

検潮井による検潮記録*

中 村 重 久**

Marigrams in tide-wells*

Shigehisa NAKAMURA**

Abstract: Marigrams of tides, storm surges and tsunamis, recorded in tide-well, are introduced first to take a glance at them for learning the variations of sea level and its vertical speed. A dynamical model of tide-well is considered for finding whether the sea level near coast can be observed well even in a tide-well. A remark is made for the sea level's vertical speed which must be affected by structure of the tide-well and by frequency characteristics of the sea level variations just outside the tide-well.

1. 緒 言

現在でも検潮井を利用して沿岸潮位を記録する例は、日本だけではなく、世界中をみわたしても多い。海底設置型圧力式潮位計による観測もある(たとえば、中村ら, 1986; FILLOUX, 1984)。しかし、ここでは、検潮井によって得られた検潮記録に焦点をおいて検討する。とくに、天文潮・台風による高潮、海底地震による津波の例によって、それぞれの現象としての特徴を、検潮記録によって示すとともに、潮位の変動速度と潮位との関係は力学的にみても意味のある重要なものであるということ述べる。このような現象は、沿岸域の利用上、人間活動に大きな影響を与えている。したがって、現象を正確に高精度で記録としてとらえる必要がある。ここでは、簡単な検潮井の力学的モデルによって、検潮井によって得られた検潮記録について検討し、潮位の時間的変動の特性をどのようにとらえるべきかを述べる。

2. 検潮記録の中の天文潮・高潮・津波

検潮井によって得られた検潮記録は、すでに、多数の

検潮所で長期間にわたって得られている。たとえば、ストックホルムでは、1774年以来現在までの年平均潮位がある(EKMAN, 1988)。ただ、ここでは、とくに日本国内のある検潮所について天文潮あるいは高潮あるいは津波を含む検潮記録例を示し、それぞれの現象の特徴を明らかにすることに焦点をおく。

(1) 天文潮

これについては、たとえば、中野(1939)が潮汐学をまとめている。ここでは、検潮記録の例として、紀伊半島の白浜検潮所(気象庁所管)の潮位 Z について、1987年7月9—18日の記録を Fig. 1 に示した。この図には、潮位 Z の時間 t に対する変化率 $Z_t (= \partial z / \partial t)$ もあわせて示した。この図をみると7月11日(満月)に日潮不等が顕著なことがわかる。この検潮記録にもとづき、1日ごとに $Z \cdot Z_t$ ダイアグラムをもとめ、Fig. 2 のように図示することもできる。さらに、3変数として $Z \cdot Z_t \cdot t$ をえらび Fig. 3 のように図示することもできる。一見、複雑なようにみえるが、これは表示方法が異なるにすぎない。この Fig. 3 を $Z \cdot Z_t$ 平面上に投影すると Fig. 4 のようになる。これらの図から、白浜における検潮記録では、天文潮のなかでも、半日周潮と日周潮とが顕著であり、また、半月周潮も存在することがわかる。

台風による高潮や海底地震による津波は、上に述べたような天文潮からの偏差あるいは擾乱とみることもできる。

* 1988年12月9日受理 Received December 9, 1988

** 京都大学防災研究所附属白浜海象観測所,
〒649-22 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田畑崎
Shirahama Oceanographic Observatory, Disaster
Prevention Research Institute, Kyoto University,
Katada-Hatasaki, Shirahama, Wakayama, 649-22
Japan

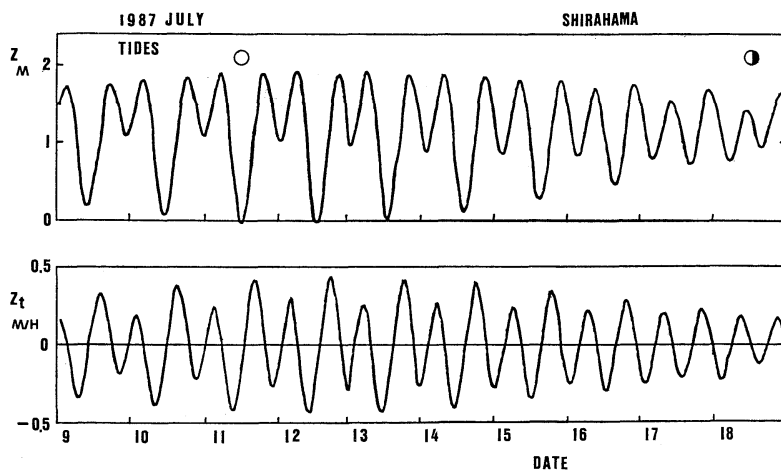


Fig. 1. Marigram at Shirahama from 0h on 9 to 24h on 18 in July 1987. Upper: timely variations of sea surface level Z . Lower: timely variations of time derivative of Z , i.e. Z_t . Circle for full moon and circle half in shadow for the third fourth phase of the moon age.

