

弾性を考慮した底泥床上の波高減衰計算手法 と現地海域への適用

中野 晋*・伊東 信幸**

1. ま え が き

底泥や軟弱粘土が堆積している海域での波浪変形や漂砂問題に対するわが国の技術レベルはこれまで決して高くなかったが、ここ数年活発に研究が進められてきた結果、この問題についてのアプローチ手法が少しずつ確立されつつある。波と底泥との相互干渉の計算手法についても Dalrymple and Liu (1978) の理論を拡張した中野ら (1987) の粘性流体多層モデルやこれに弾性の影響を含ませた柴山ら (1989) の粘弾塑性体モデルなど底泥の非ニュートン流体としての特性を考慮したモデルが提案され、底泥床上の波高減衰や質量輸送などについて“定性的”には十分説明できる段階となっている。しかし多少圧密が進み、含水比が低下した底泥が波によって流動化して運動を始める限界やこれまでの理論が現地海域でどの程度適用可能であるかなどまだまだ検討すべき事項は今も多く残されている。本研究はまず柴山らが用いた底泥の粘弾性を考慮できる多層モデルにより波高減衰に及ぼす弾性の効果について検討する。さらに底泥内部の応力状態からの流動限界条件を明らかにするとともに、これまでの理論を総合して底泥が堆積した現地海域での波高減衰について検討した。

2. 弾性を考慮した底泥床での波高減衰計算

(1) 計算方法の概要

Macpherson (1980), Hsiao and Shemdin (1980), 柴山ら (1989) と同様に、底泥を Voigt 粘弾性流体と仮定した解析を行った。潮流などの流れの影響を考慮する場合と考慮しない場合のいずれの計算モデルも第 i 層の相当動粘性係数 ν_{ei} を式 (1) のように複素数で表す以外は粘性流体多層モデル (中野ほか, 1987, 1989) と同じである。

$$\nu_{ei} = \bar{\nu}_i + iG/\sigma\rho_i \dots\dots\dots (1)$$

$$\rho_i \bar{\nu}_i = \mu_B + \tau_y/D_* \dots\dots\dots (2)$$

ここで σ は波の角周波数、 ρ_i は底泥の密度、 G , μ_B ,

τ_y は底泥の弾性係数、塑性粘度と降伏値である。また D_* は運動状態下での代表のずり速度であり、変形速度テンソルの第 2 不変量の関数で表される。

(2) 弾性係数の評価

柴山ら (1989) は内円筒を振動型にした回転粘度計を用いて底泥の弾性係数と粘性係数を求めている。ここでは Bird の方法 (たとえば 富田, 1975) により鶴谷ら (1986) が同心二重円筒型回転粘度計で測定した粘度曲線 (粘性係数—ずり速度関係曲線) を基にカオリナイトと熊本港泥について評価した。

Bird の方法はずり速度が $D > 1s^{-1}$ で成立するべき乗則領域での $\log \mu - \log D$ 曲線の勾配 α と流動形態がビンガム流体からべき乗則流体に遷移するずり速度 (D_0) 付近で一定値を示す見かけの粘度 μ_0 から緩和時間 τ_M を

$$\tau_M = \left\{ \frac{\pi}{Z(\alpha)-1} \frac{(2\alpha D_0)^{(1-\alpha)/\alpha}}{2\alpha \sin\left(\frac{1+\alpha}{2\alpha}\pi\right)} \right\}^{-\alpha/(1-\alpha)}$$

