

数値シミュレーションによる海浜変形の予測

海岸研究室 (有) 芹沢 真澄 (Masumi Serizawa)

Coastal Engineering Laboratory Co.Ltd.

(財) 土木研究センター 宇多 高明 (Takaaki Uda)

Public Works Research Center.

(株) 水圏科学コンサルタント 熊田 貴之 (Takayuki Kumada)

Laboratory of Aquatic Science Consultant Co.Ltd.

海岸研究室 (有) 三波 俊郎 (Toshiro San-nami)

Coastal Engineering Laboratory Co.Ltd.

海岸研究室 (有) 古池 鋼 (Kou Furuie)

Coastal Engineering Laboratory Co.Ltd.

(財) 土木研究センター 石川 仁憲 (Toshinori Ishikawa)

Public Works Research Center.

1. 海岸侵食

近年, 日本各地で海岸侵食による砂浜の消失が問題化している (宇多, 1997, 2004). 海岸侵食は直接的には波浪の作用で砂浜が削り取られる現象である. しかし, その実態をよく調べてみると, 海岸侵食は人為的インパクトに起因するものがほとんどである. 宇多 (2004) が明らかにしたように, 海岸侵食の原因は, 1) 海岸線に港湾・漁港などの構造物を設置したことにより卓越沿岸漂砂 (海岸線に沿った砂の流れ) が阻止され上手側が堆積し下手側が侵食されるもの (図-1 参照), 2) 防波堤などの波を遮蔽する構造物の設置によって遮蔽域内に土砂が引き込まれ周辺海岸で起こる侵食 (図-2 参照), 3) 河川供給土砂量の減少に伴う海岸侵食, 4) 海砂利採取に伴う海岸侵食, 5) 保安林の過剰な前進にともなう海浜地の喪失, 6) 護岸の過剰な前出しに起因する砂浜の喪失などに大別される. このうち海に向かって土地利用を拡げる 5) 6) を除けば, いずれも人為的インパクトに起因して沿岸漂砂が変化して, 土砂収支のバランスが崩れることで生じた海浜変形ととらえられる.

筆者らは実務の立場から上記のような海浜変形を予測するため, 「等深線変化モデル」と呼ばれる数値シミュレーションモデルの開発・改良を行い, 現場に活用することで侵食機構の理解を進めるとともに侵食対策の立案に役立ててきた. 当講演ではこのモデルの紹介を行った.

2. 等深線変化モデル

等深線変化モデルは、海浜（海底）地形を複数の等深線で代表させ、波浪を外力として各等深線の沿岸漂砂量を計算し、その土砂収支から等深線の前進・後退を計算するモデルである（宇多・河野，1996）。近年では海浜縦断形の安定化機構を岸沖漂砂として組み込んだモデルに改良されている（芹沢ら，2002）。

このモデルの基本的な考え方は単純である（図-3 参照）。まず沿岸漂砂については、等深線が波向と直交すれば沿岸漂砂は生じない。斜交すればその度合いに応じた強さの沿岸漂砂が波向の下手側に向けて生じる。また岸沖漂砂については、海浜縦断形に対して、重力による斜面下方に向かう作用と、波による斜面上方への作用が均衡しているときの海底勾配を平衡勾配と考える。海浜縦断形の局所勾配が平衡勾配にあるとき岸沖漂砂は生じない。平衡勾配よりも急勾配になると沖向きの漂砂が、緩勾配になると岸向きの漂砂が生じる。つまり、「等深線の方法は波向に直角方向、海浜縦断形の局所勾配は平衡勾配」とする平衡状態に戻ろうとする復元力が働くことで漂砂が生じる、としてモデル化されている。以下に芹沢ら(2002)、Serizawa et al. (2003) による計算方法の概要を示す。

3. 計算方法

(1) 漂砂量式

図-4 に示すように、沿岸方向に x 軸、沖向きに y 軸をとる。また xy 平面の中に $z=z_1, \dots, z_k$ に対応する等深線を配す。ここに z を上向きの鉛直座標として定めた時、等深線変化モデルでは沿岸方向各地点 x から各等深線までの沖向き距離 $Y(x, z, t)$ で地形を表現する。ここに t は時間である。まず沿岸方向単位幅あたりの岸沖漂砂量 q_z について考える。本研究で対象とする岸沖漂砂に起因する縦断形変化は、暴浪による短時間スケールの地形変化ではなく、沿岸漂砂と同等の長時間スケールの変化を有するものとする。