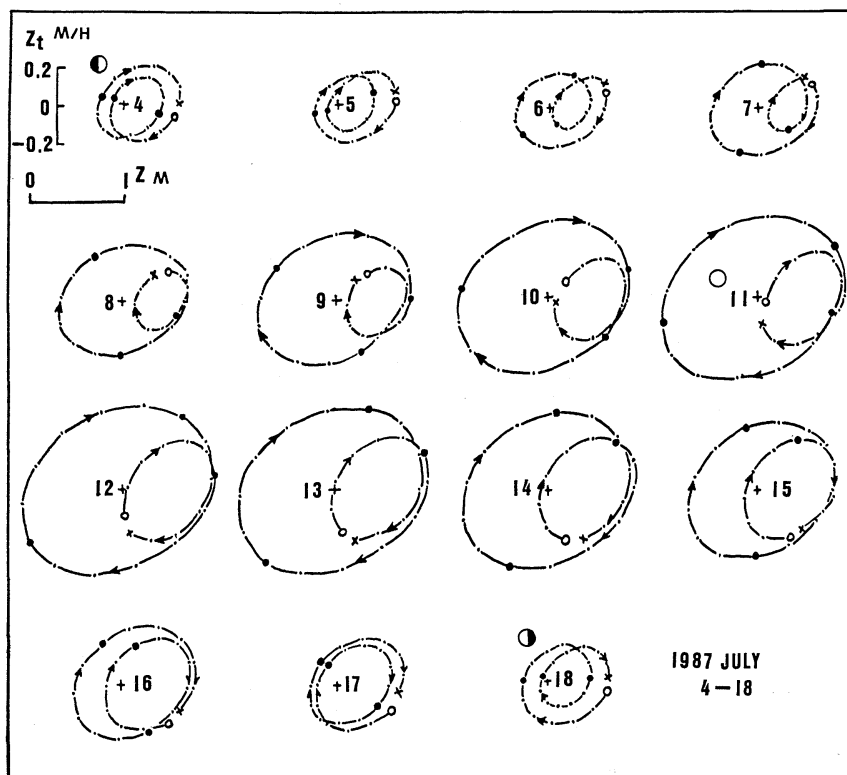


Fig. 2. Diurnal phase diagram of Z and Z_t at Shirahama from 0h on 4 to 24h on 18 in July 1987. Hourly plot by dot with arrow to show timely variations. Circle for 0h on each day and cross for 24h on each day. The first fourth phase of the moon age is on 4 July, the one half phase (full moon) is on 11 July and the third fourth phase on 18 July.

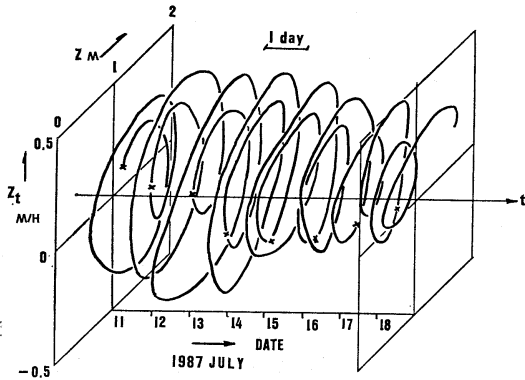


Fig. 3. A Poincare projection with time axis for the tides at Shirahama from 11 to 18 July 1987. Cross for 0h on each day.

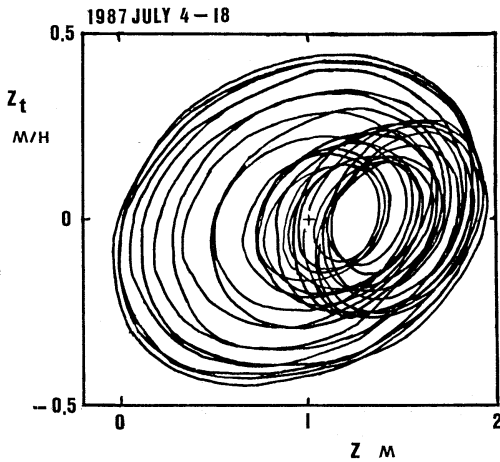


Fig. 4. A diagram of Z and Z_t at Shirahama for a time interval from 4 to 18 July 1987.