$$Z(\alpha) = \sum_{n=1}^{\infty} n^{-\alpha} \dots\dots\dots (3)$$

で求め、次式を用いて弾性係数 G を評価するものである。

$$G = \mu_0/\tau_M \dots\dots\dots (4)$$

この方法は一般化された 3 次元 Maxwell モデルに基づいており厳密には Voigt モデルに対する弾性係数値と

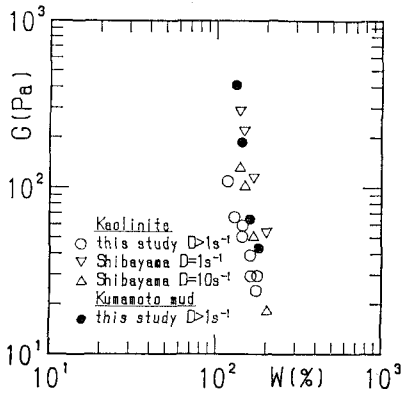


図-1 Bird の方法により評価した弾性係数

* 正 会 員 工 修 徳島大学講師 工学部建設工学科
** 学生会員 徳島大学大学院工学研究科

は一致しない。しかし高分子化合物の場合には両者の違いは 20% 以内であると報告されており、大きいずれ速度の範囲に限れば、Voigt モデルに対する弾性係数と近い値を示すものと考えられる。図-1 に弾性係数と含水比の関係を示す。同図には柴山ら (1989) の周期 1s についての測定結果も示しているが、これらの値は Bird の方法で求められた G より 2~3 倍程度大きいこと、ずれ速度によっても変化することがわかる。

(3) 波高減衰に及ぼす弾性の影響

図-2 は弾性係数 G によって波高減衰係数 k_i がどのように変化するかを調べたものである。水深、底泥厚さがともに 20 cm で周期が 1.2 s の条件では $G=400$ Pa で共振状態となり、この値が最大となることがわかる。底泥層を一端固定、他端自由の弾性体壁面 (高さ h) が波の進行方向に対し直交して平面的に敷き詰められたものとする。その壁面の上端に正弦波外力が軸方向に作用する場合、壁面の第 1 次モードの固有角振動数 σ_* は

$$\sigma_* = (\pi/2h) \sqrt{G/\rho} \dots\dots\dots (5)$$

で表される (たとえば小坪, 1965)。これより波の周期と固有振動数が一致する弾性係数は $G=16 \rho h^2/T^2$ で表される。ここで $h=20$ cm, $T=1.2$ s, $\rho=1.2$ g/cm³ とすると、 $G=533$ Pa であり、図-2 に示された共振時の弾性係数の 1.3 倍程度の値が得られる。大胆な仮定による試算であり、正確に共振状態を推定できる訳ではないが、底泥厚さと周期に対してある弾性係数の時に共振が生じることがわかる。

図-3 は水深 20 cm で厚さ 10 cm のカオリナイト泥 (含水比 168%, $G=30$ Pa) の上を進む波 (初期波高約 4 cm) の波高減衰係数について計算値と実測値を比較したものである。代表ずれ速度 D_* として 1 周期最大ずれ速度 $D_{\max}$ を用いた計算結果を太い線で、1 周期平均ずれ速度 D_{mean} を用いた計算結果を細い線で示した。また前項で述べたように Bird の方法で求めた弾性係数は柴山らが評価した値に比べると小さめであることを考慮して換算係数 $K_G (=0 \sim 3)$ を掛けた値を用いて計算した。図より周期 T が 1.1 s 以下では $K_G=2$ ($G=60$ Pa) の計算結果が実測の波高減衰係数 k_i とよく一致し、それ以上の周期では $K_G=1$ の計算値程度となっている。 $K_G=0$ は粘性流体に対する計算結果であるが、この計算値は実測値よりかなり小さく、正しい弾性係数を用いた計算が波高減衰現象をより正確に評価できることがわかる。また $D_{\max}$ と D_{mean} を用いた計算値を比較すると弾性係数が大きい場合 ($K_G=3$) を除くと両者の差は大きくないことがわかる。しかし底泥のせん断強度に比べ波高が小さく、底泥運動が小さくなるときには D_{mean} を用いた計算では相当粘度を過大に見積る傾

向がある。そこで以下の計算では $D_{\max}$ を用いることとする。なお実験での底泥床の長さは 4 m と短く、周期 1.2 s 以上では底泥床には波が 2 波以内しか存在で

