

防波堤背後の流況と汀線変化（2）

水 村 和 正*

1. 序

前回¹⁾に報告したように、大洗港周辺（図-1）の流況と汀線変化は南防波堤（図-2）の影響のために特異な現象

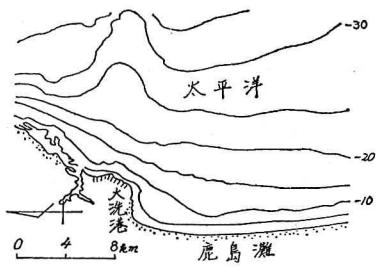


図-1 大洗港周辺

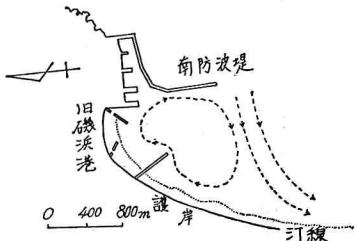


図-2 大洗港の概要

となる。岬や防波堤背後の流況は実験的には Gourlay^{2),3)}により、理論的には橋本・宇多⁴⁾や Liu & Mei⁵⁾によって解明されている。その結果、遮蔽域内では定常的な循環流が存在し、周囲の汀線変化と密接な関係をもつことが研究されてきた^{6)~8)}。本研究は、この循環流が南防波堤の対岸では汀線にほぼ平行に流れている^{2),8)}ことを利用して、新設された防砂突堤周辺の流れをボテンシャル流で近似して、汀線変化の予測モデルを作成したものである。ここでは、防波堤遮蔽域内の波浪変形計算を省略して、そのかわり発生する流れの場を近似し、汀線変化を解析的に求め、その現象の物理特性を把握することを目的とした。

2. 現地海岸の特性

大洗港は全長約 70 km の鹿島灘海岸の北に位置し、

太平洋に面しており、その北側の大洗海岸とは大洗岬によって分離されている。鹿島灘海岸は砂浜海岸であり、大洗海岸は岩礁海岸であり対照的である。大洗港の西側には、現在、旧磯浜港がある。この港は明治大正期に築港されたが、工事途中に漂砂のために埋没したものであり、現在、磯浜海水浴場の一部となっている。本港の来襲波浪の波向は ENE が卓越し、50% 以上を占めている。周期は 8.0 秒が卓越し、波高は 3.0 m 以上が全体の 4%，1.5 m 以上が約 75% となっている。前浜勾配は南防波堤港内遮蔽域ではかなりゆるく、遮蔽域内と外の中間地帯では急となっている⁷⁾。来襲波の南防波堤による回折現象によって、港内では時計回りの循環流が発生しており、特に南防波堤対岸の遮蔽域内の海岸では、ほぼ汀線に沿って北上する流れが持続しているものと考えられる。この沿岸流は周囲の海浜変形と密接に関連しており、この流れは南防波堤の遮蔽域内と外の中間の海岸で洗掘した砂を南防波堤の遮蔽域内へ運搬する。この現象は 1973 年と 1977 年の深浅図を比較すると明確であるが^{1),8)}、ここでは 1969 年 12 月と 1975 年 1 月の航空写真を示す（写真-1）。これによると、本港南防波堤対岸では波の回折作用によって発生する循環流が、多量の砂を汀線に沿って輸送し、港内では砂の堆積のために汀線が大幅に前進している。図-3 は 1977 年 9 月 1 日に建設された防砂突堤による汀線変化を示す。前回報告したように本港内は定常的な循環流が存在し、防砂突堤周辺は南防波堤の遮蔽域内であることから、調査結果は

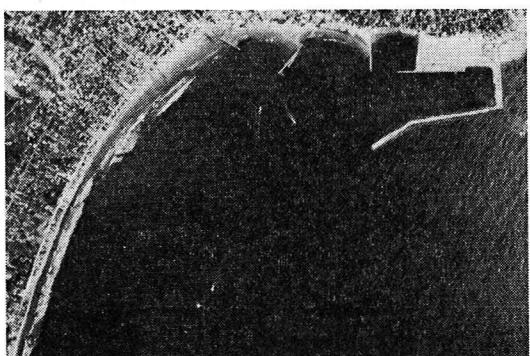


写真-1 (a) 航空写真的比較

* 正会員 Ph.D. 日本テトラポッド(株)

