

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1297 March 2015

サンドウェーブ地形の発達予測計算モデルの開発

中村 聡志

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. サンドウェーブ発達予測モデルの概要	4
2.1 サンドウェーブ地形上の流れ	5
2.2 サンドウェーブ地形上の漂砂	6
3. 発達予測モデルの計算例	6
4. 発達予測モデルのパラメタ設定	7
4.1 パラメタ設定のための現地調査データ	7
4.2 予測式中のパラメタの設定	8
5. まとめ	10
6. あとがき	10
参考文献	10
記号表	11
付録A	12
付録B	14

Development of Analytical Model for Sand Wave Prediction

Satoshi NAKAMURA*

Synopsis

In the Bisan-seto strait channel, the responsible area of the development and maintenance was expanded to 12 times in December 2009. In the channel and the surrounded area, there are many sand waves which are consecutive sand bank of several meters of wave height and tens of meters of wave length. The sand waves cause the channel trouble by the water depth becoming shallow locally. In this study, the prediction model of sand wave growth is developed in the given external condition of the water depth, the current velocity and the bottom grain size.

The base of the sand wave model is an analytical technique for stability theory of the dune. As the condition of promoting growth of sand waves, the spatial distribution of sand transport rate caused by the vortex at the top is set. As the conditions of limiting growth of sand waves, underwater angle of repose of sediments and continuity of sediment movement at the trough are set. As a result, the expressions of the displacement velocity and the growth rate of sand waves are obtained. Moreover, referring to the existing investigation results of the displacement velocity, wave height and wavelength of sand waves, the parameter included in the expressions are decided.

Key Words: Bisan strait, sand wave, growth prediction, channel maintenance

* Research Director, Coastal and Estuarine Environment Field
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5045 Fax : +81-46-844-1274 e-mail:nakamura_s@pari.go.jp

サンドウェーブ地形の発達予測計算モデルの開発

中村 聡志*

要 旨

備讃瀬戸航路では、平成 21 年 12 月にその開発保全航路範囲が拡大され、維持管理の責任を負う面積は 12 倍に広がった。航路とその周辺では、多数存在するサンドウェーブ（波高数 m 波長数十 m 程度の連続した砂堆）によって、航路水深が局所的に浅くなることによる航行障害が生じており、その対応および航路障害を未然に防ぐため、計画的な維持管理を行うことが求められている。そこで、本研究では、地形形状や潮流速を外力条件として、簡易にサンドウェーブの発達を予測できる計算モデルを開発した。

サンドウェーブの発達予測モデルの基礎には、河床波の安定理論として古くから用いられている Kennedy(1963)の河川流と河床波との相互作用をポテンシャル流理論と流砂の連続式で記述した解析的手法を用いている。サンドウェーブの発達予測モデルへの適用に際して、海底砂の水中安息角による制限条件、および、サンドウェーブの谷における砂礫移動の連続性による制限条件を加えた。また、サンドウェーブの勾配に比例する漂砂量を加えることによって、渦によるサンドウェーブ地形前面での砂礫の巻上げ、および、背面での堆積を考慮した、サンドウェーブ波高の時間発達式および移動速度の式を求めた。さらに、既存調査で得られているサンドウェーブの波高、波長、移動速度などの値をもとに、予測式に含まれるパラメータを決定した。

キーワード：備讃瀬戸、サンドウェーブ、発達予測、航路維持管理

* 沿岸環境研究領域 上席研究官
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5045 Fax：046-844-1274 e-mail:nakamura_s@pari.go.jp

1. まえがき

備讃瀬戸航路では、平成21年12月にその開発保全航路範囲が拡大され、維持管理の責任を負う面積はこれまでの12倍に広がった。開発保全航路とその周辺の海底には、波高数m、波長数十mの大きさの砂堆が連続するサンドウェーブが多数存在する。このサンドウェーブによって、航路水深が局所的に浅くなり船舶の航行に障害が生じている。航路障害を除去するため、あるいは、航路障害を未然に防ぐためにサンドウェーブの発達予測を行い、維持浚渫等の対策を適時に行うこと、および、計画的な維持管理を計画することが求められている。サンドウェーブは、広域の地形形状が海釜-砂州-海釜と水深および海峡幅が変化する浅部周辺に存在し、潮流流による砂礫の移動によって、その形状は成長しつつ移動する。本研究では、地形形状や底質粒径、潮流速を外力として与え、簡易に計算できるサンドウェーブの発達予測モデルの開発を目的とする。

瀬戸内海では、潮流によって移動堆積する漂砂の調査が行われてきた。赤城ら(1965)は、備讃瀬戸で行われた漂砂調査を取りまとめ、東西方向に交互生じる潮流によって毎潮時大きな砂礫の移動が東西方向に生じていること、年間の平均的な砂礫の移動方向が四国側から北に向かって生じていることなど漂砂の卓越方向を明らかにした。田中ら(1973)は、サンドウェーブの平均的な特性と水理量との関係について調査し、イノサキノツガイのサンドウェーブが水深に規定されたDunesに近いことを示した。また、小笹(1975)は、サンドウェーブは砂州に伴って現れること、潮流が砂州に乗り上げる際の渦および乱れと関係していることを示した。そのほか、備讃瀬戸航路では北航路と南北連絡航路にまたがる砂州上に生じるサンドウェーブ、および、南航路の法面に生じるサンドウェーブについて、発生メカニズム解明と形状発達予測手法の開発のための調査・検討が継続的に行われてきた。特に、イノサキノツガイと呼ばれる北航路と南北連絡航路にまたがる砂州上のサンドウェーブについては、航行障害を度々生じさせることから頻りに測量調査(1985, 86, 87, 88, 89, 90, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 99, 2001, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09) および潮流調査(1983, 94, 2001-05, 06, 10)が行われている。加藤ら(1997)は、イノサキノツガイの測量結果に基づく平均水深変化とサンドウェーブの頂高さ変化に関する近似予測式を求め、維持浚渫計画の検討を行った。伊福ら(2002)は、潮流と地形変化の計算を試みたが、海底の起伏が大きな場所でのサンドウェーブ地形の再現性は良くない。

本研究では、海底サンドウェーブの発達予測モデルの基礎に、河床波の安定理論として古くから用いられているKennedy(1963)の解析的手法を用いる。河床波安定理論は河床の初期擾乱が発達するか消滅するかを判定するものであるが、現地でのサンドウェーブの波長に比べ、その振幅が小さいことから、河床波安定理論の考え方がサンドウェーブの発達成長過程においても十分適用可能である。また、海底サンドウェーブモデルへの適用に際して、海底砂礫の水中安息角を超えて砂礫が堆積することはできないと考え、サンドウェーブ地形の勾配によってサンドウェーブ波高の発達が制限される条件を与え、また、サンドウェーブの谷においても砂礫の移動が連続的に生じる必要があることから、サンドウェーブの谷の流速値による波高の成長制限条件を加える。サンドウェーブ地形が発達するために必要な条件であるサンドウェーブの漂砂量側については海の砂礫移動では一般的に使われている流速の3乗に比例する漂砂量を用い、さらに、サンドウェーブ頂部に生じる渦による砂礫移動量の空間分布を考慮するためにサンドウェーブの勾配による漂砂量の増減パラメータを導入する。これらを加えたサンドウェーブ波高の時間発達式および移動速度の式を求め、交互に流速が反転する潮流流に対して計算を行い、これまでの調査で得られたサンドウェーブの波高、波長、移動速度などの観測結果を基に、時間発達式および移動速度式のパラメータを決定する。