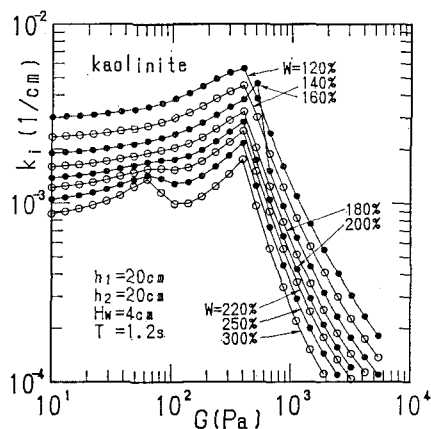


図-2 波高減衰係数の G による変化

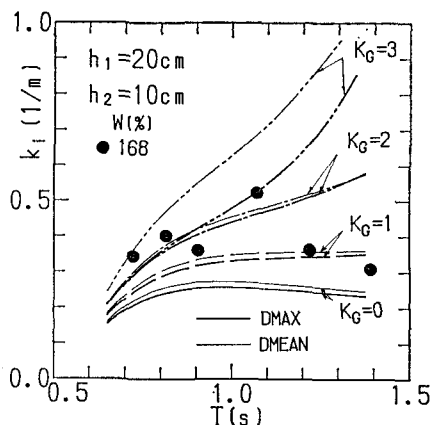


図-3 代表ずれ速度と換算係数 K_G の検討

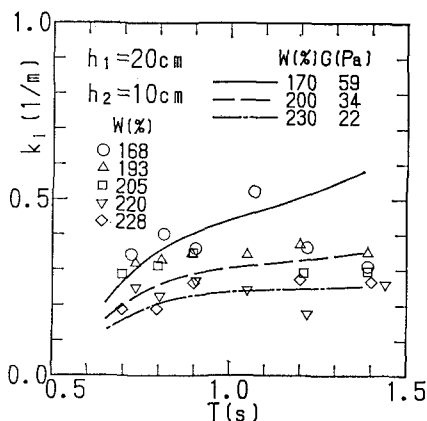


図-4 波高減衰係数の実測値と計算値の比較

きない。したがってこの影響により周期の長いケースは底泥運動が制約を受け、波高減衰量が小さかった可能性も否定できない。

図-4 は含水比を 168~228% の範囲で変化させた実験結果と計算値 ($K_g=2$, $D_*=D_{max}$) を比較したものである。周期の長いケースを除くと両者が良く一致しており、この計算モデルで波高減衰現象がよく再現できることがわかる。

3. 波浪による底泥の流動限界

(1) 波浪下での底泥層内の最大せん断応力

海底地盤の波浪による液状化を調べる上で底質内の応力分布特性を知る必要があるため、これまで砂と粘土の底質について多くの研究がなされている。そのうち Yamamoto et al. (1978) の多孔質の弾性地盤を対象とした解析によると深さが ∞ で飽和した海底地盤内の最大せん断応力振幅の鉛直分布は

$$\tau_{max} = P_0 k z' \exp(-k z') \dots\dots\dots (6)$$

で表される。ここに、 P_0 は海底表面での圧力振幅、 k は波数、 z' は海底面からの深さである。金谷 (1985) が述べているように、海底面での水の出入りがある場合、ない場合のいずれでもこの式で液状化していない海底地盤の最大せん断応力振幅の分布は近似できると考えられる。

(2) 底泥の流動限界についての実験

実験は造波板からの長さ 13.8 m, 幅 0.48 m, 高さ 0.75 m の片面ガラス張りの造波水槽で行った。水路中央部に長さ 5 m, 高さ 0.15 m の底泥床部を設けた。底泥の流動量を把握するためにメチレンブルーで着色した泥 (厚さ 15 mm) を底泥床の造波板側から 1.25, 2.5, 3.75 m の 3 カ所に水槽壁と直角に挿入した。トレーサー泥の挿入方法とサンプル方法は 柳山・Bijker (1988) が泥の質量輸送を測定した方法とほぼ同じである。波を約 30 分間作用させ、トレーサー泥の移動が停止した後に水路中央付近に水槽壁と平行に採泥用プラスチック容器 (厚さ 10 mm) を挿入し、サンプルを採取し、着色土の移動状況を OHP 用紙に写し取って、各深さの泥の移動量を測定した。

図-5 はその 1 例であり、左側から $x=1.25$ m, 2.5 m, 3.75 m の位置での結果を示す。図の左側から右側に波が進んでおり、波高もそれとともに減衰しているが、底泥移動量も小さくなるのがわかる。

底泥の流動は底泥内部の最大せん断応力が底泥のせん断強度を越えた時に生じると考えられる。底泥内部の最大せん断応力の最大値 τ_{max} および底泥のせん断強度にそれぞれ式 (6) から求められる τ_{max} , 回転粘度計による降伏値 τ_y を用いる時、底泥表面での移動量 Δx_0

