2001. The lower panel (c) shows the abnormal tides corrected with atmospheric pressure anomaly, and predicted tides.

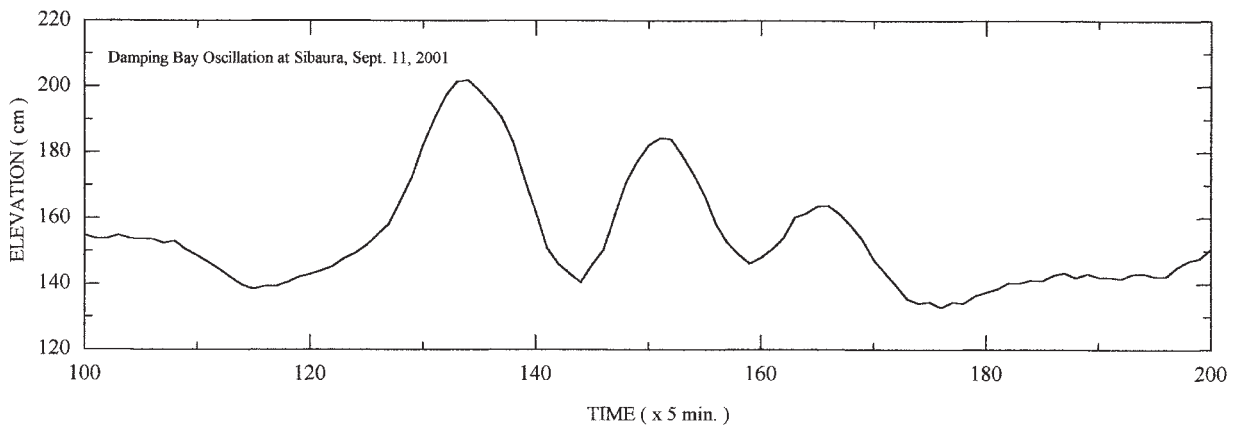


Fig. 3. Time series of damping oscillations induced in Tokyo Bay during Typhoon No.15, on 11, Sept., 2001.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_0^h u dz = 0 \quad \dots \quad (2)$$

$$v \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=h} = -k_0 \bar{u} \quad \dots \quad (3)$$

となる。

副振動を扱うので、海面の応力はないものとし、海底摩擦を鉛直平均流速の一乗に比例すると仮定すると、表面および水底条件はそれぞれ、次のように表される。

$$v \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad \dots \quad (3)$$

ここに、 v は渦粘性係数、 k_0 は線形摩擦係数である。

ここで、平均流速を

$$\bar{u} = \frac{1}{h} \int_0^h u dz \quad \dots \quad (5)$$

で定義し、(1)~(4)式を平均流に書き直すと、(1)式は

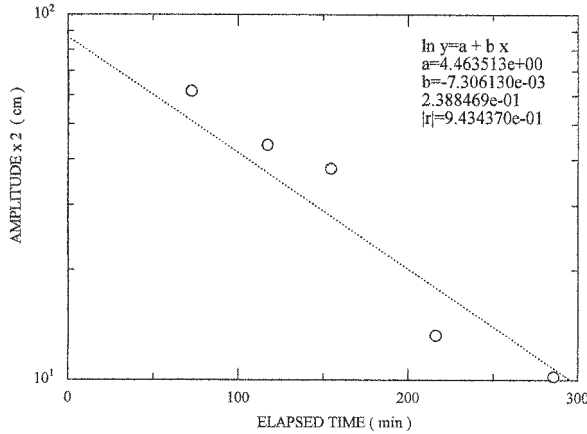


Fig. 4. Plot of the damping wave height vs elapsed time. The slope of the decreasing trend of amplitudes (dotted line) gives a damping coefficient.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{k_0 \bar{u}}{h} \quad (6)$$

また、(2)式は

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + h \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

となる。(6)、(7)から \bar{u} を消去すると、

$$\frac{\partial^2 \bar{\eta}}{\partial t^2} + \frac{k_0}{h} \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} = gh \frac{\partial^2 \bar{\eta}}{\partial x^2} \quad (8)$$