Dean (1991) によれば、海浜縦断形には平衡断面が存在し、断面形が変化すれば漂砂を介して復元力が働く。ここでは従来の等深線変化モデルにこの安定化機構を組み込んだ。概念図を図-3 (2) に示す。これは Bakker (1968) の考え方にならったもので、海浜の平衡勾配 $\tan \beta_c$ を考えた時、重力による斜面下方への作用と、波による斜面上方への作用が均衡している場合、岸沖漂砂は 0 である。勾配 $\tan \beta$ が平衡勾配 $\tan \beta_c$ より急な場合、 q_z は沖向き、平衡勾配 $\tan \beta_c$ より緩ければ q_z は斜面上方へ向く。岸沖漂砂量は式(1)で表される（図-3 参照）。ここに $\cot \beta$ は等深線の間隔である。

$$q_z = A \cdot \left(\frac{\cot \beta}{\cot \beta_c} - 1 \right) \quad \dots\dots(1) \quad \cot \beta = -\frac{\partial Y}{\partial z} \quad \dots\dots(2)$$

式(1)の比例係数 A は縦断形の復元の速さに対応するもので、 A は波作用の強さに比例すると考えられる。岸沖漂砂の起こる範囲と波エネルギーの逸散量の関係について図-5 をもとに考える。

砂移動は、波による地形変化の限界水深 h_c と波のうち上げ高で定まる h_R で挟まれた区間で生ずるとする。この時、沖合から岸向きに輸送される波エネルギーは $(EC_g)_b$ であるが、これは碎波減衰、海浜へのうち上げを経て消失する。このとき消失したエネルギーに相応する仕事が海浜になされ、 $-h_c$ から h_R の範囲の海底面で土砂移動が起こる。したがって大局的には、 A は碎波点でのエネルギーフラックスを $-h_c$ から h_R の海底の底面長 S で割ったものに比例する。そこで図-5 に示す海底底面長を考えたとき、底面の単位長さあたりに換算した波エネルギー逸散量は次式となる。

$$\frac{(EC_g)_b}{S} = \frac{(EC_g)_b}{h_c + h_R} \sin \bar{\beta} \approx \left(\frac{1}{h_c + h_R} \right) \cdot (EC_g)_b \sin \beta_c \quad \dots\dots\dots(3)$$

また、海浜変形は碎波帯や汀線付近では著しく、沖合では小さくなる。したがって岸沖漂砂の強さは水深方向分布をもつ。そこで岸沖漂砂の強度分布関数 $\varepsilon_z(z)$ 、岸沖方向の漂砂量係数 K_z を導入し、 A を式(4)で、岸沖漂砂量を式(5)で与える。ただし $\varepsilon_z(z)$ は式(6)のように $-h_c$ から h_R の積分値が1になるよう定義する。

$$A = \varepsilon_z(z) \cdot K_z \cdot (EC_g)_b \sin \beta_c \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$q_z = \varepsilon_z(z) \cdot K_z \cdot (EC_g)_b \sin \beta_c \cdot \left(\frac{\cot \beta}{\cot \beta_c} - 1 \right) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\int_{-h_c}^{h_R} \varepsilon_z(z) dz = 1 \quad \dots\dots\dots(6)$$

以上は、波が海岸線に直角入射する場合であるが、斜め入射波の条件下においては、上式の $(EC_g)_b$ を等深線の単位長さ当りの岸向き成分に改めればよい。 α_b を碎波角とすると、岸向き成分 $(EC_g)_b \cos \alpha_b$ に、等深線の単位長さに作用する波峰線幅 $\cos \alpha_b$ を乗じると次式を得る。

$$q_z = \varepsilon_z(z) \cdot K_z \cdot (EC_g)_b \cos^2 \alpha_b \sin \beta_c \cdot \left(\frac{\cot \beta}{\cot \beta_c} - 1 \right) \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで α_b を微小とすれば $\cos \alpha_b \approx 1$ が成立する。数値計算ではこの近似を適用し、式(5)を用いた。