と τ_{max}/τ_y の関係は 図-6 で示される。この図から底泥の移動が $\tau_{max}/\tau_y > 1$ で生じていることが明らかであり、流動限界が

$$\tau_{max} = \tau_y \dots\dots\dots (7)$$

で与えられることがわかる。

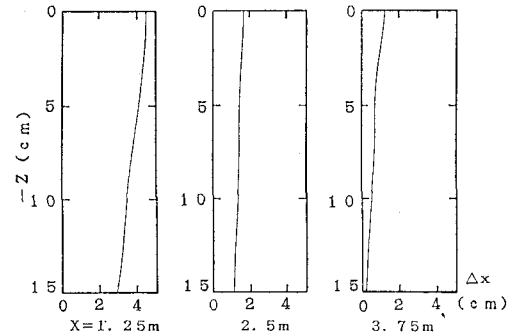


図-5 底泥移動量の実測例
($W=135\%$, $T=0.8$ s, $H_{W0}=2.1$ cm)

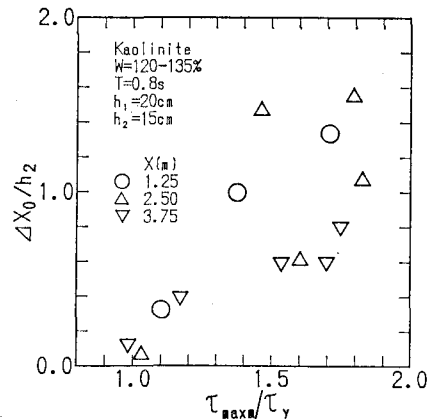


図-6 底泥の流動限界

4. 底泥の堆積した現地海域への適用

(1) 観測結果概要

今回現地における底泥床上の波高減衰について解析対象とした現地観測データは1987年8月30日~9月3日に運輸省第四港湾建設局により測定された熊本港建設海域でのもので、その一部は鶴谷 (1989) により報告されている。図-7 に観測地点を示す。波高観測が観測塔で2時間間隔で行われ、電磁流速計による流速測定 (海底面上 0.3 m) が観測塔と鋼管杭で20分間隔で行われている。この海域では等深線は岸に平行に南北に走っているため、鋼管杭 (C) に到達する波はほぼA点付近から伝播すると考えられる。A点の波高は観測塔での測定値を用いることとし、A点からC点の1 kmの間の波高減衰に

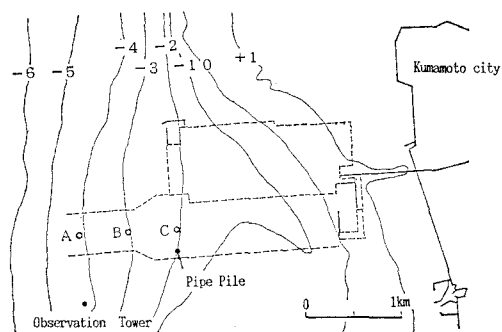


図-7 熊本港海域における観測地点

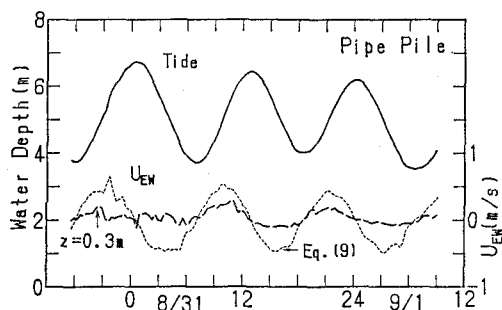


図-8 鋼管杭での水深変化と岸向き潮流流速

表-1 底質の調査結果

Point	A	B	C
含水比 (%)	151.5	113.8	90.2
比重	2.61	2.64	2.67
レッド貫入量 (cm)	25.3	39.3	28.0

について検討する。鋼管杭での潮位と東西方向の流速変化を図-8に示す。A, B, C点の底質の調査結果は表-1の通りである。

(2) 計算方法

AC間1kmを40区間($dx=25$ m)に分割して各区間の波高変化を以上の効果を考慮してオイラー的に計算を進めた。

$$H_{wi+1} = k_i' k_s k_w k_f H_{wi} \dots \dots \dots (8)$$

H_{wi} : 断面 i の波高

k_i' : 波と底泥の相互干渉による波高減衰率
($=\exp(-k_i dx)$)

k_s : 浅水変形による波高減衰率
($=K_{si+1}/K_{si}$, K_s : 浅水係数)