2. サンドウェーブ発達予測モデルの概要

サンドウェーブは、図-1に示すように数kmの範囲で海釜-砂州-海釜と水深が変化する地形の浅部周辺に存在する。潮流流によって砂礫が移動することによって、砂州上に波型地形が生じ、その形状は成長しつつ移動する。

サンドウェーブの発達予測モデルの開発に当たって、河床に生じる波形模様(Dune)の安定性を予測するために用いられているKennedy(1963)のポテンシャル流理論と流砂の連続式を用いて流れと河床波との相互作用を解析した手法を用いる。この解析手法は河床波の安定理論として古くから用いられているものであり、河床地形の初期擾乱が大きく発達するか、あるいは、擾乱が減少して消滅するかを判定するのに使われている。海底のサンドウェーブ現象予測モデルの開発に際して、以下の修正を加え、サンドウェーブ波高の時間発達式および移動速度式を求める。

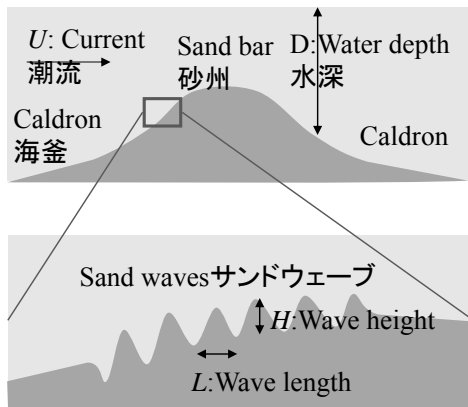


図-1 サンドウェーブの発生場所と空間スケール

a) 河床波の理論では、水深や流速に応じて流速の3から4乗に比例する漂砂量則を用いているが、海岸の砂の移動については一般的に流速の3乗に比例する漂砂量則が用いられていることから、本予測モデルの開発においても流速の3乗に比例する漂砂量則とする。また、砂の初期移動限界流速（砂粒が動き始める流速の閾値）については、一方向流速おける解析解を求める際には考慮せず。潮流交互流による数値計算を行う際に一定以上の流れのとき砂粒が移動するとして、初期移動限界を考慮する。

b) 地形変化は、漂砂量の空間差分によって計算されるため、流れによって生じる漂砂量について、いかなる漂砂量式を用いて計算するかが問題となる。サンドウェーブ波高の成長発達メカニズムとして、サンドウェーブ頂から背面にかけての漂砂量の減少による砂礫の堆積が重要となる。そこで、本予測モデルの開発では、サンドウェーブ地形の勾配に応じて漂砂量が増減するという補正を加え、頂部で発生する渦によって変化する漂砂量の空間分布を疑似的に与えることによって、サンドウェーブ頂部の成長発達メカニズムを考慮する。

c) これまでのサンドウェーブ地形の現地調査結果から、サンドウェーブの波高には上限がある。そこで、海底砂の水中安息角による制限地形勾配、および、サンドウェーブの谷の位置で十分な底質移動が生じるだけの流速が必要という条件を与え、サンドウェーブの波高が発達とともに徐々に成長が制限される効果を付加する。

2.1 サンドウェーブ地形上の流れ

海底面に生じるサンドウェーブ地形を式(1)に示すように、波高 H (振幅 $a = H/2$)、波長 L (波数 $k = 2\pi/L$)、速度 C で移動する \sin 波形と仮定する。ここで、移動速度 C はゆっくりとした動きであるとする。平均水深 D の海域に \sin 波形状の海底面があり、平均流速 U の一様な流れがある場合の

ポテンシャル流理論から海底面での流れを求めると(図-2)、水平流速 u と鉛直上向き流速 v は式(2)で表される。ここで、 g は重力加速度である。水平流速 u は、サンドウェーブが海底面にあるにことよって流路が狭められるため、サンドウェーブの峰で流速が速く、谷で流速が遅くなる。また、サンドウェーブに沿う流れとなるため、鉛直方向流速成分 v が生じる。図-3は、ポテンシャル流れを平均水深 $D=24\text{m}$ 、一様流速 $U=1\text{m/s}$ 、サンドウェーブの波高 $H=10\text{m}$ 、サンドウェーブの波長 $L=120\text{m}$ の条件で計算した時の水平方向流れ u/U (□)と鉛直方向の流れ v/U (■、正が上向き流れ)の鉛直分布を図化したものである。流れのポテンシャル理論による計算であるため、山の左右で水平流速値は変わらず、渦による流れの非対称性は計算できない。渦によってサンドウェーブ地形背面で流れが緩やかになることによる砂礫の堆積現象については、次節の漂砂量式の中で考慮する。

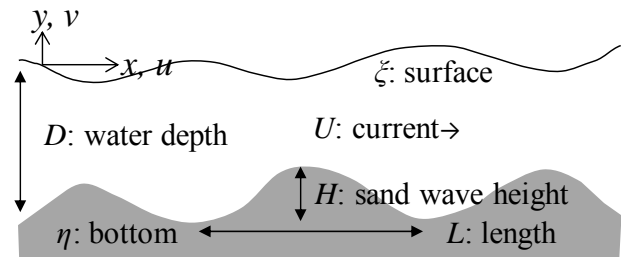


図-2 サンドウェーブの発達予測モデル概念図

$$\eta = a \sin k(x - Ct) \quad (1)$$

$$u = U + Uak \left\{ \frac{\cosh kD - U^2(k/g) \sinh kD}{\sinh kD - U^2(k/g) \cosh kD} \right\} \sin k(x - Ct) \quad (2)$$