また $\tan \beta_c$ には構造物設置前の自然状態の海浜勾配角を与える。バーム高より高い領域と限界水深以深の領域では土砂の落ち込みに対する安息勾配を与える。 $\varepsilon_z(z)$ は、沿岸漂砂量の水深方向分布 $\varepsilon_x(z)$ と等しいとし、宇多・河野 (1996) の3次式で与えた。岸沖方向の漂砂量係数 K_z は沿岸漂砂量係数 K_x の0.2倍とした。一方、沿岸漂砂量 q_x の基礎式は宇多・河野 (1996) と同一であり、式(8)で与える。式(8)は α_b を微小として近似すれば図-3 に示した式の形となる。等深線変化は、沿岸漂砂と岸沖漂砂の両方からなる沿岸・鉛直方向の2次元の連続式で計算する。

$$q_x = \varepsilon_x(z) \cdot K_x \cdot (EC_g)_b \cos \alpha_b \sin \alpha_b \quad \dots\dots\dots(8)$$

当モデルには、以上の波による漂砂に加えて、侵食域での陸上部の浜崖の形成や、堆積域での波による地形変化の限界水深以深への土砂の落ち込みなど、重力の作用による土砂崩落も別途組み込まれている。

(2) 数値計算方法

計算においては鉛直・沿岸方向にそれぞれ離散化する。鉛直方向には図-6 に示すように各水深に対応した等深線の位置を定め、各等深線間に岸沖漂砂量の計算点を配する。岸沖漂砂量の鉛直分布は、水深- h_c から h_R までの区間に分布し、鉛直積分が 1 となるよう与え、その分布形 $\varepsilon_z(z)$ が沿岸漂砂量の鉛直分布 $\varepsilon_x(z)$ と等しいとする。沿岸方向の離散化も同様であり図-7 に示すとおりである。連続式の差分式は次式となる。

$$Y_{(i)}^{(k)} = Y_{(i)}^{(k)} - \frac{\Delta t}{\Delta x} (q_{x(i+1)}^{(k)} - q_{x(i)}^{(k)}) - \frac{\Delta t}{\Delta z} (q_{z(i)}^{(k)} - q_{z(i)}^{(k+1)}) \dots\dots\dots (9)$$

計算手順は、初期地形と入射波条件を与え、式(5)、(8)より岸沖漂砂量、沿岸漂砂量を計算し、式(9)で等深線変化量を計算する。これを繰り返すことで海浜地形の経時変化が計算される。境界条件は漂砂量=0 とする。

4. 数値計算例

図-8 は、両端が岬などによって閉じられた漂砂の系において、沖合で海底掘削が行われた場合の海浜変形計算の結果である（芹沢ら：2002）。波が直角入射する平行等深線地形において水深-3m~-10m 区間で底辺長 200m の台形状に掘削が行われた後の海浜変形である時間経過とともに掘削穴の周辺では h_c 以浅の等深線が後退し、掘削穴では埋め戻しが進んでいく。8760 ステップでは埋め戻しが完全に終了し、全ての等深線は沿岸方向に平行となった。当初掘削穴の岸側には急斜面が存在したが、埋め戻しによってこの急斜面は消失した。初期は等深線間隔が同一な平行等深線であったことを考慮すると、地形変化が終了後の等深線では、海底掘削の影響は h_c より水深の大きな等深線には窪んだ地形の一部に残されている。また掘削穴の岸側直近だけではなく、海岸線全域で浜崖が形成されて等高線の間隔が狭まったことに現れている。

図-9 は勾配 1/10 の海岸に設置された 3 基の突堤群に波高 $H_0' = 3\text{cm}$ の入射波が碎波角 10° で斜め入射した時の実験結果（宇多ら，1987）と、模型の 100 倍スケールを対象に行った計算結果である（芹沢ら，2002）。突堤が左向きの沿岸漂砂を阻止するため、突堤の上手側では汀線が前進する一方、下手側の汀線は後退して侵食が進むという状況が再現されている。これは図-1 に示した現地の海岸侵食の特徴を再現している。また、いずれも突堤長が短く、突堤先端を沿岸漂砂が通過する条件にあるため突堤先端部沖で等深線が蛇行している。この特徴も再現されている。

