

長周期性波動下における底面摩擦の特性

田 中 仁*・Ahmad Sana**

1. 序 論

波動境界層における抵抗則に関しては現在までに数多くの研究がなされている。移動床での抵抗則などいまだ十分には明らかにされていない点も残されているが、実用上はほぼ問題の無い段階に達していると言って良いであろう。

通常、波動境界層厚は水深に比べて非常に薄く、従来行われた研究はこのような場を対象としたものである。一方、波浪の周期が長い場合には境界層が水表面近くまでも成長し、上記の仮定が破綻することもある。このような流体運動はむしろ定常流に近いため、津波・高潮・潮流などの長波性の波動の場合には、マンシングの粗度係数に代表される定常流の抵抗則が用いられてきた。しかし、現在のところこの様な二種の抵抗則を使い分けるための客観的な基準は存在せず、漠然とした判断基準により抵抗則の選択がなされているのが実態である。また、場合によっては、対象とする領域内で片方の抵抗則からもう一方の抵抗則への遷移的な状態も有り得るが、その様な場での抵抗の評価をどのように行うべきかも明らかでない。

そこで、本研究ではまず著者の一人により導かれた長周期波から短周期波までの全ての波動を包含する境界層理論 (Tanaka and Shuto, 1994; 田中, 1995) をもとに、遷移域も含めた簡便な摩擦係数算定手法を検討した。また、極端に異なる周期を有する特徴的な二つの波動場を対象として、同手法による底面剪断力算定結果と従来の手法によるそれとの比較を行い、従来の算定法の問題点を定量的に検討した。

なお、同種の研究としては、円管内振動流を対象とした理論的研究 (澤本・日野, 1977) が行われており、準定常な抵抗則が成立する限界を明らかにしているが、対象は層流境界層であった。また、円管内乱流振動流を対象とした実験的な検討が近江ら (1981) により行われているが、明瞭な結論を得るほど十分な実験はなされていない。また、海岸工学上重要な粗面乱流に関する検討が

行われていない。

2. 理 論

本論文では、 $\delta \ll z_h$ (δ : 波動境界層, z_h : 水深) を満たす波動下での抵抗則を単に「波動抵抗則」と呼ぶことにする。

簡便な渦動粘性係数係数モデルをもとに、通常の短周期の波浪から長周期波浪までに適用できる抵抗則が得られる (Tanaka and Shuto, 1994; 田中, 1995)。解は複素ベッセル関数により表現される。

粗面での波動抵抗則及び定常流抵抗則は、それぞれ無次元数 $U_0/(\sigma z_0)$ 及び z_h/z_0 に支配されることが知られている。ここで、 z_0 : 粗度長さ、 U_0 : 波動による断面平均流速の振幅、 σ : 角振動数である。Tanaka らの解は図-1の実線で示す様にこれら二つのパラメータに支配されている。この解から得られる二つの極限、すなわち、いわゆる波動境界層の摩擦係数と準定常的な長周期波の境界層での摩擦係数とをそれぞれ f_w 及び f_c とし、図-1にはこれらも示した。 $z_h/z_0 = \text{const.}$ の曲線に注目すると、横軸の値の増加に伴い波動抵抗則領域から遷移域を経て定常流抵抗則域に移る。この遷移は、水深・粗度比が大きいか小さい $U_0/(\sigma z_0)$ の値で生じる。

同図より、二つの抵抗則を使い分けるための判定条件はやはり図中の二つの無次元数により表示されることがわかる。そこで、定常流の摩擦係数 f_c を使用した時に 10% の誤差が生じる限界を理論的に求め、その近似式を

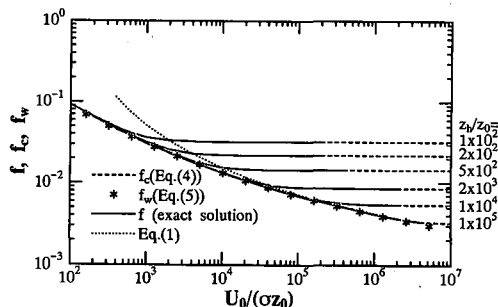


図-1 摩擦係数

* 正会員 工 博 東北大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 M.Eng. 東北大学助手 工学部土木工学科