$$v = Uak \cos k(x - Ct) \quad k = 2\pi/L$$

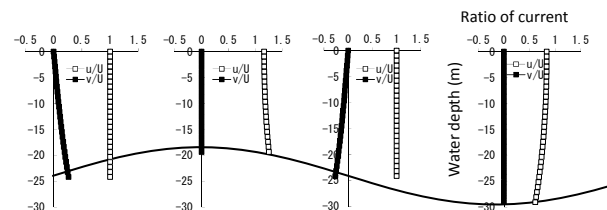


図-3 サンドウェーブ上の流れ計算例

縦軸：水深 D (m)、横軸：各地点での水平流速 u 、鉛直流速 v と一様流速 U との比

2.2 サンドウェーブ地形上の漂砂

底質の移動は海底面上の流れによって生じる。砂の移動量の推定に際して、海岸の海底地形変化予測計算では、底面流速の2乗に比例する底面摩擦力が一定以上になると漂砂が生じ始めるという閾値を持ち、流速の3乗に比例するという漂砂量式がよく用いられる(付録A-式(9))。そこで、本サンドウェーブの発達予測モデルでは、水平流速 u と斜面勾配 η_x とで表される式(3)の漂砂量 Q を用いることとする。ここで、下付き添え字は微分を表す。式(3)の右辺第一項は、初期移動限界の閾値を持たない流速の3乗に比例する漂砂量式である。係数 M は海底摩擦係数や漂砂量係数を含む係数(単位は s^2/m)であり、サンドウェーブの成長や移動、底質粒径等の現地調査結果を考慮して決める。第二項は、斜面勾配による漂砂量の増減を考慮した式であり、サンドウェーブの成長に大きく関わるものである。 a はサンドウェーブの成長速度を決めるパラメータであり、振幅 a がサンドウェーブ振幅の最大値 a_{MAX} になった時 $a=0$ となるよう、式(4)とする。底質移動の流速閾値については簡便な式とするため漂砂量式中には含めないが、潮流によるサンドウェーブ地形の移動を計算する際に限界値以下では動かないとして考慮する。

$$Q = Mu^3(1 + \alpha\eta_x) \quad (3)$$

$$\alpha = 1 - a/a_{MAX} \quad (4)$$

$$\eta_t + Q_x = 0 \quad (5)$$

底面の砂の連続式(5)に式(1)~(4)を代入して、波長 L に比べて振幅 a が小さいという条件のもとで式を整理すると、サンドウェーブ波形の移動速度 C は式(6)で表される(波長 L に比べて振幅 a が小さいという条件は最大振幅 a_{MAX} を式(8)で制限するので波高は際限なく大きくはならず、常に条件は満たす)。式(6)から移動速度 C は、サンドウェーブの振幅 a に関係せず、したがって、時間によって変化することもない。外力となる一様流速 U とその場所の平均水深 D 、サンドウェーブの波長 L によって移動速度が決まり、サンドウェーブが移動することになる。また、サンドウェーブ波形の成長率 a_t/a は式(7)で表される。この式はサンドウェーブの振幅 a が大きくなるほど成長率 a_t/a が小さくなるため、振幅 a の成長とともに a_{MAX} に漸近する。ここで、サンドウェーブの振幅の最大値 a_{MAX} については、サンドウェーブ波形の最大勾配 ak が底質粒径などによって決まる勾配 $\tan\phi$ を超えることはないとの仮定、および、サンドウェーブの谷での流速 u が底質の移動限界流速 u_c より大きいとの仮定から、式(8)とした。ここで、 U は上げ流

速あるいは下げ流速作用時の平均流速とした。水中安息角 ϕ については、文献値あるいは実験値をもとに与える。

$$C = 3kMU^3 \left\{ \frac{\cosh kD - U^2(k/g)\sinh kD}{\sinh kD - U^2(k/g)\cosh kD} \right\} \quad (6)$$

$$\frac{a_t}{a} = \left(1 - \frac{a}{a_{MAX}} \right) k^2 MU^3 \quad (7)$$

$$a_{MAX} = \min \left(\frac{\tan\phi}{k}, \frac{\left(1 - \frac{u_s}{U} \right)}{k \left\{ \frac{\cosh kD - U^2(k/g)\sinh kD}{\sinh kD - U^2(k/g)\cosh kD} \right\}} \right) \quad (8)$$

式(6)式(7)中の係数 M については、掃流漂砂量式との対比から、

$$M = \frac{AC_f^{1.5}}{(s-1)g} \quad (9)$$

とし、本報告では、式(10)を用いて摩擦係数を計算し、漂砂量係数内の無次元定数 A を求めることとする。ここで、 A は漂砂量係数で無次元の定数、 C_f は摩擦係数、 s は底質の比重である。式中に明示的に底質の粒径は表れていないが、摩擦係数 C_f は、たとえば、水深 D の流れに対して、海底面の粗度 k_s を通じて、底質の中央粒径 d と関係があり、さまざまな式が提案されている。

$$C_f = \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{11D}{k_s} \right) \right]^{-2}, \quad \kappa = 0.4, \quad k_s = 2.5d \quad (10)$$

3. 発達予測モデルの計算例

まず、一方向流下の解析解式(6)および式(7)のサンドウェーブの波長 L による移動速度 C 、および、振幅 a の変化傾向を見るために、係数 M には適当な値 0.001 を用いて図化する。現地サンドウェーブの調査結果を用いたパラメータの設定は次章で行うこととする。まず、サンドウェーブの移動速度 C について、図-4に流速 $U=2m/s$ と $4m/s$ 、水深 $D=10m$ と $20m$ の場合の移動速度 C と波数 $k=2\pi/L$ との関係を示す。図から、サンドウェーブの波長 L が長い(k が小さい)ほど移動速度 C が遅いこと、一様流速 U が速いほど移動速度 C が速いこと、平均水深 D が深いほど移動速度 C が遅いことがわかる。また、波長 L が長い(k が小さい)時、曲線の傾きが小さいことから、移動速度 C がサンドウェーブの波長 L によってあまり違わない。波長 L が短い(k が大きい)時、水深 D による移動速度 C の違いがないことがわかる。

式(7)については、初期振幅 $a(0)$ を与え、時間について積

分すると、振幅 a の時間変化を表す式(11)が得られる。図-5は式(11)を図化したものである。サンドウェーブの振幅 a は波長 L に応じて最大値を持ち、成長が制限されること、波長の長いサンドウェーブは、最大振幅が大きいがゆっくりと成長し、波長が短いサンドウェーブは、最大振幅は小さいが急速に成長することがわかる。

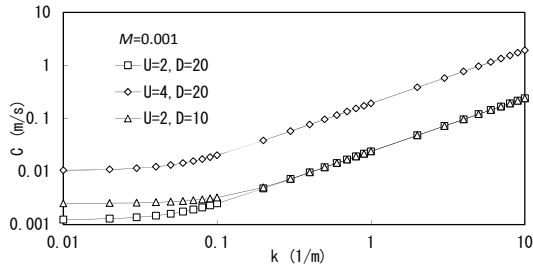


図-4 サンドウェーブの移動速度と波数の関係
横軸：波数 $k(1/m)$ ，縦軸：サンドウェーブの移動速度 $C(m/s)$ ， U は一様流速 (m/s) ， D は水深 (m)

$$a(t) = a_{MAX} \left\{ 1 + \left(\frac{a_{MAX}}{a(0)} - 1 \right) \exp(-k^2 MU^3 t) \right\}^{-1} \quad (11)$$