(2) 高潮

台風は日本沿岸域に高潮を起こし、その影響は大きい。この種の高潮は、過去においてすでに多数の例がある。ここでは、高潮の現象をとらえることを目的として、1934年9月21日の室戸台風時に、大阪で得られた検潮記録を Fig. 5 に一例として示した。図中、記録は破線で示され、当時の予想潮位（主として天文潮）は実線で示されている。この実線と破線との高さの差（偏差）は、気象潮ともよばれ、(i) 気圧低下の効果、(ii) 風による吹き寄せ効果、(iii) 台風の経路および移動速度

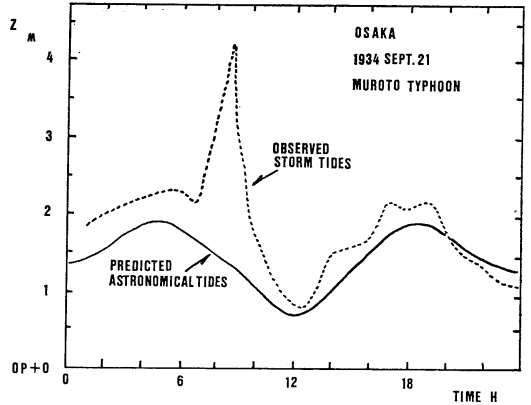


Fig. 5. Marigram at Osaka on 21 September 1934, as an example of the storm surges. Chain line for a typical storm tides induced by Muroto Typhoon. Full line for predicted astronomical tides.

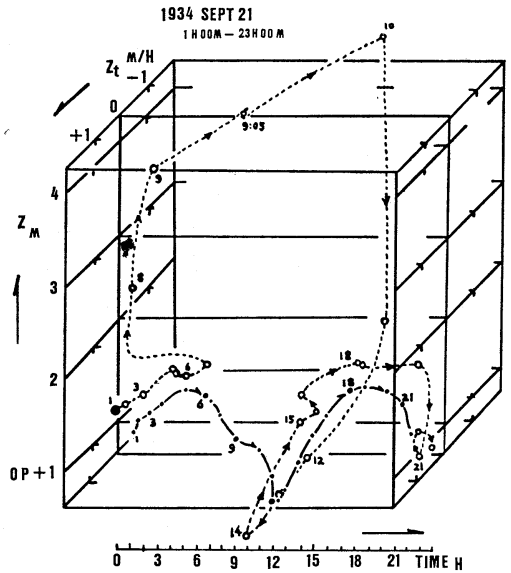


Fig. 6. A Poincare projection with time axis for the storm surge at Osaka induced by the Muroto Typhoon on 21 September 1934.

の効果によって生じるとされている。

さきに示した天文潮の場合と同様にして、 $Z \cdot Z_t \cdot t$ をえらび、Fig. 5 のかわりに Fig. 6 のように図示することもできる。図中、破線と白丸は高潮を示し、実線と黒丸は予想潮位を示す。これによって、高潮における Z および Z_t の値およびそれらの時間的変動の特徴がわかる。

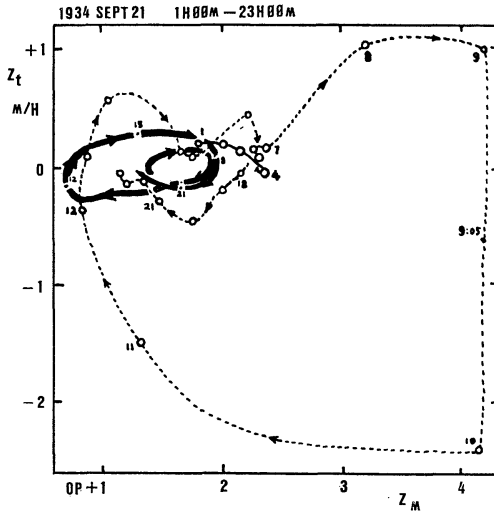


Fig. 7. A diagram of Z and Z_t at Osaka for the storm surge (chain line) and predicted astronomical tides (thick line) on 21 September 1934.