を得る。(8)は減衰振動方程式で、副振動の減衰係数を γ 、各周波数を σ 、水位振幅を η_0 、波数を k とすると、

$$\eta = \eta_0 \exp(-\gamma t + i\sigma t) \cos kx \quad (9)$$

の解を持つ。(9)を(8)に代入することにより、次のような分散関係が導かれる。

$$(\gamma + i\sigma)^2 - \frac{k_0}{h}(\gamma + i\sigma) = -ghk^2 \quad (10)$$

(10)を実数部と虚数部に分離すると、実数部からは

$$\sigma(2\gamma - \frac{k_0}{h}) = 0 \quad (11)$$

および、虚数部からは

$$r^2 - \frac{k_0}{h}r + (gh - \sigma^2) = 0 \quad (12)$$

が得られる。(11)からは

$$\gamma = \frac{k_0}{2h} \quad (13)$$

が導かれ、減衰係数と平均水深が与えられれば、線形摩擦係数を計算することができる。

ここで、東京湾北部海盆の平均水深、減衰係数を用いて(13)式から東京湾の線形摩擦係数を求めると

$$k_0 = 0.0972(\text{cm/s}) \approx 0.1(\text{cm/s})$$

が得られる。

また、(12)式からは

$$\gamma = \frac{1}{2} \left\{ \frac{k_0}{h} \pm \sqrt{\left(\frac{k_0}{h}\right)^2 - 4(ghk^2 - \sigma^2)} \right\} \quad (14)$$

を得るが、(14)の γ と (13) の γ が矛盾しないためには、

$$4(ghk^2 - \sigma^2) = \left(\frac{k_0}{h}\right)^2 \quad (15)$$

でなければならない。(15)式で、 $c_0^2 = gh$ と置き、 c_0 に対応する角周波数を σ_0 とすると、(15)は

$$(\sigma_0^2 - \sigma^2) = \left(\frac{k_0}{2h}\right)^2 \quad (16)$$

となり、これは、摩擦による角振動周波数の低下を与え式になっている。これを周期 T 、 T_0 で書き直すと、

$$(2\pi)^2 \left(\frac{1}{T_0^2} - \frac{1}{T^2} \right) = \left(\frac{k_0}{2h} \right)^2 \quad (17)$$

となり、摩擦係数と周期の伸びの関係が導かれる。ここで、 $T = T_0 + \Delta T$ と置き、 $\Delta T/T_0$ は 1 に比べ十分小さいとし、(17)の関係を用いて上式を書き換えると

$$\gamma = \frac{2\pi\sqrt{2}}{T_0} \sqrt{\frac{\Delta T}{T_0}} \quad (18)$$

を得る。(18)は、摩擦による副振動周期の伸び率 $\Delta T/T_0$ と減衰係数 γ の関係を表す。

(13)式と(18)式を辺辺乗じると

$$\begin{aligned} \gamma^2 &= \frac{2\pi\sqrt{2} k_0}{2hT_0} \sqrt{\frac{\Delta T}{T_0}} \\ &= \sqrt{2} \pi k_0 \sqrt{\frac{\Delta T}{T_0}} (hT_0)^{-1} \quad (19) \end{aligned}$$

Table 2. Change of wave height, and time differences of damping oscillations shown in Fig. 5.

時間軸 (min)	水位 (cm)	振幅 × 2 (cm)	経過時間 (min)
115.04	138.09	63.9	0
113.57	201.99	61.63	72.5
144.05	140.36	43.86	117.2
151.44	184.22	37.81	154.7
159.05	146.41	13.23	216.2
176.03	133.18	10.21	285.7
186.84	143.39		

Table 3. Damping coefficients taken at various lakes in the world (from Defant, 1961), in which the data on Lake Biwa and Tokyo Bay are newly added by the present author.

Nos	Lakes	Period (min)	Damp.Coeff. (sec-1)	Depth (m)
1	Lake-Geneva	73.5	6.83×10 ⁻⁶	154.4
2	Lake-Garda	42.0	1.82×10 ⁻⁵	-
3	Lake-Yamanak	15.6	1.10×10 ⁻⁴	8.2
4	Lake-Vattern	179.0	1.17×10 ⁻⁵	39.0
5	Chiemsee	41.0	5.30×10 ⁻⁵	24.5
6	Fish-Pond	1.02	2.91×10 ⁻³	-
7	Konigsee	11.6	3.27×10 ⁻⁴	-
8	Frisches-Haff	465.0	1.22×10 ⁻⁵	-
9	Lake-Erie	858.0	7.17×10 ⁻⁶	21.0
10	Lake-Balaton	576.0	1.13×10 ⁻⁵	7.2
11	Kurisches-Haff	550.0	1.17×10 ⁻⁵	-
12	Wagner-Tachinger-see	6.2	1.67×10 ⁻⁴	14.1
13	Lake-Biwa	240.0	3.12×10 ⁻⁵	4.2
14	Tokyo-Bay	120.0	2.43×10 ⁻⁵	20.0

After Endrose (Defant,1961), reproduced in adding with Nos.13 and 14 by Kanari.