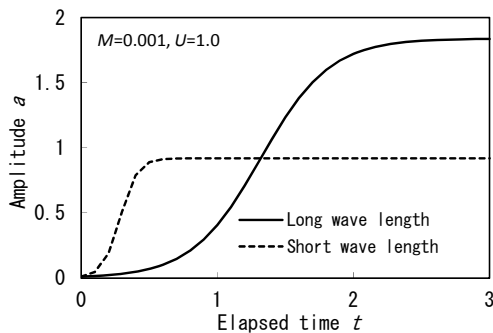


図-5 サンドウェーブ振幅の時間発展
横軸：経過時間，縦軸：サンドウェーブの振幅

4. 発達予測モデルのパラメタ設定

4.1 パラメタ設定のための現地調査データ

予測モデルのパラメタの設定に当たって、既存の現地調査の結果として以下の文献を参考にした。備讃瀬戸航路埋没予測調査報告書(1997)では、測量調査(1985, 86, 87, 88, 89, 90, 92, 93, 94, 95, 96)の取りまとめが行われており、加藤ら(1997)は、このイノサキノツガイの測量結果を解析し、平均水深変化とサンドウェーブの頂高さ変化に関する近似予測式を求め、維持浚渫計画の検討を行っている。これらのうち、予測モデルのパラメタ決定に際して、イ

ノサキノツガイでのサンドウェーブ地形の現地調査によって得られている結果から、サンドウェーブの波高、波長、移動速度などの値を求め、計算結果との比較によって決定した。

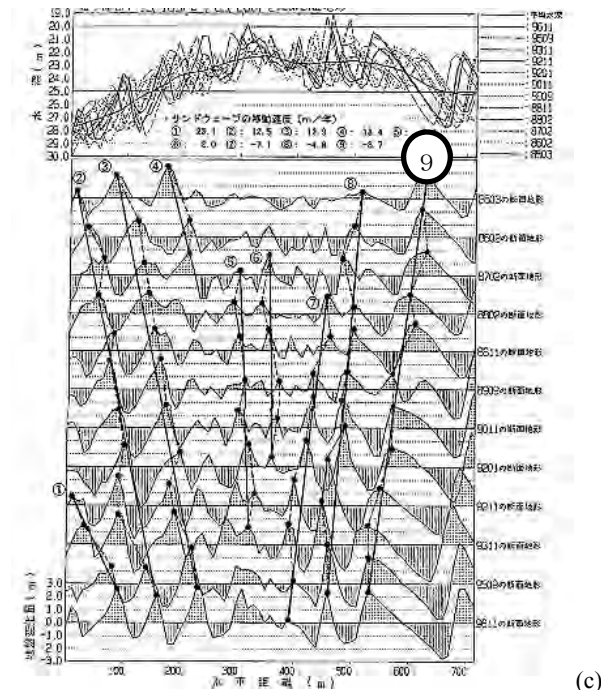
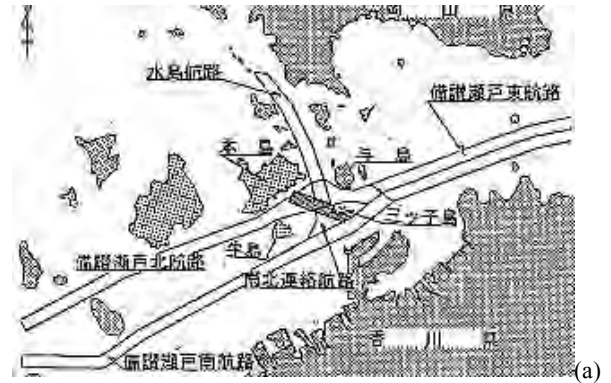


図-6 イノサキノツガイにおけるサンドウェーブの移動と成長

図-6は備讃瀬戸航路埋没予測調査報告書(1997)および加藤ら(1997)において調査解析が行われたイノサキノツガイ上の測線Aにおけるサンドウェーブ波形の移動と成長を取りまとめたものである。イノサキノツガイは備讃瀬戸北航路、および、南航路、南北連絡航路にまたがる砂州地形であり(図-6(a)), この砂州上に南北に峰線をもつサンドウェーブ波形が形成されている(図-6(b))。このサンドウェーブ波形の移動と成長を南北の測線A上で図示したものが、図-6(c)である。平均水深24mの凸型地形上にサンドウェーブが形成され、1985年から1996年の間に砂州地形の浅いほうから深いほうに向かってサンドウェーブの波形が移動していることがわかる。測線A上のそれぞれのサンドウェーブ波形の移動速度については、峰の移動速度から4m/yr~23m/yrと推定されている。

図-7はイノサキノツガイ上の全測線A~H上の波高 H と波長 L を図から読み取り、図示したものである。点線で示すようなサンドウェーブの波長 L に応じた波高 H の上限がある。数値モデルで用いている振幅 a と波数 k に変換し両対数グラフで表すと図-8となる。図中に式(8)で表されるサンドウェーブの最大振幅 a_{MAX} を実線で示す。水中安息角については $\phi=20^\circ$ を用いて計算した。付録Bに示すガラスビーズの水中安息角実験においても、粒径1mm前後のガラスビーズの水中安息角は $\phi=10^\circ\sim 25^\circ$ となっており、以後の計算では水中安息角 $\phi=20^\circ$ とする。底質の移動が始まる潮流速度を u_c については、底質の条件(粒径 d や安息角 ϕ 、その他に粒度分布などにも関係する)によって異なると考えられるので、実験結果および現地観測結果などによる値の調整が必要である。