さらに、 $Z \cdot Z_t$ ダイアグラム上での高潮を Fig. 7 に示した。

(3) 津波

日本のみならず、環太平洋地震帯では、海底地震によって津波が発生し、とくに、大津波は沿岸域に甚大な被害を及ぼしている。ここでは、Fig. 8 に、1944年12月7日に下津で記録された津波を一例として示した。この津波を、 $Z \cdot Z_t \cdot t$ を変数として図示すれば、たとえば Fig. 9 のようになる。また、この津波は、 $Z \cdot Z_t$ ダイアグラム

上では Fig. 10 のように図示できる。この津波に関する図では予想潮位を示していない。1944年12月7日には、13時から21時へと満潮から干潮へ向かう下げ潮時であることだけをここに記す。

以上のように、検潮井による記録から、天文潮・高潮・津波の現象としての特徴をとらえることができる。しかし、台風の経路によっては高潮の発生する場所もパターンも同じではない。さらにまた、海底地震の発生も一定の場所であるわけでもなく、発生の時期も予想が困難である。このような高潮および津波についての詳細については、さらに別の面からの検討例を参考にすべきであろう（たとえば NAKAMURA, 1987a, b, 1988; 中村1988）。また別に 外的作用要因 がはっきりしない異常潮位も現象としては知られているが、ここではちいって述べることはしない。

3. 検潮井と検潮記録

前節に例示した検潮記録は、検潮井を用いて得られたものである。

一般に、検潮井は Fig. 11 のような構造となっている。検潮井内の水位 Z は、検潮儀 D のフロート F によって検出される。重錘 G はフロート F が Z の変化に追随するのが容易になるように設けられる。外海の水位(潮位) Z_0 の変動は導水管(断面積 a , 長さ L)によって検潮井内に伝わる。これにともない導水管内に生ずる流速変動を u とする。とくに、検潮井内に流れはないとみてよければ、 Z_0 の変動がゆるやかで $\partial u / \partial t$ も無視できるくらい小さいとき、近似的に

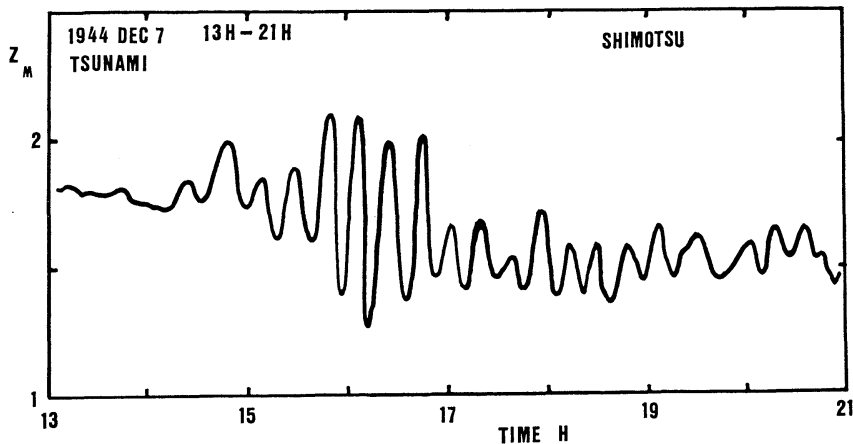


Fig. 8. Marigram at Shimotsu on 7 December 1944, as an example of the tsumamis.

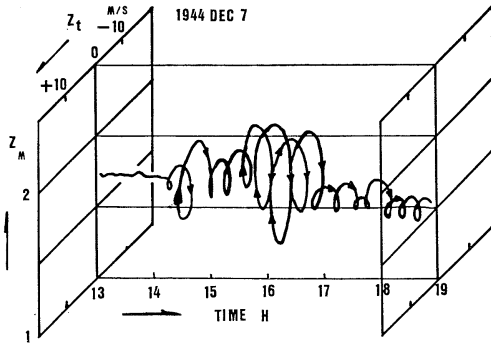


Fig. 9. A Poincare projection with time axis for the tsunami at Shimotsu on 7 December 1944.