が導かれる。(19)式は、副振動減衰係数が、水底摩擦係数、水深、周期、および周期の伸び率に関係していることを表している。次に、実際のデータで、この関係がどうなっているかを検討してみる。

5. 減衰係数と周期・平均水深の関係

Table 3は、Endros (Defant, 1961) によってまとめられた、世界各地の湖沼で計測された静振の減衰係数に、著者が以前にびわこ南湖で見積もった減衰係数 (金成、1979) および、今回、東京湾について求めたデータを追加して表したものである。表中、湖沼番号 2, 6, 7, 8, 11については、原著の表に平均水深が記載されていなかったため、そのまま記載なしで表してある。これらのデータを横軸に振動周期のみをとってプロットしてみたのが Fig. 5 である。周期とともに減衰係数の低下はみられるものの、かなりばらつきが大きい。そこで、(19)式の関係に従って、横軸に周期と水深の積をとってプロットしたものが Fig. 6 である。この図では、水深の与えられていない湖沼はプロットされていないが、データは 4.2m から 154.4m までの広範囲にわたっている。データ点は、明らかに、Fig. 5 よりも少ないばらつきで、ほぼ一線に乗っており、(20)式に近い関係が、海、湖沼の如何にかかわらず、一般に成り立っていることがわかる。

Fig. 6の点線は、データ点の最小二乗によって引いた直線で、この線は次式で与えられる。

$$\gamma^2 = 0.25293(hT_0)^{-1.222375} \dots\dots\dots (20)$$

(20)式が(19)式の形と整合するためには

$$k_0\sqrt{\frac{\Delta T}{T_0}} = \frac{0.25293}{\sqrt{2\pi}}(hT_0)^{-0.222375} \dots\dots\dots (21)$$

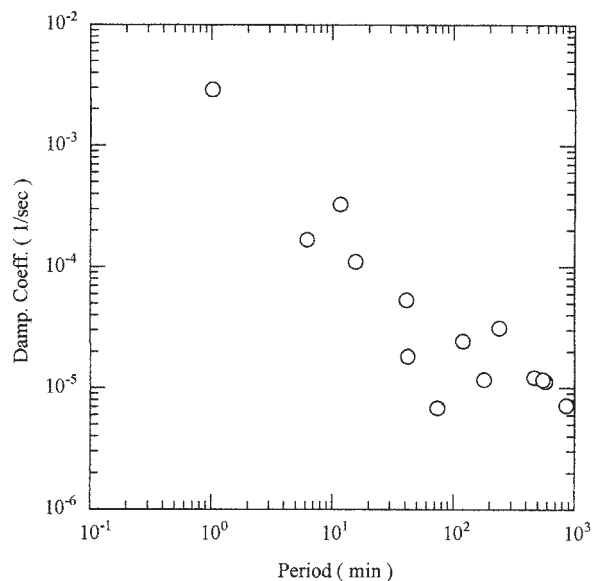


Fig. 5. Plot of damping coefficient vs oscillation period, taken at various lakes and Tokyo Bay.

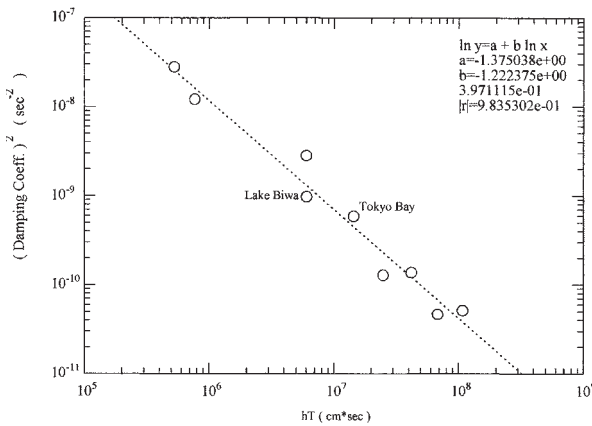


Fig. 6. Plot of damping coefficients vs hT_0 .

が成り立つ必要がある。実際のデータを用いて(21)の値を計算してみると、

$$k_0 \sqrt{\frac{\Delta T}{T_0}} = 0.00093 \sim 0.003$$

の間にあり、その値は 0.00169 ± 0.00071 の範囲で、ほぼ一定値とみなすことができる。従って、減衰係数 γ^2 は、港湾、湖沼の如何にかかわらず、近似的に次のような半経験式で表すことができることになる。

$$\gamma^2 = 0.00169(hT_0)^{-1} \dots\dots\dots (22)$$

ここに、値はすべて CGS 単位で表すものとする。

6. まとめ

2001年9月11日の台風15号通過に伴い、東京湾芝浦の潮位データに記録された副振動の減衰振動を解析し、その減衰係数を評価し、線形減衰振動モデルの分散関係から、減衰係数、線形摩擦係数に関する式を導き、その結果を、東京湾および世界各地の湖沼で求められた静振の減衰係数と対比・検討し、以下の結果を得た。