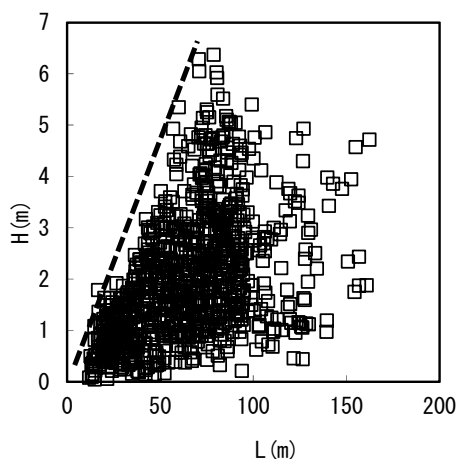


図-7 イノサキノツガイ上のサンドウェーブの波高 H と波長 L

横軸：サンドウェーブの波長(m), 縦軸：サンドウェーブの波高(m), 点線は波高の上限を結ぶ直線

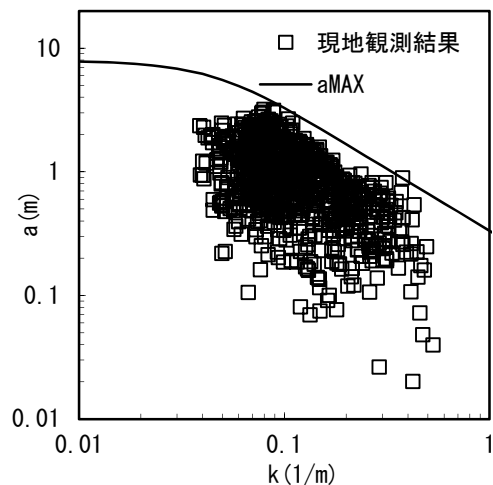


図-8 サンドウェーブの振幅 a と最大振幅 a_{MAX}

横軸：サンドウェーブの波数(1/m), 縦軸：サンドウェーブの振幅(m), 実線は式(8)による振幅最大値

4.2 予測式中のパラメタの設定

次に、式(6)中の係数 M について、調査測線Aのサンドウェーブの移動速度を用いて値を定める。測線Aの移動速度は、ほぼ毎年1回行われた深浅測量結果からサンドウェーブの峰の進行速度を求めたものであり、この場所の潮汐による往復流が何度となく繰り返した際の峰の移動量となっている。したがって、予測モデルにおいても1日2回生じる往復流を考慮した年間の移動量から、移動速度を計算する必要がある。測線Aの周辺では、図-6(c)のサンドウェーブ番号⑨の周辺で潮流調査が実施されており、上げ(西向き)最大速度が1.2m/s, 下げ(東向き)最大速度が0.9m/sという結果が得られている。この結果から、簡便な1日の潮流速モデルは、図-9のようになる。この潮汐による往復流に対して、底質砂礫の移動が始まる潮流速度を考慮しつつ、時間毎のサンドウェーブ地形の移動速度を図化すると、図-10となる。ここで、底質砂礫の移動が始まる潮流速度については、別途実施したガラスビーズの初期移動速度実験から、 $u_c=0.5\text{m/s}$ とした。毎時の移動速度を積算した移動距離は図-11のようになり、点線で示す直線の勾配が平均的なサンドウェーブ地形の移動速度となる。図-12に係数 M の値を変化させた時の平均的な移動速度 $Cave$ の関係を示す。この図から、現地調査結果の図-6をもとに、水深 $D=24\text{m}$ 、サンドウェーブの波長 $L=120\text{m}$ とし、サンドウェーブ⑨の移動速度 8.7m/yr とほぼ一致する係数 M の値として $M=6.5\times 10^{-6}$ とした。無次元定数 A については式(10)と現地砂の平均粒径1mmを用いて $A=2.54$ が得られる。

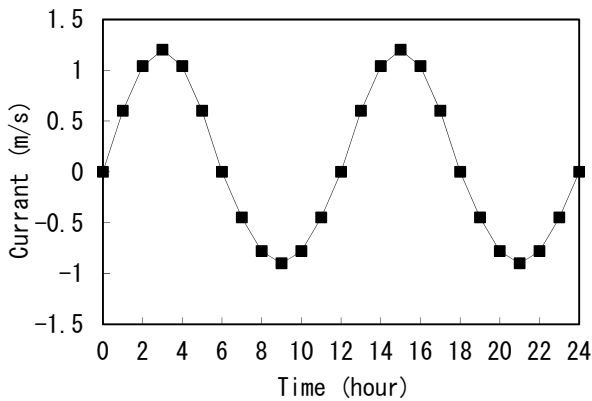


図-9 一日の潮汐流モデル
横軸：時間(時)，縦軸：潮流の速度，1日の潮流速
の変化をモデル化する。

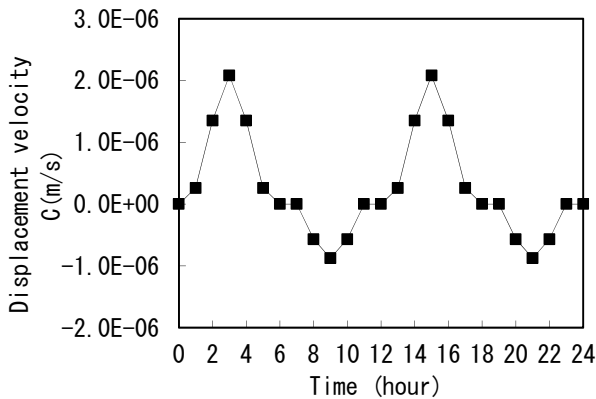


図-10 一日のサンドウェーブの移動速度変化
横軸：時間(時)，縦軸：サンドウェーブの地形の
移動速度，流れが遅い時には移動しない。

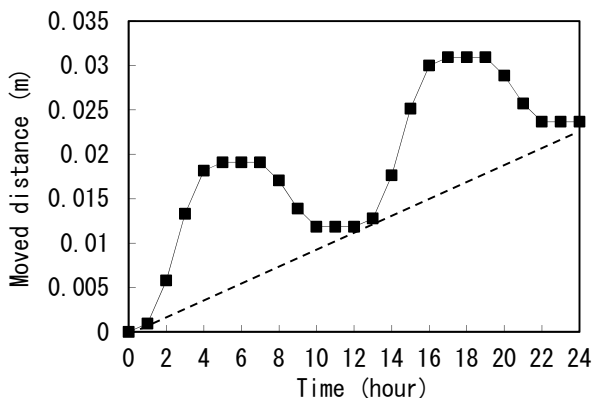


図-11 一日のサンドウェーブの移動
横軸：時間(時)，縦軸：サンドウェーブの地形の
移動距離，点線の傾きは平均移動速度Cave

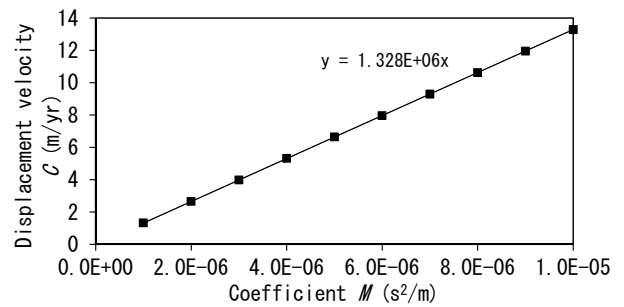


図-12 漂砂量係数 M と平均移動速度 $Cave$ の関係 ($D=24m$,
 $L=120m$ の場合)

現地観測結果との比較によって得られた係数 M の値を用いて，サンドウェーブ振幅 a の成長式(11)を図化すると，図-13のようになる。図は全ての波数 k のサンドウェーブの初期振幅 $a(0)=0.01$ として，1年後，5年後，…，100年後の振幅 a の大きさを図示している。サンドウェーブ振幅 a は波長 L が長い時，一定値 $(1-uc/U)D$ に漸近する。ここでは， $uc=0.5m/s$ ， $U=0.78m/s$ ， $D=24m$ とした。波長 $L=10m$ の場合，1年未満でサンドウェーブの波高は最大値に達し，その後は成長しないことがわかる。また，波長 $L=100m$ の場合，約20年から50年でサンドウェーブの波高は最大値に達し，その後は成長しないことがわかる。実際のサンドウェーブ地形では，波数の異なる波形が重なり合ったものになる。波数 k によって発達成長率が異なるため，年毎の振幅分布にはピーク値が存在する。このため，全体の波形としては，振幅がピークとなる波数（波長）のサンドウェーブが顕著に表れる。