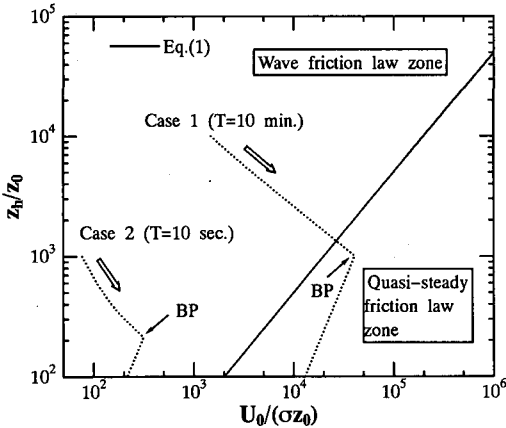


図-2 抵抗則の判定条件

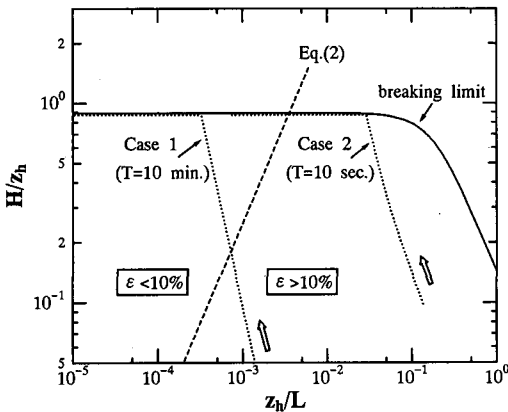


図-3 式(2)と碎波指標

図-2に実線で示した。この直線より上では波動抵抗則を、これより下では定常流の抵抗則を用いなければならない。判定条件は

$$\frac{z_h}{z_0} = 0.05 \frac{U_0}{\sigma z_0} \quad (1)$$

と書くことが出来る。さらに、線形長波理論を使用して上式を変形し、波高 H 及び波長 L を用いて書き換えれば次式を得る。

$$\frac{H}{z_h} = 250 \frac{z_h}{L} \quad (2)$$

式(2)を碎波指標とともに図-3に示した。誤差 ε が10%以下になる領域はきわめて限られており、たとえ長波でも ε が10%以上になっている領域が広く存在することに注意しなければならない。なお、図-1、図-2、図-3中の点線については後述する。

さて、式(1)中の U_0/σ は水粒子の移動振幅 a_m に等しく、また粗面での波動境界層厚 δ は a_m とほぼ比例関係にある(Sana and Tanaka, 1995)ことから、水深と波動境界層厚の比により使用すべき抵抗則の判定が行えることを示している。水深に比べ境界層厚が薄いときには波動抵抗則を用いることが出来、逆に境界層が水表面まで十分に発達した場合は準定常の状態にあると言える。

さて、Tanaka and Shuto (1994)による抵抗則は複素特殊関数で表され、また繰り返し計算を要するため、実用的ではない。ただし、図-1に示された摩擦係数図によれば、近似的には次式により算定を行えばよいことがわかる。

$$f = \max \{f_c, f_w\} \quad (3)$$

ここで、 f_c :定常流による摩擦係数、 f_w :波動の摩擦係数である。 f_c については式(4)が厳密解であり、また f_w については式(5)の様な近似式が提案されている(田中, 1990)ので、いずれも複雑な計算を必要としない。

$$f_c = 2 \left\{ \frac{\kappa \left(\frac{z_h}{z_0} - 1 \right)}{2 - 1.5 \frac{z_h}{z_0} + \frac{z_h}{z_0} \log \left(\frac{z_h}{z_0} \right) - 0.5 \frac{z_0}{z_h}} \right\}^2 \quad (4)$$

$$f_w = \exp \left\{ -7.53 + 8.07 \left(\frac{U_0}{\sigma z_0} \right)^{-0.100} \right\} \quad (5)$$

ここで、 κ :カルマン定数(=0.4)である。よって、二つの抵抗則によって摩擦係数を求め、このうちの大きい方を取れば良い。これは図-1に見られる滑らかな遷移特性を、直線 f_c と曲線 f_w の組み合わせにより近似することに対応する。

3. 計算例

上記の理論をもとに、長周期波浪(Case 1)と短周期波浪(Case 2)の2種類の波浪に対して、浅水変形に伴う底面せん断応力の空間分布を調べた。

ここで、いずれのケースにおいても沖側水深100mの点で1mの波高を与え、周期はCase 1で10分、Case 2で10秒とした。海浜は1/100の1様勾配をもつものとし、浅水変形については首藤(1974)の式を用いた。合田(1975)の碎波指標により碎波点を求め、碎波後の波高は汀線まで直線的に減少するものとした。粗度については一律 $z_0=1$ cmとした。

二つのケースに対する計算結果をそれぞれ図-4及び図-5に示した。上図は波高変化と境界層厚と水深の比、下図はせん断力の計算結果である。境界層厚については幾つかの定義がある(例えば、Nielsen, 1992)が、ここ

