

加速度効果を加味したクノイド波動下底面せん断力算定手法とその応用

スントヨ*・田中 仁**

これまで正弦波を対象として、底面せん断力特性などに関する多くの研究が行われてきた。現実の波浪は浅海域に伝搬するにつれ非線形性を増し、従来の正弦波とは異なるせん断力特性を示すものと考えられるが、このような特性を扱った研究例は少ない。このため、波動モデルにより得られる流速場の情報から砂移動量に結び付ける際の底面せん断力評価の精度が明らかになっていない。本研究では、クノイド波の下での底面せん断力に関する実験的検討を行い、加速度の効果を加味した新たな底面せん断力の計算法を提案した。また、同手法を漂砂量定式化の応用し、旧来の手法による計算値との差違を検討した。

1. はじめに

波動下における漂砂量は底面摩擦力と密接な関係を有している。このため、波動下における底面摩擦に関する多くの研究がなされてきた。しかし、その多くはこれまで正弦波を対象として行われてきた（たとえば、Jonsson, 1966）。しかし、現実の波浪は浅海域に伝搬するにつれ非線形性が強まり、正弦波からのずれが顕著になる。これに伴い加速度の効果が顕在化し、従来の正弦波とは異なるせん断力特性・漂砂特性を示すものと予想される。しかし、このような底面摩擦・漂砂特性を扱った研究例はきわめて少ない。このため、ブーシネスクモデルを代表とする近年発展のめざましい様々な波動モデルにより得られる流体場の情報から、底面せん断力評価・漂砂量算定を介して地形変化に結びつける過程の精度が明らかになっていない。

このような背景から、これまで著者らは碎波帯内の波浪を模擬する前傾化した波動を取り上げ、底面摩擦に関する研究を実施してきた。Suntoyo ら (2003) は実用に供することが容易な簡便な底面せん断力算定式として、主流速の二乗に比例すると仮定する算定法と、Nielsen (2002) による手法の二つの方法を採用し、実験値との比較によりその精度を検証した。その結果、いずれの方法においても、波形が前傾化するにつれて峰位相における算定精度が低下することが分かっている。その後、Suntoyo・田中 (2004) は Nielsen (2002) の底面せん断力手法を参考に、速度の二乗に比例した項に加え加速度の効果を加味した底面せん断力を提案し、式に含まれる係数を室内実験により定めた。また、実験値との比較により、その精度を評価した。

本研究では、浅海非線形波としてクノイド波を取り上げ、底面せん断力の算定手法を新たに提案し、この手法

を砂移動量の定式化に応用する。

2. 実験手法

底面せん断力に関する実験では、水に比べて扱いが容易である空気を用いて行った。実験装置は任意波形発生装置と風洞部からなる。流速波形としては、第一次近似のクノイド波理論による流速波形を与え、これを振動流発生装置に入力している（図-1）。風洞中央部において LDV を用いて、鉛直方向に 20ヶ所で測定し、鉛直分布を得る。データは 1/100 s 間隔で AD 変換を行い、50 波の平均値から平均流速を求めた。実験方法の詳細に関しては、スントヨら (2003)、Suntoyo・Tanaka (2003)、Suntoyo・田中 (2004) を参照されたい。

実験で得られた流速の鉛直分布から、対数分布則を用いて底面せん断力を求めた。また、平均流速分布、乱れ強度分布に関する考察も行った。

実験は、表-1 に示すケースについて実施した。ここで、 T : 周期、 U_c : 波頂での流速最大値、 k_s : 粗度長さである。それ以外の記号の定義は図-2 に図示した。

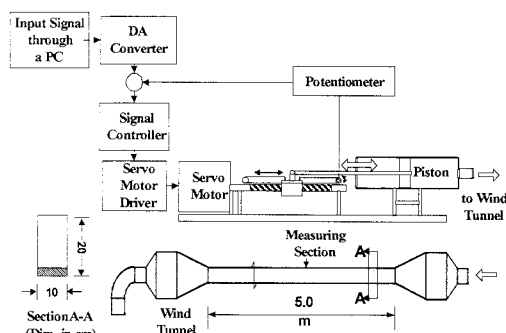


図-1 実験装置の概要

表-1 実験条件

Case	T (s)	T_c (s)	T_t (s)	U_c (cm/s)	$U_c/(\hat{u})$	$U_c/(\sigma k_s)$	$U_c^2/(\nu \sigma)$
1	3	1.34	1.66	360	0.6	26.8	4.27×10^5