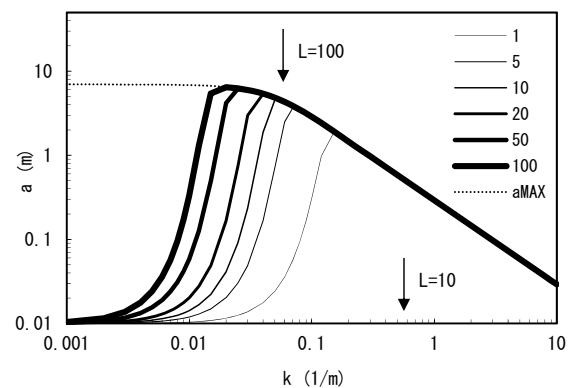


図-13 サンドウェーブの成長と最大振幅に達するまでの時間

横軸：サンドウェーブの波数，縦軸：サンドウェーブの振幅，初期振幅 $0.01m$ の各波数のサンドウェーブの1年～100年後の成長を予測， a_{MAX} は式(8)

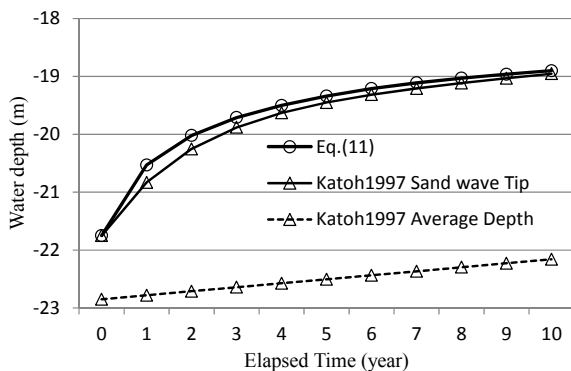


図-14 既存の予測モデルと本モデルによる予測結果との比較

横軸：経過時間(年)，縦軸：水深(m)，初期水深22.85mにある初期振幅1.1mのサンドウェーブの発達を予測。実線はサンドウェーブ頂の水深予測結果，点線は平均水深の予測結果

図-14は、年毎のピーク値の振幅を用いて、サンドウェーブ頂の水深予測を行い、加藤ら(1997)の予測値と比較したものである。式(11) (○実線)の結果と加藤らの予測値(△実線)は良く一致している。加藤らの水深予測では、サンドウェーブ頂の水深予測式の他に、サンドウェーブ地形の平均水深の予測式(△点線)についても得られているが、本予測手法については、平均水深は変わらないものとしてサンドウェーブの振幅のみ発達成長するモデルとなっている。

5. まとめ

本数値モデルによって、潮流速や水深、底質の条件を与えることによって、サンドウェーブの移動と発達、波高の最大値を計算することが可能となった。これまでのイノサキノツガイにおける現地調査結果をもとに、サンドウェーブ移動速度の実測値8.7m/yrと予測モデルの移動速度計算値の合わせこみを行うことにより、予測モデルのパラメタである係数 $M=6.5 \times 10^{-6}$ が得られた。さらに、式(10)の底面摩擦係数と底質粒径、水深との関係式を用いて、漂砂量の無次元係数 $A=2.54$ を得た。これにより、底質粒径および水深の異なる場所で本モデルを適用することができる。本予測モデルによる計算値と加藤ら(1997)の観測データ近似による計算値を比較して、良く一致した。

今後の検討として、イノサキノツガイ以外の場所で生じているサンドウェーブ地形の現地観測結果とモデルで計算されるサンドウェーブの最大高さとの比較を行い、他の場所での予測精度の検証を行う必要がある。

6. あとがき

本予測モデルは、サンドウェーブ上の流れと砂礫移動の式を用いて、サンドウェーブの発達成長を物理的な過程を考慮しつつ、できるだけ簡単な予測式となるよう開発したものである。そのため、現地の水深や潮流速、底質砂礫の粒径を条件として与えれば、さまざまな場所において適用可能なものとなっている。ただし、現地調査結果との比較を行ったのは、現地データが豊富にそろっている備讃瀬戸航路内のイノサキノツガイに生じるサンドウェーブ地形に対してのみである。今後、備讃瀬戸航路の他の場所に生じているサンドウェーブの調査や豊後水道、関門海峡などでの調査、および、予測式の適用を通じて、より使いやすい予測計算モデルへと、より一層の改良を図る必要がある。

(2014年11月7日受付)

参考文献

- 赤城正典・中野拓治・田中則男・入江功(1965)：備讃瀬戸の調査報告について，海岸工学講演会講演集，第12回，pp.122-127.
- 伊福誠・小林泰之・坂田健治・西本光宏・中田正人(2002)：深浅測量結果に基づく備讃瀬戸航路の地形変化，海岸工学論文集，第49巻，pp.556-560.
- 運輸省第三港湾建設局高松港工事事務所(1997)：備讃瀬戸航路埋没予測調査報告書，p.89.
- 小笹(1975)：備讃瀬戸における海底砂州，サンドウェーブの調査，港湾技術研究所報告，第14巻，第2号，pp.3-45.
- 加藤一正・久米秀俊・黒木敬司・長谷川準三(1997)：備讃瀬戸航路のサンドウェーブと航路保全，海岸工学論文集，第44巻，pp.686-690.
- 田中則男・小笹博昭・柴山煒彦(1973)：備讃瀬戸におけるサンドウェーブの特性について，海岸工学講演会論文集，第20回，pp.365-369.
- Kennedy, J.F.(1963)：The mechanics of dunes and antidunes in erodible-bed channels, J. Fluid Mech. Vol.16, Part4, pp.521-544.

記号表

a	: サンドウエーブの振幅 (m)
a_{MAX}	: サンドウエーブの最大振幅 (m)
$a(0)$: サンドウエーブの初期振幅 (m)
$a(t)$: t 時間後のサンドウエーブの振幅 (m)
A	: 漂砂量の無次元係数
$A(t)$: t 時間後の海面の振幅 (m)
C	: サンドウエーブの移動速度 (m/s)
$Cave$: 非対称な往復流によって移動するサンドウエーブの平均移動速度 (m/s)
C_f	: 海底面の摩擦係数
d	: 底質砂礫の粒径 (m)
D	: 水深 (m)
g	: 重力加速度 (m/s^2)
H	: サンドウエーブの波高 (m)
k	: サンドウエーブの波数 ($1/m$)
k_s	: 相当粗度 (m)
L	: サンドウエーブの波長 (m)
M	: 漂砂量係数 (s^2/m)
q	: 単位幅当たりの局所漂砂量 (m^2/s)
Q	: 斜面を考慮した局所漂砂量 (m^2/s)
s	: 底質砂礫の比重
t	: 時間 (s)
u	: 水平流速 (m/s)
u_c	: 底質砂礫の初期移動限界流速 (m/s)
U	: 潮流速 (m/s)
v	: 鉛直流速 (m/s)
x	: 水平距離 (m)
y	: 鉛直距離 (m)
α	: サンドウエーブの発達制限関数
η	: 海底面形状 (m)
ξ	: 海面形状 (m)
κ	: カルマン定数
ϕ	: 流れの速度ポテンシャル海面形状 (m^2/s)
ϕ	: 海底砂礫の水中安息角
Ψ	: シールズ数
Ψ_c	: 底質砂礫の初期移動限界シールズ数