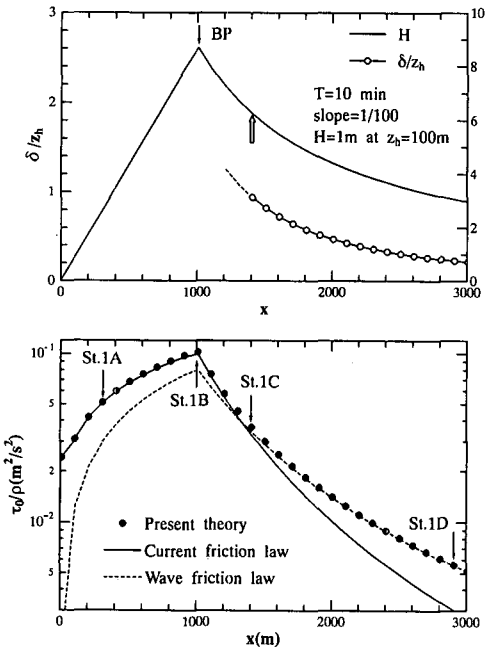


図-4 せん断力の分布 (Case 1)

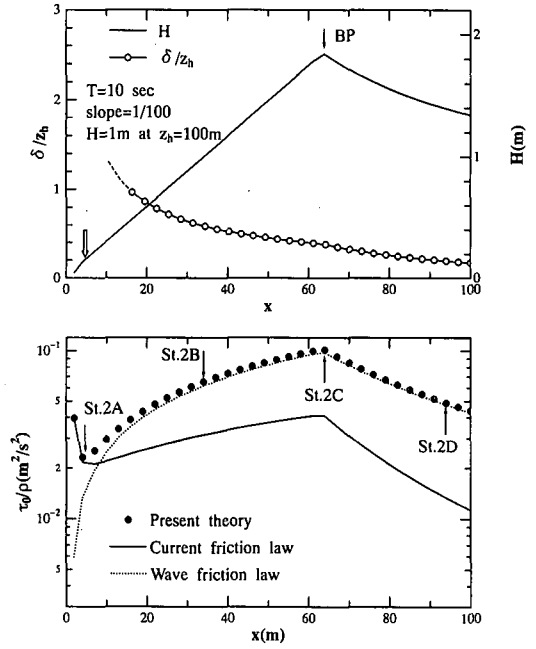


図-5 せん断力の分布 (Case 2)

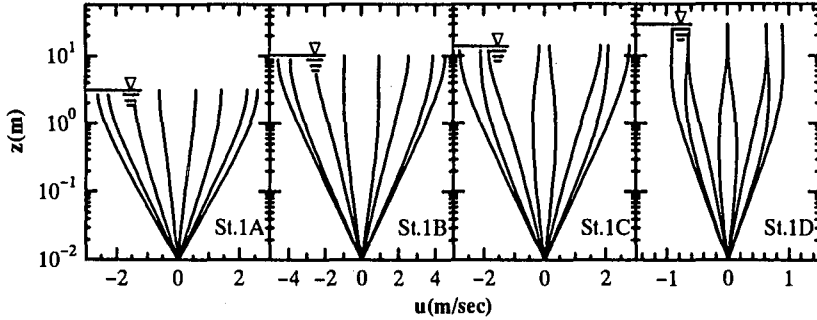


図-6 流速分布 (Case 1)

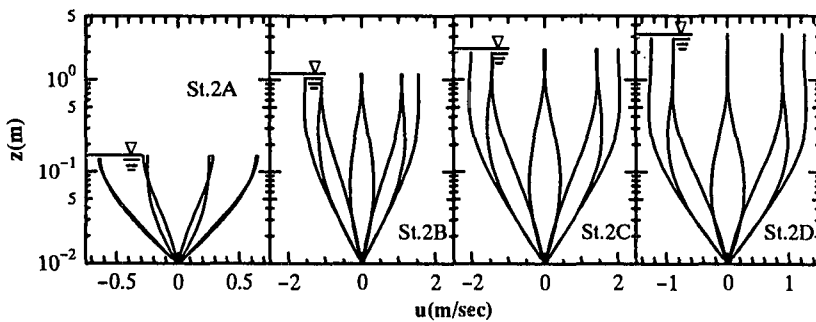


図-7 流速分布 (Case 2)

では Jensen et al. (1989) の定義法に基づいた著者らの算定式 (Sana and Tanaka, 1995) を用いた。Jensen et al. は流速の最大値が現れる高さを境界層厚さとしている。また、図-6, 7 は二つのケースについて、図-4, 5 に示した St. 1A, St. 1B などの位置での速度分布の位相変化を $\pi/4$ 毎に示したものである。

Case 1 では、 $x=1400$ m より沖側では波動の抵抗則による算定結果と一致しているが、ここより岸側では定常流の抵抗則に遷移している。図-6 の流速分布を見ると、遷移点より沖側では波動境界層に特有な位相のズレや overshoot 現象が見られる。これに対して、これより岸側では各位相で対数則に従う速度分布となっており、流速の先走りや overshoot が見られない。

一方、図-4 上図の δ/z_n の変化を見ると、やはり $x=1400$ m において境界層はほぼ水表面にまで発達している。この位置は図-4 下図の抵抗則の遷移位置と良く一致していることがわかる。