* 学生会員 MEng. 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻

** フェロー 工博 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻

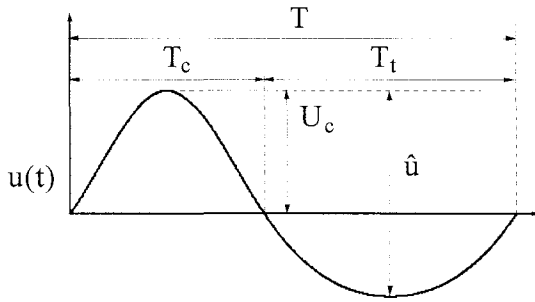


図-2 クノイド波の流速波形

3. 平均流速分布・乱れ強度分布

図-3 には実験で得られた平均流速分布を示した。図中の記号は、上段流速波形の各位相に対応している。図中の実線は層流解を表している。峰位相、谷位相での流速分布を見ると、実験値は層流解に比べて鉛直方向に一様化した分布となっている。また、実験では overshoot の程度が微少である。

図-4 は波の峰位相、谷位相のそれぞれに対して、境界層内流速の位相のずれを示したものである。ここでは、流速ピークが現れる位相をもとに位相差を定義している。谷位相での位相差はこれまでに報告された既往実験結果に近い値であるが、谷位相でのそれははるかに大きな値を示している。底面近くでの流速波形の一例を図-3 上段に示した。谷位相の初期に、峰位相での位相の進みの

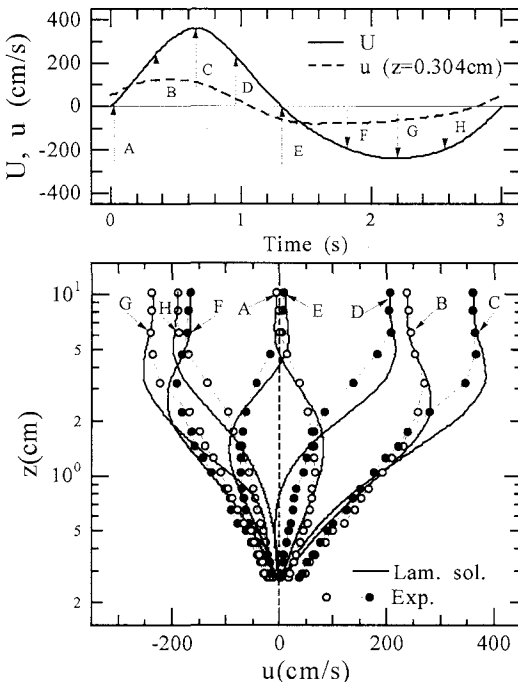


図-3 平均流速分布

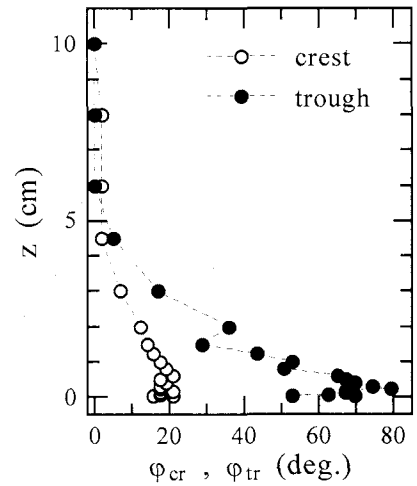


図-4 位相差

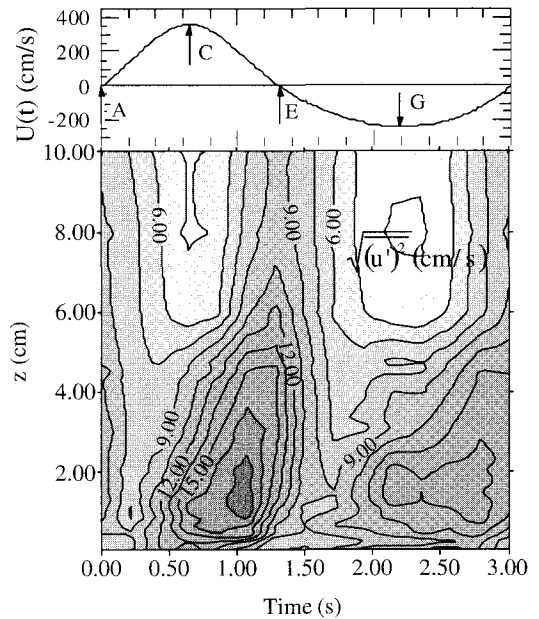


図-5 乱れ強度分布

影響を受けてせん断力ピークが現れる。このために、図-4 において谷の位相差は大きな値を持つ。このように、谷位相でのせん断力最大値は峰位相での流速変動の影響を強く受けており、正弦波とは大きく異なる振る舞いを示す。