k_w : 風による発達あるいは減衰率

k_f : 海底摩擦による波高減衰率

上式で示した通り、海域での波高変化は波と底泥の相互

干渉の影響の他、浅水変形、風による発達・減衰や海底摩擦などが考えられる。

まず波と底泥の相互干渉の効果は次のように計算した。8月31日の潮差は約2.5mと大きいため、この計算では潮流の影響を考慮する方が望ましい。そこで流れを考慮できる著者らのモデル(1989)に式(1)を導入し改良したモデルを用いた。観測時の最大風速は20m/sを越えており、吹送流や沿岸流の影響は無視できないが、鶴谷(1989)の計算を参考にして、流れの方向は波と同様、岸に直角であると仮定した。またA~Cの海底勾配がほぼ一様で1/500であり、等深線も岸にほぼ平行であることから、岸方向の流れに潮汐の影響が明確に現れると判断して東西方向の潮流流速 U_{EW} (東向きを正)を次式のように水深変化に比例すると仮定した。

$$U_{EW} = -\alpha(\partial h/\partial t) \dots \dots \dots (9)$$

ここで h は水深、 α は定数であり、鶴谷(1989)の計算値(潮の最盛時に水面近くで $U_{EW}=0.5\sim 1.0$ m/s程度)を参考に $\alpha=2500$ とした。なお式(9)で求めた流速と鋼管杭地点の海底面上0.3mでの平均流速の東西成分の比較を図-8中に示している。海底付近の流速もほぼ式(9)と同じような変化を示しているが、計算で用いたものに比べるとかなり小さい。また底泥層は3層に分けて計算し、底泥の流動限界として式(7)を用い、非流動化の場合には $k_i'=1$ として計算を進めている。

井島(1968)が浅海波浪予測についての数値計算手法を提案しており、この方法は実務に使用されている。本研究でもこの方法で風による発達計算も試みたが、フェッチが短いため、波高変化へと寄与はほとんどないことがわかったため、 $k_w=1$ とした。

海底摩擦による波高減衰の評価は Bretschneider の方法を用い、摩擦抵抗係数は $f=0.01$ とした。

計算は8月30日の22時から31日18時の高波浪時のみを対象に行った。計算に用いた底質の条件を表-2に示す。

表-2 計算での底質条件

x (m)	0~250	250~750	750~1000
含水比 (%)	130	115	100
τ_{cr} (Pa)	24.6	115	258
μ_b (Pa·s)	9.7	14.2	17.4
G (Pa)	124	621	1450
底泥層厚 (cm)	25	40	30

鋼管杭では流速測定しか行われていないため、流速の有義振幅 $U_{1/3}$ から有義波高 $H_{1/3}$ に換算する必要がある。この換算は次式により行った。

$$H_{1/3} = \frac{n_U T_{1/3}}{\pi} \frac{\sinh h}{\cosh z_0} U_{1/3} \dots \dots \dots (10)$$

ここで n_U は流速振幅から有義波高を求める際の補正係数である。水圧振幅から有義波高を求めるための補正係数 n_P は kh の関数であることを小舟ら (1988) が報告しており、 n_U も n_P とほぼ同じ値になるはずである。観測塔と鋼管杭での平均水深をそれぞれ 7.5 m, 5.2 m, 波の周期を 4 s として小舟らのシミュレーション計算結果を用いると、観測塔、鋼管杭での n_U はそれぞれ約 1.6, 1.4 となる。また $T_{1/3}$ は有義波周期で、波高計で 2 時間間隔で測定された結果を 20 分ごとに比例配分した値を用いた。 z_0 は流速計の設置高さで 0.3 m である。

(3) 計算結果

流れを考慮しない場合 (細い実線) と考慮した場合 (細い破線) の C 点 (鋼管杭に対応する) での推定波高と観測波高の比較を 図-9 に示す。まず観測塔での波高計による実測波高と流速振幅からの換算波高を比べるとばらつきがかなり大きいがまずまず相関は高いといえる。したがって C 点での実測波高として鋼管杭での流速振幅からの換算値もある程度信頼できると考えられる。なお A 点での波高は観測塔で波高計によって観測された結果を用いて計算を行っている。

波高が大きくなる 0 時から 12 時の間で大きな波高減衰が計算されているが、観測結果もほぼ同様にこの間では波高減衰量が大きく、この計算法によってある程度推定できることがわかる。0 時前と 6 時過ぎの波高はともに 1 m 程度であるが、0 時前の波高減衰は小さく、6 時過ぎには大きくなっている。これは満潮が 0 時過ぎで干潮が 7 時頃とこの間に水深が 2.5 m 程度減少しているた