付録A サンドウェーブ発達予測式の導出

サンドウェーブ発達予測式を求めるために、河川における河床波の安定理論として古くから用いられているKennedy(1963)による解析的手法をもとに予測式を導出した。

はじめに、平均水深 D 、一様流 U の流れがある場所の海底面に連続した砂堆があると仮定する。海底面形状 η を三角関数で近似して、

$$\eta(x, t) = a(t) \sin k(x - Ct) \quad \text{A-(1)}$$

とおく。ここで、 $a(t)$ はゆっくり変化するサンドウェーブ地形の振幅、 k は波数 ($k=2\pi/L$)、 L はサンドウェーブの波長、 C はサンドウェーブ地形の移動速度、サンドウェーブの高さ $H=2a$ で表される。海底面に起伏があることによって生じる水面形状 ξ についても同様に、

$$\xi(x, t) = A(t) \sin k(x - Ct) \quad \text{A-(2)}$$

とおく。 $A(t)$ は $a(t)$ と同様にゆっくりと時間変化する水面の振幅を表す。図-A.1のように座標軸をとると、水面は、

$$y = \xi(x, t) \quad \text{A-(3)}$$

海底面は、

$$y = -D + \eta(x, t) \quad \text{A-(4)}$$

で表される。流れとして断面2次元ポテンシャル運動を仮定すると、流れの境界条件は、

$$\begin{aligned} \xi_t + U\xi_x &= \phi_y & \text{at } y = 0 \\ \phi_t + g\xi + \frac{1}{2}(\phi_x^2 + \phi_y^2) &= \text{const.} & \text{at } y = 0 \\ \eta_t + U\eta_x &= \phi_y & \text{at } y = -D \end{aligned} \quad \text{A-(5)}$$

ここで、 ϕ は流れの速度ポテンシャル、 g は重力加速度、下付きの添え字はその変数による偏微分を表す。サンドウェーブの波長 L に比べて、振幅 $A(t)$ と $a(t)$ が小さいとして、ラプラス方程式 $\nabla^2 \phi = 0$ と流れの境界条件を満たす ϕ を求めると、

$$\phi = Ux - Ua \frac{\cosh ky + U^2(k/g) \sinh ky}{\sinh kD - U^2(k/g) \cosh kD} \cos k(x - Ct) \quad \text{A-(6)}$$

が得られる。ここで、 $C \ll U$ 、および、 $a \ll Uak$ 、の条件が必要となるが、実際のサンドウェーブの移動速度 C および潮流速 U 、発達速度 a などはこの条件を満たしている。

この速度ポテンシャル ϕ を用いて、サンドウェーブ上の砂礫移動による地形変化を計算する際に必要となる海底面近くでの流速(u, v)を求めると、

$$u = U + Uak \frac{\cosh kD - U^2(k/g) \sinh kD}{\sinh kD - U^2(k/g) \cosh kD} \sin k(x - Ct) \quad \text{A-(7)}$$

$$v = Uak \cos k(x - Ct) \quad \text{A-(8)}$$

となる。

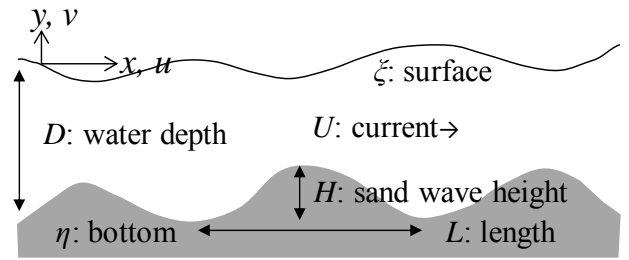


図-A.1 サンドウェーブ地形と流れの定義図

次に、砂礫移動に伴うサンドウェーブ地形の変化から発達予測式を導く。海岸における局所漂砂量 q として良く以下のような漂砂量式が用いられる。

$$\frac{q}{\sqrt{(s-1)gd_s^3}} = A_{BL} \Psi^{0.5} (\Psi - \Psi_c), \quad \Psi = \frac{C_f u^2}{(s-1)gd_s} \quad \text{A-(9)}$$

ここで、 s は砂礫の比重、 d_s は砂礫の粒径、 Ψ はシールズ数、 Ψ_c は砂礫の初期移動限界、 A_{BL} は無次元の漂砂量係数、 C_f は流れと底面粗度によって決まる底面摩擦係数を表す。サンドウェーブの発達予測式の展開においても、流速の3乗に比例する漂砂量式を用いることとする。以下の導出では係数等をまとめ簡略化した次式を用いる。

$$q = Mu^3, \quad M = \frac{AC_f^{1.5}}{(s-1)g}, \quad C_f = \left[\frac{1}{\kappa} \ln \frac{11D}{k_s} \right]^{-2} \quad \text{A-(10)}$$

ここで、 κ はカルマン乗数 $=0.4$ 、 k_s は相当粗度 $=2.5d_s$ である。砂礫の初期移動限界については、流速の限界値 u_c に換算し、潮流速が u_c 以上になった場合に砂礫移動を計算することによって考慮することとする。

実際のサンドウェーブ地形上の砂礫の移動状態は、流れによって、砂礫が斜面上を駆け上がり、サンドウェーブの頂上付近から発生する渦によって生じたサンドウェーブ背面の流れが緩い場所に砂礫が留まり、堆積が進む。ポテンシャル流れの理論を用いた流れ場では、当然のことながら、こうした渦を生じた流れを求めることはできない。そこで、こうしたサンドウェーブ頂部にできる渦による砂礫移動を考慮するため、海底勾配の影響を付加した漂砂量式として、

$$Q = (1 + \alpha \eta_x) q \quad \text{A-(11)}$$

を用いることとする。ここで、 α は後述するサンドウェーブの発達制限式を表し、 $\alpha=0$ の場合にはサンドウェーブは発達成長しない。なぜなら、ポテンシャル流理論では、流れの前面と背面での流速の差がないため、頂部付近での砂礫の堆積は生じないからである。サンドウェーブ地形 η は、流れによる生じる砂礫の局所漂砂量の空間分布によって発達する。海底面における砂礫移動の連続式は、

$$\eta_t + Q_x = 0 \quad \text{A-(12)}$$

で表される。ここで、 Q は単位幅当たりの局所漂砂量。式は局所漂砂量 Q の空間差分によって地盤高さ η が変化することを示している。この連続式に漂砂量式、および、底面近くでの流速式、サンドウェーブの形状を代入して、低次の ak^2 の項までを集めて、値が極めて小さい高次の項を無視すると、

$$\frac{a_t}{a} = \alpha k^2 MU^3 + \cot k(x - Ct) \left\{ kC - 3k^3 MU^3 \frac{\cosh kD - U^2(k/g) \sinh kD}{\sinh kD - U^2(k/g) \cosh kD} \right\} \quad \text{A-(13)}$$