図-5 は乱れ強度の時空間分布を示したものである。基本的な特徴は、作業流体に水を用いた灘岡ら (1994, 1996) の実験結果と良く類似している。主流の非対称性に応じて、乱れ強度も峰位相、谷位相の間で非対称な分布を示している。このような乱れ強度の非対称性は底質の浮遊特性にも大きな影響を及ぼしているものと考えら

れる。

4. 底面せん断力の算定法

(1) Method 1による結果

まず、佐藤・Kabiling (1993) と同様に、底面せん断力が主流速 $U(t)$ の二乗に比例すると仮定する手法を採用した。

Method 1:

$$\tau_0(t) = \frac{1}{2} \rho f_w U(t) |U(t)| \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 τ_0 : 底面せん断力、 t : 時間、 ρ : 流体密度であり、摩擦係数 f_w としては Tanaka・Thu (1994) による陽形式の算定式を用いた。

実験との比較を図-6 に示す。上段は主流速 $U(t)$ 、下段がせん断力である。この手法では、加速期におけるせん断力の急激な立ち上がりを表現していない。

(2) Method 2による結果

以上の結果を受け、新たなせん断力（摩擦速度）算定法として、

Method 2:

$$U^*(t) = \sqrt{\frac{f_w}{2}} \left\{ U \left(t + \frac{\varphi}{\omega} \right) + \frac{a_c}{\omega} \frac{\partial U(t)}{\partial t} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

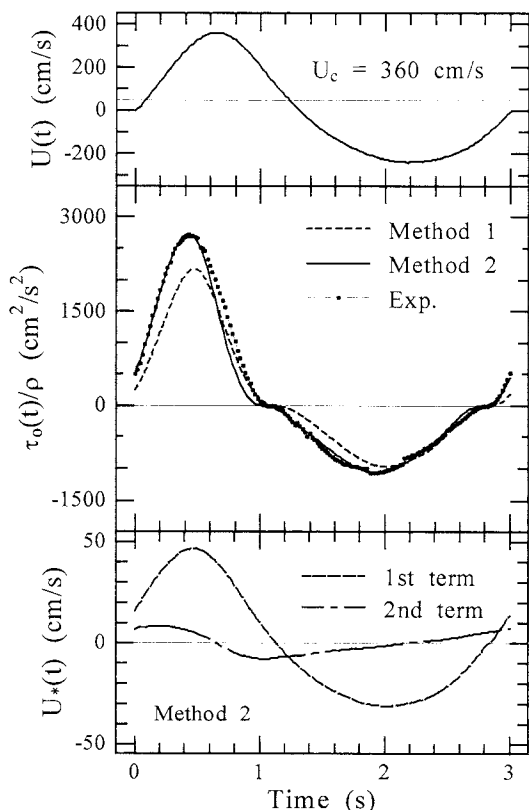


図-6 式 (1)、式 (2) によるせん断力

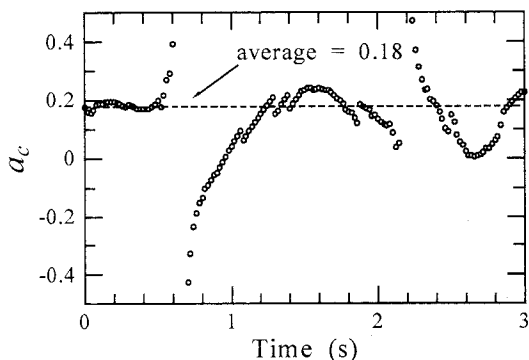


図-7 係数 a_c の計算結果

を提案する。ここで、 $U^*(t)$: 摩擦速度、 φ : 位相差、 ω : 角振動数である。右辺第二項は加速度の効果を表現し、 a_c は実験的に定める係数である。なお、Nielsen (2002) も同様に加速度を加味した底面せん断力算定法を提案しているが、すでにセントヨラ (2003) が報告したように、Nielsen (2002) の手法による計算値と実験値との間には大きな差違が認められた。

式 (2) では Nielsen (2002) の式形を踏襲し、実験より係数 a_c を波の非対称度の関数として定式化することとした。まず、実験から得られた摩擦速度をもとに、式 (2) から係数 a_c の逆算を行った。ここで、位相差 φ についても Tanaka・Thu (1994) の式を用いた。ただし、図-2 に示すようなピークの急激な立ち上がりを加味するために、ゼロアップクロスから波峰のピークまでの時間の 4 倍を周期と見なし、Tanaka・Thu (1994) の正弦波に対する算定式を適用した。