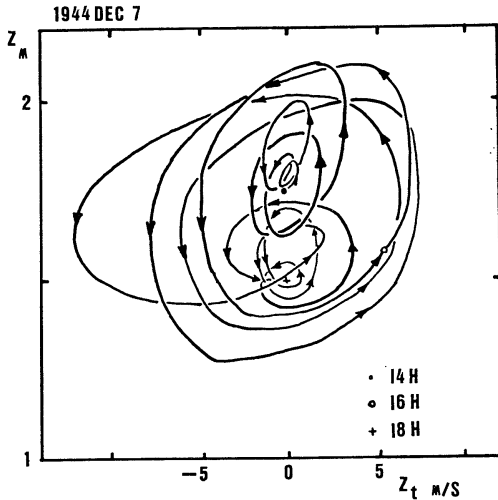


Fig. 10. A diagram of Z and Z_t at Shimotsu for the tsunami on 7 December 1944.

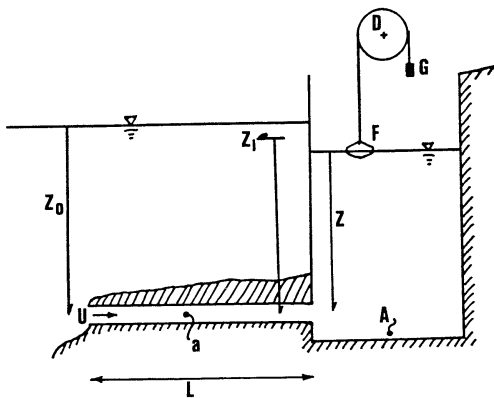


Fig. 11. A model of tide-well.

$$\rho g Z_0 + \left(\frac{1}{2} \rho u^2\right) a = \rho g Z \quad (1)$$

したがって、

$$u^2 = 2g(Z - Z_0)/a \quad (2)$$

一方、外海と検潮井との間の水の運動に対し連続の条件を考えると、

$$A \frac{\partial(Z - Z_0)}{\partial t} = au \quad (3)$$

ここで、(2)と(3)とから、

$$\frac{\partial(Z - Z_0)}{\partial t} = \pm \frac{a}{A} \left[\frac{2g(Z - Z_0)}{a} \right]^{1/2} \quad (4)$$

ただし、外海から検潮井へ向かう流れの時に正符号(+)をとるものとすれば、負符号(-)は検潮井から外海へ向かう流れの時に対応する。上の(4)の厳密解は容易に得られ、

$$Z = Z_0 + \left[\frac{ag}{2A^2} \right] (t - t_0)^2 \quad (5)$$

と書ける。しかし、この解では、外海と検潮井内との水位差 $(Z - Z_0)$ は時間とともに変化する。数学的に厳密であるが、力学的に正しいかどうかは別の問題である。

いま、検潮井内外の水位差が

$$H = H_0 \exp(-\kappa t) \quad (6)$$

のように時間とともに小さくなる傾向を示す場合、 $H = Z - Z_0$ および $H_0 = Z_1 - Z_0$ として、これらと(6)とを(4)に代入すると

$$\kappa^2 = \frac{2ag}{A^2} \quad (7)$$

が得られる。すなわち、(6)は(4)の特解である。このとき、検潮井内の水位 Z は

$$Z = Z_0 [(-\exp(-\kappa t))] - Z_1 \exp(-\kappa t) \quad (8)$$

したがって、外海の潮位 Z_0 は検潮井内では Z として検出される。しかも、時間 t が十分に長ければ、検潮井の構造に関係した κ の影響もなくなり、 $Z = Z_0$ とみなくてもよい状態になる。ちなみに、 $a = 0.01 \text{ m}^2$ 、 $A = 1 \text{ m}^2$ 、 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ とすると、(7)より $\kappa^2 \approx 0.2$ となる。

さらに、導水管に注目すると、たとえば、SATAKE *et al.* (1988) が検討しているように、管内の摩擦の効果、導水管の接続にともなう断面積の変化の効果、導水管の配置や屈曲の効果なども考慮にいれなくてはならない。

また、検潮井設置後、導水管内に海洋生物が附着して粗度が変化することも考えられる。あるいは、外海から砂泥などが導水管内に運びこまれて断面積が実質的に小さくなったり、時には閉塞したりすることも考えられる。さらに、検潮井周辺地形の変化も十分考慮しなくてはならないであろう。しかし、これらの諸点を(8)に