が得られる。サンドウェーブの振幅 a は x に依らないだけ関数なので、 $\{ \} = 0$ でなければならないことから、サンドウェーブの移動速度 C 、および、サンドウェーブの成長率 a_t/a が次式で得られる。

$$C = 3kMU^3 \frac{\cosh kD - U^2(k/g) \sinh kD}{\sinh kD - U^2(k/g) \cosh kD} \quad \text{A-(14)}$$

$$\frac{a_t}{a} = \alpha k^2 MU^3 \quad \text{A-(15)}$$

サンドウェーブの成長率 a_t/a の α を定数として式を積分すると、

$$a(t) = a(0) \exp(\alpha k^2 MU^3 t) \quad \text{A-(16)}$$

となる。ここで、 $a(0)$ はサンドウェーブの初期振幅。この関数は、時間とともに値が急激に増大する。現地のサンドウェーブにおいては、水深に規定され（小笹(1975)）、その成長は時間とともに漸近する（加藤ら(1997)）。そこで、変数 α をサンドウェーブの振幅 a の関数として次式を用いる。

$$\alpha = 1 - \frac{\alpha}{a_{MAX}} \quad \text{A-(17)}$$

ここで、 a_{MAX} はサンドウェーブ振幅の最大値を表す。サンドウェーブの成長率 a_t/a を α が a の関数として積分すると、

$$a(t) = a_{MAX} \left\{ 1 + \left(\frac{a_{MAX}}{a(0)} - 1 \right) \exp(-k^2 MU^3 t) \right\}^{-1} \quad \text{A-(18)}$$

となる。

最後に、サンドウェーブ振幅の最大値 a_{MAX} については、サンドウェーブ地形の勾配が砂礫の水中安息角を超えない条件とサンドウェーブの谷での砂礫移動が連続しているという条件とのうち、値の小さい方を用いる。サンドウェーブの地形の勾配の最大値が水中安息角 ϕ より小さいという条件を用いて、

$$|\eta_x| = ak < \tan \phi \quad \text{から} \quad a_{MAX} = \frac{\tan \phi}{k} \quad \text{A-(19)}$$

が得られる。サンドウェーブの谷での砂礫移動の連続性

については、谷での流速が初期移動限界流速 u_c より大きいという条件を用いて、

$$u_{TROUGH} = U - Uak \frac{\cosh kD - U^2(k/g) \sinh kD}{\sinh kD - U^2(k/g) \cosh kD} > u_c \quad \text{から}$$

$$a_{MAX} = \frac{\left(1 - \frac{u_c}{U}\right)}{k \left\{ \frac{\cosh kD - U^2(k/g) \sinh kD}{\sinh kD - U^2(k/g) \cosh kD} \right\}} \quad \text{A-(20)}$$

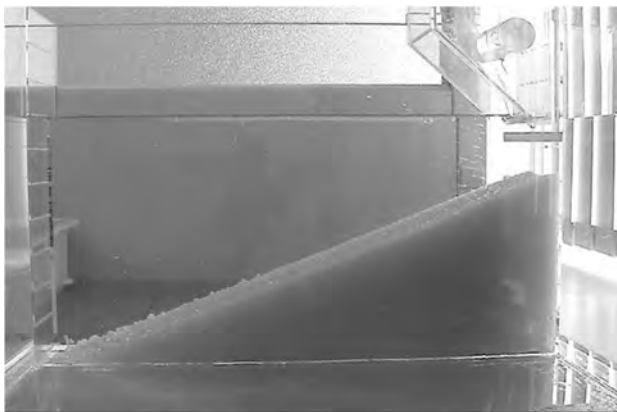
が得られる。この2式の値の小さい方をサンドウェーブ振幅の最大値 a_{MAX} として、

$$a_{MAX} = \min \left(\frac{\tan \phi}{k}, \frac{\left(1 - \frac{u_c}{U}\right)}{k \left\{ \frac{\cosh kD - U^2(k/g) \sinh kD}{\sinh kD - U^2(k/g) \cosh kD} \right\}} \right) \quad \text{A-(21)}$$

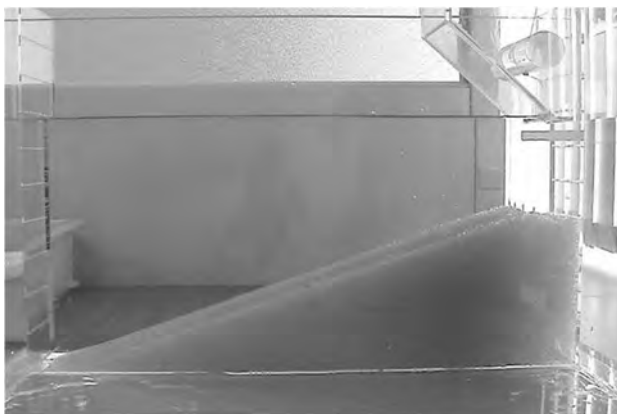
となる。

付録B ガラスビーズの水中安息角

底質の水中安息角を知るために、均一粒径のガラスビーズを水中に投下してできる斜面の角度を実験的に調べた。実験は均一粒径のガラスビーズを水槽の端から5回に分けて投入し、各回にできる斜面の勾配を計測し、その平均値を粒径ごとの安息角とした。写-B.1はガラスビーズ粒径0.8mmの場合の5回投入後の斜面の状況、写-B.2は粒径1mmの場合の5回投入後の斜面の状況である。図-B.1は、粒径毎の安息角を示したものである。粒径0.3mm以下のガラスビーズでは、投入したビーズは水槽の底一面に広がり、斜面を構成しなかったため、図から除外した。粒径1mmの前で安息角の傾向が異なる結果となった。



写-B.1 粒径0.8mmのガラスビーズ



写-B.2 粒径1mmのガラスビーズ

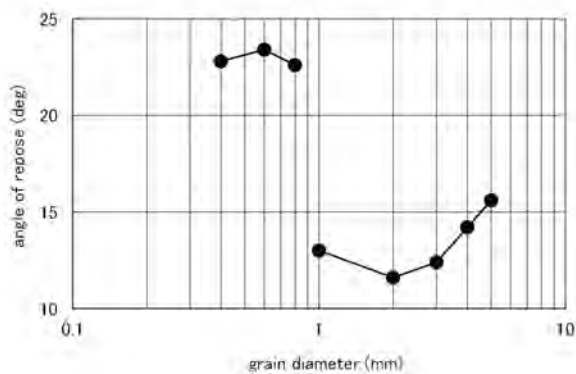


図-B.1 ガラスビーズの粒径と水中安息角
横軸：ガラスビーズの粒径の中央値(mm)
縦軸：水中安息角の平均値(°)

港湾空港技術研究所資料 No.1297

2015. 3

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 大 應

Copyright © (2015) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。