このようにして逆算された各位相での係数 a_c の変化の例を図-7 に示す。一周内で変動があるものの、比較的安定した値を示す位相区間において平均を施した結果、 $a_c = 0.18$ との結果を得た。この値は、先に著者らが前傾化した波動に対して得た結果 (Suntoyo・田中, 2004) と一致している。

図-6 中段実線は以上の手法による計算結果と実験との比較である。なお、最上段は境界層外縁での速度の変化を表す。先の手法に比べ精度が向上している。最下段は式 (2) 右辺の第一項、第二項の位相変化を示す。第二項の加速度に起因する項が有意な大きさを有していることが確認される。

5. 漂砂量定式化への応用

前報 (Suntoyo・田中, 2004) においては、前傾化した波動を対象に実施されたシートフロー漂砂量実験 (高地ら, 2002) に対し、著者らの提案した底面せん断力算定式を応用し、下記の漂砂量定式化を行った。

まず、シートフロー漂砂量の瞬時値 $q(t)$ をシールズ数 $\tau^*(t)$ の関数として次式のように表現する。

$$\Phi(t) = \frac{q(t)}{\sqrt{(\rho_s/\rho - 1)gd^3}}$$

$$= A \operatorname{sign}\{\tau^*(t)\} |\tau^*(t)|^{0.5} \{|\tau^*(t)| - \tau_{cr}^*\} \cdots (4)$$

ここで、 ρ_s : 底質密度、 g : 重力加速度、 d : 底質粒径、 A : 係数、 sign は括弧内の関数の符号を意味し、また、 τ_{cr}^* は移動限界シールズ数であり、著者の一人により提案されている次式 (Tanaka・To, 1995) を用いて算定した。

$$\tau_{cr}^* = 0.055 \{1 - \exp(-0.09 S_*^{0.58})\} + 0.09 S_*^{-0.72} \cdots (5)$$

ここで、 S_* は無次元化された粒径であり、次式により定義される。

$$S_* = \frac{\sqrt{(\rho_s/\rho - 1)gd^3}}{4\nu} \cdots (6)$$

式 (3) により、一周内で平均した net の漂砂量は次式である。

$$\Phi = 360F \cdots (7)$$

ここで、

$$F = \frac{1}{T} \int_0^T \operatorname{sign}\{\tau^*(t)\} |\tau^*(t)|^{0.5} \{|\tau^*(t)| - \tau_{cr}^*\} dt \cdots (8)$$

と表され、また、式 (8) の積分は $|\tau^*(t)| > \tau_{cr}^*$ の位相において行うものとし、 $|\tau^*(t)| < \tau_{cr}^*$ の位相に関しては被積分関数をゼロとする。

図-8 は式 (3) に基づき岸向きの、沖向きの漂砂量 (添え字 on, off) を別々に算定し、さらに両者の差により正味 (添え字 net) の漂砂量を計算したものである。ここで、流速波形は第一次近似クノイド波理論による値を用い、底面せん断力を式 (2) により評価した。 U_c の増加に伴い、岸向き・沖向きの間でその差が顕著となり、これに伴い net の漂砂量が増加する。同様に図-9 は粒径を変化させた時の漂砂量の変化を示している。

図-10 では、加速度効果を含まない Method 1 による算定結果を横軸に示した。Method 1 では、Method 2 による算定に比べて、漂砂量を30%ほど過小評価することが明らかになった。

以上のように、浅海域においてはせん断力、漂砂移動に対して加速度の効果が無視できず、正弦波と異なる振る舞いを示す。これを適切に加味することにより、精度の高い海浜変形予測が可能となる。