図-10 は防波堤を設置した場合の海浜変形の計算結果である。図-2 に示した現地海岸と同様に、防波堤背後の波の遮蔽域内に土砂が引き込まれ周辺海岸で侵食が進む状況が再現されている。

6. あとがき

当講演では、等深線変化モデルを用いた数値計算結果をもとに、人為的インパクトに伴う海浜変形の機構がどのようなものであるかを紹介した。ここで対象としている時間スケールは1年～100年のオーダーであるが、等深線変化モデルによれば、海水準変化を考慮することで、数千年のオーダーの海浜変形計算も可能である（宇多ら，1992）。さらに最近では、地形変化だけでなく、土砂の粒径の変化も同時に予測可能なモデルに拡張されている（熊田ら，2003，2005）。

参考文献

- 宇多高明(2004):海岸侵食の実態と解決策, 山海堂, p. 304.
- 宇多高明(1997):日本の海岸侵食, 山海堂, p. 442.
- 宇多高明・河野茂樹(1996):海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発, 土木学会論文集, No. 539, II-35, pp. 121-139.
- 宇多高明・山本幸次・河野茂樹・岡本俊策(1992):駿河海岸の過去9000年間における海浜変形の再現計算と将来予測, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 426-430.
- 宇多高明・小俣 篤・山本幸次(1987):沿岸漂砂制御実験報告書, 土木研究所資料, 第2507号, p. 39.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之(2002):海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 496-500.
- 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄(2003):沿岸・岸沖漂砂による粒径分級を考慮した等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 481-485.
- 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄・三浦正寛(2005):波の遮蔽域形成に伴う3次元地形・粒径変化の予測法, 海洋開発論文集, Vol. 21, pp. 1029-1034.
- Bakker, W. T. (1968): The dynamics of a coast with groyne system, Proc. 11th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 492-517.
- Dean, R. G. (1991): Equilibrium beach profiles, characteristics and application, J. Coastal Res., 7(1), pp. 53-84.
- Serizawa, M., T. Uda, T. San-nami, K. Furuike and T. Kumada (2003): Improvement of contour line change model in terms of stabilization mechanism of longitudinal profile, Coastal Sediments '03, pp. 1-15.