1. 台風15号通過時には、東京湾北部海盆は両端閉の副振動を行っていた。この副振動は、台風通過後、顕著な減衰振動を現出し、その減衰係数は $\gamma = 2.43 \times 10^{-5}$ (sec^{-1})と見積もられた。また、この減衰係数をもとに線形摩擦係数を見積もり、を得た。
2. 線形モデルから導かれた減衰係数は、水深 h 、周期 T_0 、および線形摩擦係数 K_0 の間に次のような関係がある。

$$\gamma^2 = \sqrt{2} \pi k_0 \sqrt{\frac{\Delta T}{T_0}} (hT_0)^{-1}$$

ただし、 $\Delta T/T_0$ は、摩擦による周期の伸び率、 T_0 は摩擦なしの副振動（または静振）の基本振動周期である。

3. 東京湾副振動および世界各地の湖沼の静振の減衰係数を hT_0 の関数としてプロットした結果、減衰係数が

$$\gamma^2 = 0.25293(hT_0)^{-1.222375}$$

で表される。

3. データによる減衰係数の式と線形モデルから導かれた減衰係数式が矛盾なく整合するためには、

$$k_0 \sqrt{\frac{\Delta T}{T_0}} = \frac{0.25293}{\sqrt{2} \pi} (hT_0)^{-0.222375}$$

の関係がなければならない。データから、この式の右辺を計算した結果、 0.00169 ± 0.00071 の範囲でほぼ一定値とみなせる。

4. 以上の結果から、静振または副振動の減衰係数の2乗は平均水深と基本振動周期に反比例し、港湾、湖沼の如何を問わず、

$$\gamma^2 = \sqrt{2} \pi (0.00169 \pm 0.000714) (hT_0)^{-1}$$

で与えられる。

謝 辞

この解析に使用した、2001年9月11日の芝浦異常潮位データは、海上保安庁海洋情報部が公開しているものであることを記し謝意を表します。数値モデル用東京湾1 km メッシュの深度データは、日本水路協会海洋情報研究センターの鈴木亨博士の提供になるものである。東京湾地形図は池田晃三氏他(1981)の論文から引用させていただいた。また、本論文を作成する上で、東京海洋大学の松山優治教授には貴重な情報提供でお世話になりました。ここに、併せて謝意を表します。

参考文献

- Defant, A. (1961) Physical Oceanography, Vol. 1, II, Pergamon Press., 598pp.
- 池田晃三・松山優治・辻 正明 (1981) 東京湾内の流動に及ぼす風の効果。海と空, 57, 31-40.
- 金成誠一・早瀬進治 (1979) 静振の減衰振動と減衰係数・線形摩擦係数の評価について。陸水学雑誌, 40, 102-109.

要 旨

2001年9月11日の台風15号の東京湾通過に際して、東京湾北部海盆で励起された減衰副振動を解析し、東京湾の減衰副振動に伴う減衰係数を評価すると同時に、これまでに、世界各地の湖沼で得られた減衰係数データと、線形減衰振動モデルを併用して、減衰係数の定式化を試みた。その結果、減衰係数は $\gamma = 2.43 \times 10^{-5} \text{ (sec}^{-1}\text{)}$ と見積もられた。また、この減衰係数をもとに線形摩擦係数を見積もり、 $k_0 = 0.1 \text{ (cm/sec)}$ を得た。

一方、線形モデルから導かれた減衰係数は、水深 h 、周期 T_0 、および線形摩擦係数 k_0 の間に

$$\gamma^2 = \sqrt{2} \pi k_0 \sqrt{\Delta T / T_0} (h T_0)^{-1}$$

の関係が成り立つことを示す。また、東京湾副振動および世界各地の湖沼の静振の減衰係数を $h T_0$ の関数としてプロットした結果、減衰係数が

$$\gamma^2 = 0.25293 (h T_0)^{-1.222375}$$

で表されること、また、データによる減衰係数の式と線形モデルから導かれた減衰係数式を組み合わせた結果、静振または副振動の減衰係数の2乗は平均水深と基本振動周期に反比例し、港湾、湖沼の如何を問わず、

$$\gamma^2 = \sqrt{2} \pi (0.00169 \pm 0.000714) (h T_0)^{-1}$$

で表されることを示す。

Damping Coefficient and Linear Frictional Coefficient of Tokyo Bay, during the Passage of Typhoon No. 15 on 11 Sept., 2001.

Sei-ichi KANARI

Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University

Keywords : bay oscillation, damping coefficients, linear friction coefficient, seiches.