6. おわりに

本研究においては、クノイド波動下における底面せん断力特性に関して検討を行った。ここで得られた主要な結論は以下のとおりである。

(1) 簡便な底面せん断力算定式として、加速度の効果をを含む式 (2) を提案し、式中の定数を実験的に定めた。

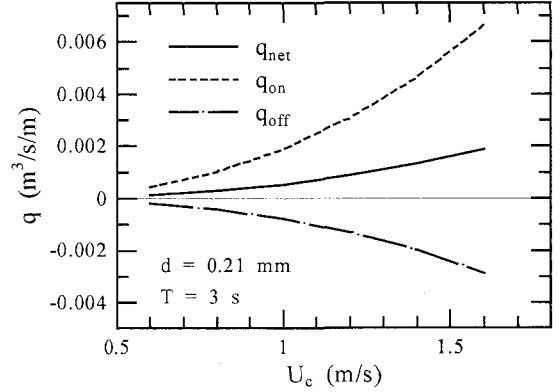


図-8 流速変化に伴う漂砂量の変化

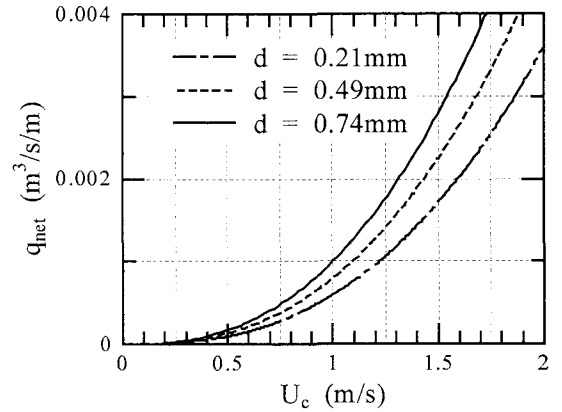


図-9 流速・粒径の変化に伴う漂砂量の変化

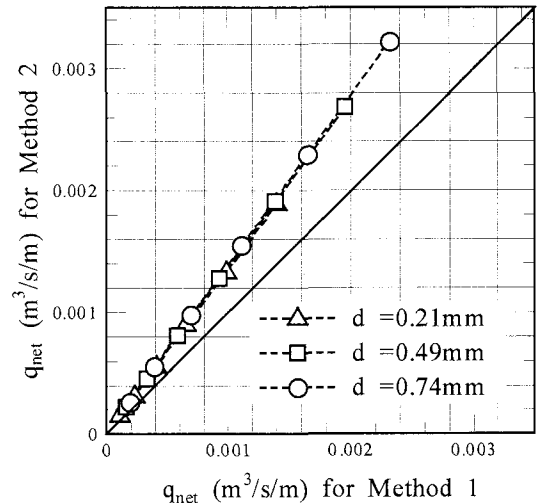


図-10 二つの手法による漂砂量の相違

その値は、著者らが以前に前傾化した波動に対して得たものと同じ値であった。

(2) (1)で得られたせん断力算定式を、先に提案した漂砂量実験式に適用し、計算される漂砂量の特性を検討した。

謝辞：本研究で使用した実験データの取得に当たっては、東北大学大学院・山路弘人助手の助力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 高地 潤・佐藤慎司・渡辺 晃(2002)：前傾化した波と流れによるシートフロー漂砂量，海岸工学論文集，第49巻，pp. 426-430.
- 佐藤慎司・Kabiling, M.(1993)：Boussinesq 方程式を用いた波浪・海浜流・海浜変形の数値計算，海岸工学論文集，第40巻，pp. 386-390.
- Suntoyo・田中 仁・山路弘人(2003)：前傾化した波動下での底面せん断応力変動特性，海岸工学論文集，第50巻，pp. 66-70.
- Suntoyo・田中 仁(2004)：前傾化した波動下での底面せん断力算定手法の提案と漂砂量定式化への応用，海岸工学論文集，第51巻，pp. 396-400.
- 灘岡和夫・二瓶泰雄・八木 宏・野本康介(1996)：非対称振動流の乱流構造特性—特にレイノルズ数依存性について—，海岸工学論文集，第43巻，pp. 441-445.
- 灘岡和夫・八木 宏・二瓶泰雄・野本康介(1994)（非対称振動流の乱流構造特性について，海岸工学論文集，第41巻，pp. 141-145.
- Jonsson, I.G. (1966)：Wave boundary layers and friction factors, Proc. 10th ICCE, ASCE, pp. 127-148.
- Nielsen, P.(2002)：Shear stress and sediment transport calculations for swash zone modeling, Coastal Eng., Vol.45, pp. 53-60.
- Suntoyo, H. Tanaka and H. Yamaji (2003)：Acceleration effect on shear stress in turbulent boundary layer under skew waves, Annual Journal Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 47, pp. 811-816.
- Suntoyo and H. Tanaka (2003)：Investigation of turbulent bottom boundary layer under sawtooth waves, Proc. 5th International Summer Symposium, JSCE, pp. 185-188.
- Tanaka, H. and A. Thu. (1994)：Full-range equation of friction coefficient and phase difference in a wave-current boundary layer, Coastal Eng., Vol. 22, pp. 237-254.
- Tanaka, H. and D.V. To (1995)：Initial motion of sediment under waves and wave-current combined motions, Coastal Eng., Vol. 25, pp. 153-163.