表式化することは容易ではない。

ところで、 Z_0 の変動が

$$Z_0 = Z_1 + A_0 \sin(\omega t + \varepsilon) \quad (9)$$

で与えられた場合、検潮井内の Z はどのようになるであろうか。この場合、(8) は

$$Z = [Z_1 + A_0 \sin(\omega t + \varepsilon)] \cdot [1 - \exp(-\kappa t)] - Z_1 \exp(-\kappa t) \quad (10)$$

であり、時間が十分長ければ

$$Z \rightarrow Z_0; \quad t \rightarrow \infty \quad (11)$$

とみてよいであろう。

それでは、検潮井内の Z の時間的変化はどうであろうか。ここで $Z_t (= \partial z / \partial t)$ は

$$Z_t = \omega A_0 \cos(\omega t + \varepsilon) \cdot [1 - \exp(-\kappa t)] + \kappa [Z_1 + A_0 \sin(\omega t + \varepsilon)] \cdot \exp(-\kappa t) + \kappa Z_1 \exp(-\kappa t) \quad (12)$$

この (12) をみると、 Z_t を特性づけるのは、外海の変動の振幅 A_0 とその変動の周波数 ω との積であることがわかる。また、検潮井の動的特性を示すと外海の変動の振幅 A_0 との積も認められる。検潮井の構造が与えられれば κA_0 の値もそれに応じて定まる。

ここで重要なことは、(12) で t の値が十分大きくなると、漸近的に

$$Z_t = \omega A_0 \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (13)$$

となることである。この場合、たとえ、外海の Z_0 を検潮井内の Z として検出し、 $Z = Z_0$ であったとしても、 t が十分大きい値の時のみ $Z_t = Z_{0t}$ の漸近的關係が認められる。いま、 κt の値が小さい場合、近似的に

$$\exp(-\kappa t) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-\kappa t)^n}{n!} \quad (14)$$

であるから、(12) はつぎのように書ける。

$$Z_t = -\omega A_0 \cos(\omega t + \varepsilon) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-\kappa t)^n}{n!} + \kappa [2Z_1 + A_0 \sin(\omega t + \varepsilon)] \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-\kappa t)^m}{m!} \quad (15)$$

ここで、 κ の 1 次の項までの近似をとると、

$$Z_t = \kappa [\omega A_0 \cos(\omega t + \varepsilon) + A_0 \sin(\omega t + \varepsilon) + 2Z_1] \quad (16)$$

これに対応した Z は (10) と (14) より

$$Z = \kappa t [Z_1 - A_0 \sin(\omega t + \varepsilon)] \quad (17)$$

となる。

ちなみに、検潮井内の水をポンプで注・排水した場合には、その後の検潮井内の水位変化は (8) によって与えられ、外海の水位変動の周期特性に関係しない。検潮井設置には、 Z_t も考慮すべきで、ただ土木・建築関係に任せること (気象庁編：海洋観測指針) はよくない。

なお、本文で気象庁の検潮記録を利用した。

文 献

- EKMAN, M. (1988): The world's longest continued series of sea level observations. *Pure Appl. Geophys.*, **127**, 73-77.
- FILLOUX, J.H. (1984): Semidiurnal amphidrome of the northeast Pacific: where?. *Mar. Geophys. Res.*, **7**, 247-266.
- NAKAMURA, S. (1987a): A note on numerical evaluation of tsunami threat by simple hydrodynamic and stochastic models referring to historic descriptions. *Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, **37**, 1-18.
- NAKAMURA, S. (1987b): A numerical prediction of semidiurnal current patterns in Tanabe Bay. *Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, **37**, 91-105.
- NAKAMURA, S. (1988): An observation of factors related to typhoon. *Proc. 6th Congr. Asian Pacific Reg. Div., Internat. Assoc. Hydraulic Res.* **4**, 273-280.
- 中村重久 (1988): 紀伊半島沿岸における年周潮 Sa のスペクトルとそのサイド・ローブ. *La mer*, **26**, 1-6.
- 中村重久・西 勝也・吉岡 洋・芹沢重厚 (1986): 白浜海洋観測塔沖の潮流観測. *京大防災研年報*, **29 B-2**, 717-725.
- 中野猿人 (1939): 潮汐学. 古今書院, 東京. 528pp.
- SATAKE, K., M. OKADA and K. ABE (1988): Tide gauge response to tsunamis: measurements at 40 tide gauge stations in Japan. *J. Mar. Res.*, **46**, 557-571.