このように、Case 1 では周期 10 分の長周期波といえども、沖側では定常流の抵抗則を用いることは出来ないことが判る。これは、長波、深海波などの波の分類は(水深)/(波長)比によるのに対し、抵抗則の適用分類は(水深)/(境界層厚)比によっており、これら二つの分類条件が同一ではないことによる。

なお、図-4, 図-5 の下段に示した厳密解の代わりに式 (3) によりせん断応力の評価を行った場合には、同図の実線・鎖線の交点をはさんで右では鎖線を、左では実線を使用することに対応する。この方法でも良好な算定結果となることがわかる。

次に、周期 10 秒の Case 2 (図-5) では、ほぼ全域において波の摩擦係数が良い値を与えるが、汀線近傍では定常流の抵抗則に遷移している。ただし、定常流抵抗則は z_n/z_0 の関数であるため、水深が浅くなると値が発散することとなる点に注意しなければならない。これに対して波動抵抗則を用いた場合には、波高の減少に対応してせん断応力もゼロに近づくのでこの点では都合がよい。図-7 に示した速度分布の特徴は図-6 と同様であり、ほぼ全域で波動境界層特有の速度分布を示している。

図-4, 5 に示した $\uparrow$ 印は式 (1) による地点を表している。二種類の抵抗則の間での遷移限界を良好に予測していることが窺える。

図-1, 図-2, 図-3 における点線は以上に示した両ケースでの浅水変形に伴うパラメーターの変化の過程を示したものである。

最後に、本研究が基礎とする乱流理論の精度について言及しておく。ここで用いたモデルにおいては渦動粘性係数の空間分布・時間変化に関してかなり単純化されている。同モデルはもともと定常流の知見を基にしており、

従って、 f_c については従来の成果と矛盾が無い。また、波動抵抗則についても良好な結果を与えることが報告されている (田中, 1990) ことから、二つの極限での精度は問題ない。ただし、この間の遷移的な振る舞いについては、今後より高精度の乱流モデルや実験等を通じて確認を行う必要がある。

4. 結 語

本研究では、長周期性の波動下における底面せん断応力の特性に関する検討を行った。ここで得られた主要な結論は以下のとおりである。

(1) たとえ長波の場合でも、必ずしも定常流の抵抗則が適用できるわけではないことが判った。これは、波の分類に用いられる無次元数と抵抗則の分類に用いられるそれとが異なることを考えれば、当然のことであると言える。

(2) 実用上は定常流の摩擦係数 f_c と波動摩擦係数 f_w の二つを用いてせん断応力を計算し、その内の大きい方を取れば良い近似解が得られる。これは、図-1 に示した乱流理論で予測される滑らかな遷移過程を無視したことに対応する。

(3) 周期が大きく異なる特徴的な二つのケースについて、底面せん断応力の岸沖方向の空間変化を計算し、境界層・水深比の空間変化と合わせた検討により、その変化特性を調べた。

(4) 今後、さらに他のモデルや実験を通じた検討を行う必要がある。

謝辞：本研究を行うに際し、東北大学工学部災害制御研究センター首藤伸夫教授より貴重な助言を頂いた。また、本論文の公表に際して、小川基金の補助を得た。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 近江宗一・井口 学・浦畑育生 (1981): 円管内振動流れの流動形態と摩擦損失, 日本機械学会論文集 (B 編), 47 巻, 420 号, pp. 1502-1510.
- 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻, 第 3 号, pp. 59-106.
- 澤本正樹・日野幹雄 (1977): 円管内振動流の滑面摩擦抵抗則, 土木学会論文集, 第 258 号, pp. 45-53.
- 首藤伸夫 (1974): 非線形長波の変形, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp. 57-63.
- 田中 仁 (1990): 波・流れ共存場における底面摩擦係数の陽形式近似式, 土木学会論文集, 第 417 号/II-13, pp. 285-288.
- 田中 仁 (1995): 波動下における抵抗則の準定常性に関する理論的研究, 水工学論文集, 第 39 巻, pp. 857-862.
- Jensen, B. L., B. M. Sumer and J. Fredsøe (1989): Turbulent oscillatory boundary layers at high Reynolds numbers, J. Fluid Mech., Vol. 206, pp. 265-297.
- Nielsen, P. (1992): Coastal Bottom Boundary Layer and Sedi-

- ment Transport, World Scientific, 324 pp.
- Sana, A. and H. Tanaka (1995): Full-range equation for wave boundary layer thickness, Proc. Advances in Hydro-Science and Engineering, pp. 1487-1494.
- Tanaka, H. and N. Shuto (1994): Quasi-steady property of bottom friction in a wave boundary layer, Proc. Int. Symp.: Waves—Physical and Numerical Modelling, pp. 1570-1579.
-