めである。また流れを考慮した場合とそうでない場合の計算値の違いは小さく波高減衰に及ぼす潮流の影響はそれほど大きくないと判断される。

5. ま と め

波と底泥の相互の干渉の計算法として著者らが用いていた粘性流体多層モデルを柴山らと同様に弾性の効果を取り入れて改良した。この計算モデルを基に熊本港付近海域での波高減衰の推定に適用したが、高波浪時にはこの計算モデルによって波高減衰の状況が再現できることが確認された。

なお底泥の流動限界についての実験では姫野敬行君 (元学部 4 年生) の協力に負うところが大きい。本研究で利用した現地データは、運輸省第四港湾建設局熊本港工事事務所によって取得されたものであり、使用を許可されたご好意に深甚なる謝意を表する。また本研究は文部省科学研究費、奨励研究 (A) (課題 No. 01750514) の補助を受けて実施された。ここに記して各位に謝意を表する。

参 考 文 献

- 井島武士 (1968): 波浪の数値予測, 水工学に関する夏期研修会講義集 A, 63-02, pp. 1~30.
- 金谷 守 (1985): 海底土質地盤の特性と波力に対する安定性評価に関する現状, 電中研報告, No. 385001, pp. 1~61.
- 小坪清真 (1973): 土木振動学, 森北出版, 371 p.
- 小舟浩治・合田良実・成田 明・佐々木・弘・森田行司 (1988): 現地観測における水圧波高から表面波への換算手法について, 港研報告, 27 巻, 3 号, pp. 161~183.
- 榊山 勉・E. W. Biiker (1988): 波による海底粘性土の質量輸送速度, 電中研報告, No. U88043, pp. 1~37.
- 柴山知也・青木 徹・佐藤慎司 (1989): 粘弾性体モデルによる底泥移動量の評価法, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 334~338.
- 鶴谷広一・中野 晋・鷹濱 潤 (1986): 回転粘度計による底泥の流動特性の検討, 港研資料, 556 号, pp. 1~29.
- 鶴谷広一 (1989): シルテーションによる港湾埋没の予測手法, 平成元年度港湾技術講演会講演集, pp. 101~153.
- 富田幸雄 (1975): レオロジー, コロナ社, pp. 361~363.
- 中野 晋・鶴谷広一・鷹濱 潤 (1987): 波と底泥の相互干渉による波高減衰と底泥の流動, 港研報告, 26 巻, 2 号, pp. 171~212.
- 中野 晋・伊東信幸・藤平依彦 (1989): 流れの中での波と底泥の相互干渉, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 339~343.
- Dalrymple, A. R. and P. L. F. Liu (1978): Waves over soft muds: a two-layer fluid model, J. Physical Oceanography, Vol. 8, pp. 1121~1131.
- Hsiao, S. V. and O. H. Shemdin (1980): Interaction of ocean waves with a soft bottom, Jour. of Physical oceanography, Vol. 10, pp. 605~610.
- Macpherson, H. (1980): The attenuation of water waves over a non-rigid bed, Jour. of Fluid Mech., Vol. 97, part 4, pp. 721~742.
- Yamamoto, T., H. L. K. H. Sellmeijer and E. V. Hijum (1978): On the response of a poro-elastic bed to water waves, J. Fluid Mech., Vol. 87, part 1, pp. 193~206.

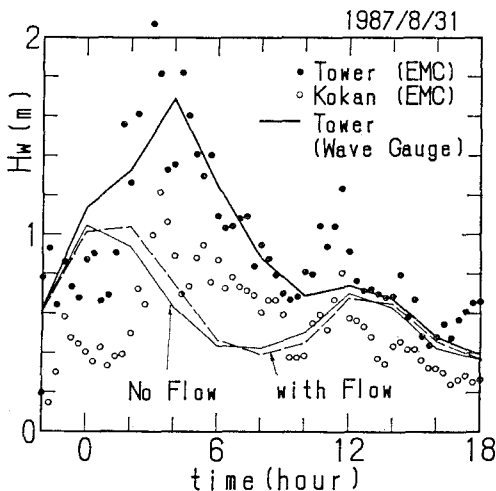


図-9 波高減衰の計算値と観測値の比較