新潟県新川漁港周辺の空中写真

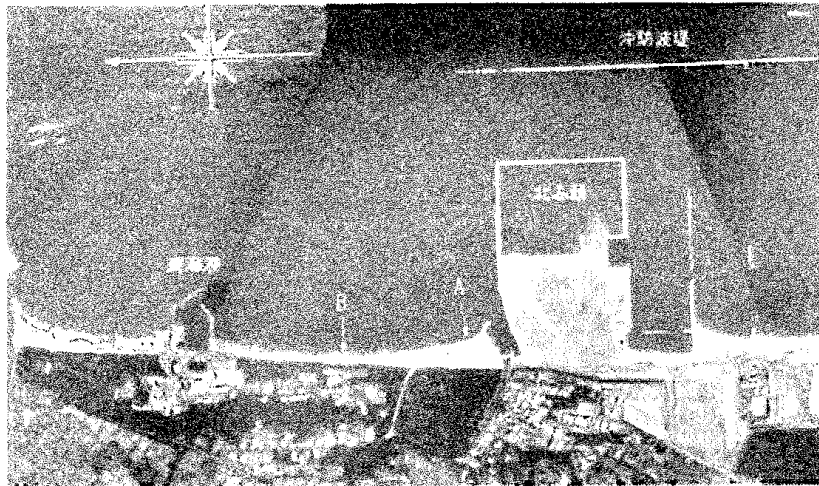


新潟県新川漁港周辺の浸食状況（地点A）



新潟県新川漁港周辺の侵食状況（地点B）

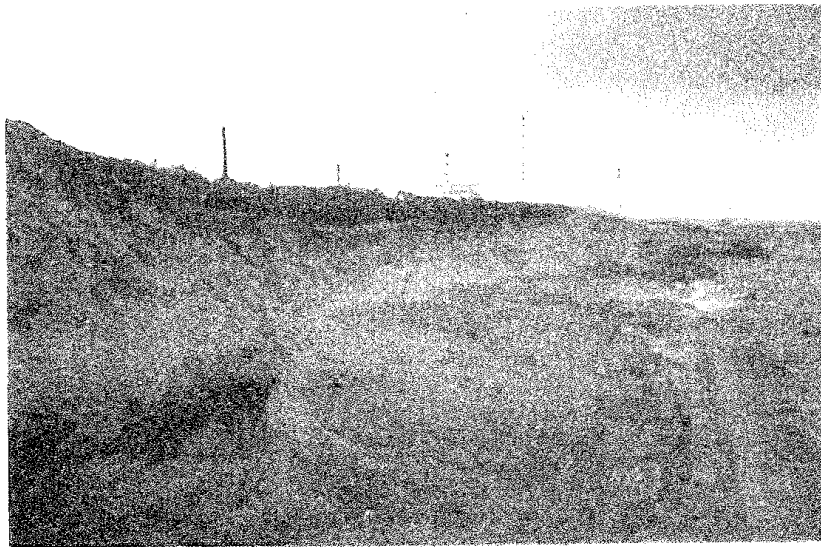
図-1 沿岸漂砂の連続性阻止による侵食の事例：新潟県新川漁港周辺



茨城県阿字ヶ浦港周辺の空中写真



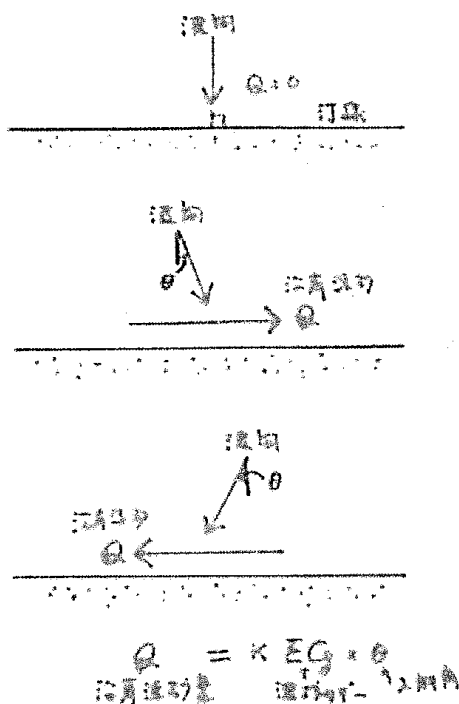
阿字ヶ浦港の北側に隣接する海浜の堆積状況（地点 A）



東海港の南側海浜の侵食状況（地点 B）

図-2 防波堤遮蔽域による侵食の事例：茨城県阿字ヶ浦港周辺

(1) 沿岸漂砂



(2) 岸沖漂砂

■ Cross-shore Sand Transport: q_z

- Dean (1991)
equilibrium profile
equilibrium slope
- Bakker (1969)

$$q_z = A \cdot \left(\frac{\cot \beta}{\cot \beta_e} - 1 \right) \dots\dots(1)$$

$$\cot \beta = -\frac{\partial Y}{\partial z} \dots\dots(2)$$

β_e the angle of the equilibrium beach slope

β the angle of the seabed slope

$\cot \beta$ the contour line interval

Y the offshore distance to the contourline

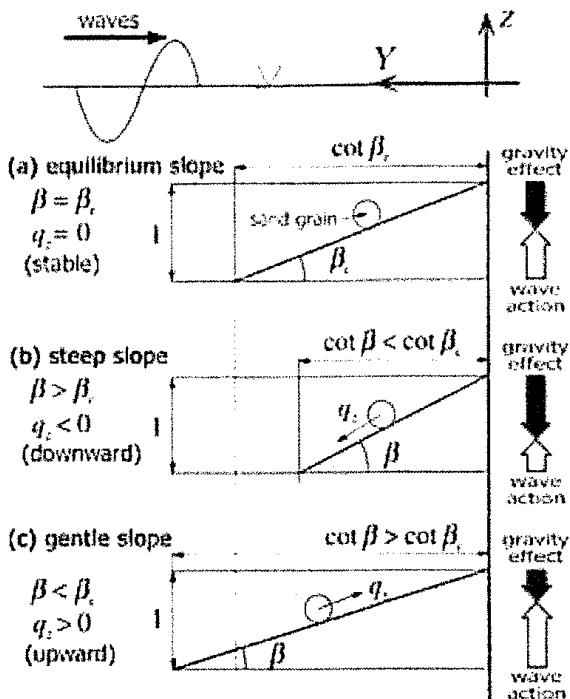


図-3 等深線変化モデルの基本概念

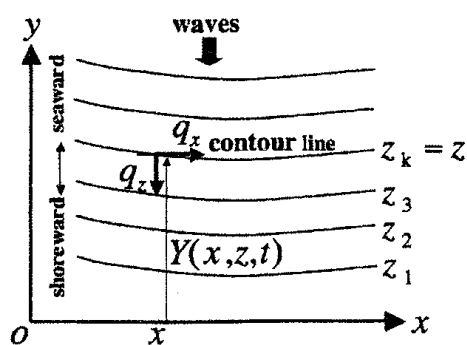


图-4

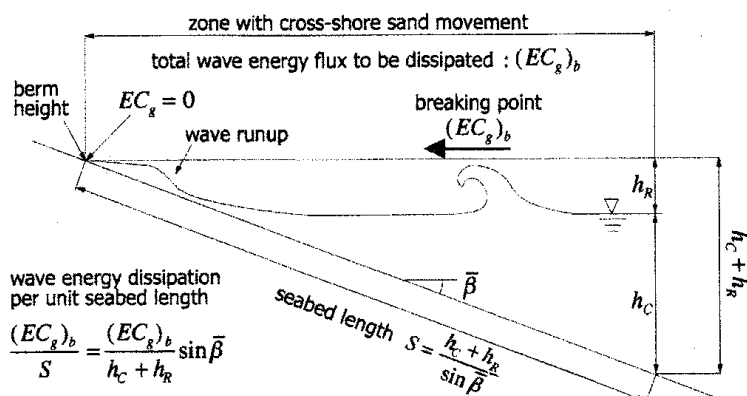


图-5

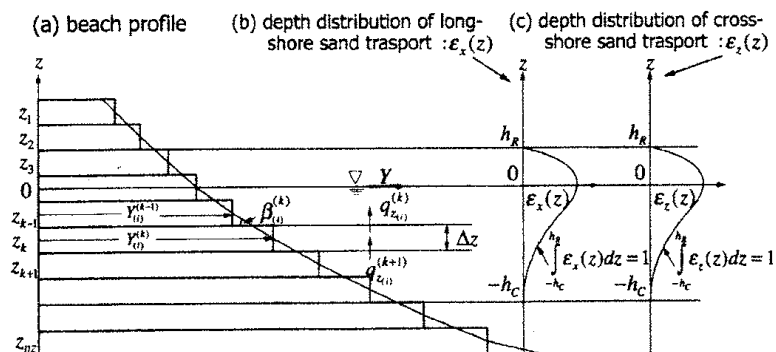


图-6

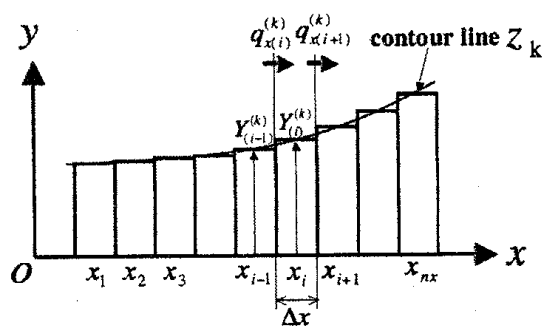


图-7

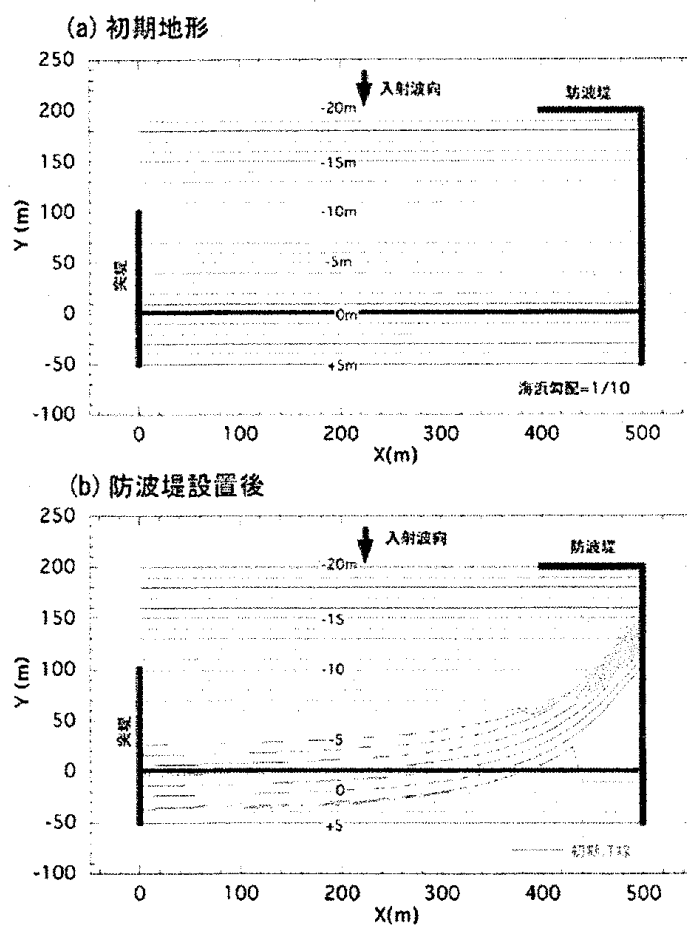
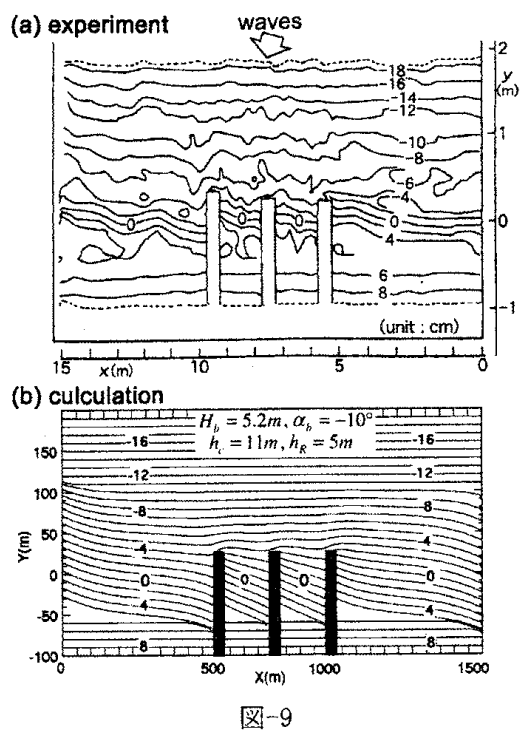
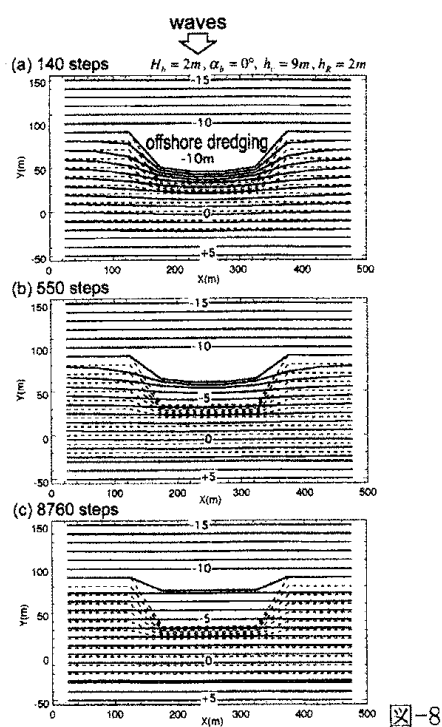


図-10