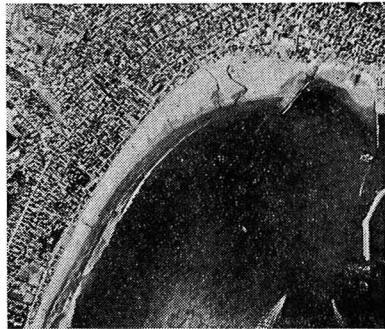


写真-1 (b) 航空写真的比較

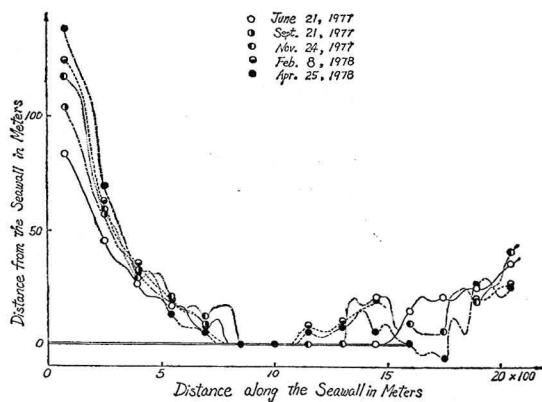


図-3 防砂突堤周辺の汀線変化

港内循環流の存在を証明し、汀線変化が主に沿岸流によることを説明する。写真-2 は防砂突堤周囲の汀線である。

3. 理論的解析

防砂突堤（護岸より 400 m 長）が建設された地点周辺の海岸では、南防波堤の影響により定常的な海浜流が汀線にはほぼ平行に流れている（図-2）。この防砂突堤長が、十分長くないならば、すなわち、防砂突堤に関してこの一様沿岸流の流れの場が上流側と下流側とで完全に分割されないならば、防砂突堤周囲の流況はポテンシャル流理論における一様流中に置かれた平板の回わりの流れに似ている⁹⁾。そこで一様流の流速を U 、平板の幅を $2l$ （防砂突堤長は l ）として流れの場を計算すると x 軸に

沿う流れは、

$$u(x) = -\frac{Ux}{\sqrt{x^2 + l^2}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

となる（図-4）。沿岸漂砂量 q_s は流れの加減速と関連

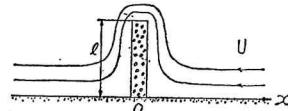


図-4 防砂突堤周辺の流れ

していると考えてつぎのように仮定する。すなわち、

$$q_s = C_s u(x)^n \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 C_s 、 n : 漂砂量に関係する定数である。もし、短期間における海浜変形（汀線変化）を議論するならば、沿岸漂砂量は平均流速 $u(x)$ の関数で表示できるが、汀線変化が大きくなった場合は、漂砂量は当然地形すなわち汀線の関数となる。もし、新汀線が旧汀線に平行にとった x 軸に対し Δx にわたる範囲で Δy 変化したならば、新しい汀線がもとの汀線となす角 $\Delta\theta$ は

$$\Delta\theta = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad \dots \dots \dots (3)$$

で与えられる（図-5）。汀線が変化する以前は、汀線に

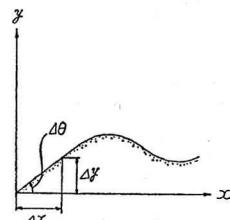


図-5 汀線変化の説明

沿う流速は $u(x)$ であるが、汀線が微小角 $\Delta\theta$ 傾くと、汀線に平行な成分は $u(x) \cos \Delta\theta$ 、垂直成分は $u(x) \sin \Delta\theta$ となる。 $\Delta\theta$ は地形変化による漂砂量への影響を考えることができる。そこで、漂砂量 q_s をつぎのように表示する。

$$q_s = C_s u(x) (\cos \Delta\theta + \alpha \sin \Delta\theta) \\ \approx C_s u(x) \left(1 + \alpha \frac{\partial y}{\partial x}\right) \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $|\Delta\theta| \ll 1$ 、 $n=1$ と仮定し、 α は沿岸流の流速



写真-2 防砂突堤周辺の汀線変化の写真 (1978 年 4 月 28 日)

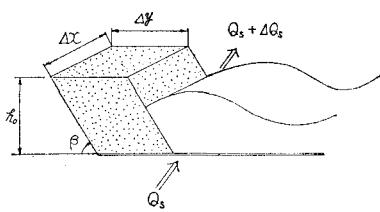


図-6 海浜変形の模式図

の汀線に対して垂直な成分に対する沿岸漂砂量への寄与を示す定数である。図-6を参照して砂の連続式を導くと

$$h_0 \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

となる。ここで、 y は汀線位置、 h_0 は漂砂移動が発生していると考えられる範囲までの水深、 t は時間、 Q_s は全沿岸漂砂量である。 Q_s は q_s を利用してつぎのように表示する。

$$Q_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{h_0^2}{\tan \beta} q_s \quad (6)$$

ここで、 β =砂浜勾配。式(4)を式(6)に代入し、さらに、それを式(5)に代入すると、

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{h_0}{2 \tan \beta} \cdot \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

一般に $h_0, \tan \beta$ は汀線に沿って変化する、すなわち、 x の関数であるが、ここでは一定と仮定した。式(4)を代入して

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{C_s h_0}{2 \tan \beta} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left[u(x) \left(1 + \alpha \frac{\partial y}{\partial x} \right) \right] = 0 \quad (8)$$

防砂突堤を建設したときは汀線変化はまだ発生していないので、

$$t=0: \quad y=0 \quad (9)$$

そして、防砂突堤で漂砂が完全に阻止されていると考えると、

$$x=0: \quad q_s=0 \quad \text{すなわち} \quad \frac{\partial y}{\partial x} = -\frac{1}{\alpha} \quad (10)$$

境界条件(10)は図-4より考えるとほぼ満足されていると思われる。式(8)に式(1)を代入し、変数 x と y を防砂突堤施工時の有効長 l (汀線より防砂突堤先端までの距離)で無次元化する。そのとき、

$$x=lx*, \quad y=ly* \quad (11)$$

で、式(8)は

$$\begin{aligned} \frac{\partial y*}{\partial t} &= \frac{C_s U h_0}{2 l \tan \beta} \left[\frac{1}{(1+x_*^2)^{1.5}} \right. \\ &\quad \left. + \alpha \frac{\partial}{\partial x_*} \left\{ \frac{x_*}{\sqrt{1+x_*^2}} \cdot \frac{\partial y*}{\partial x_*} \right\} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

となる。式(12)の解析解を求めるのは容易でないので、 $x_* / \sqrt{1+x_*^2}$ が、 $0 < x_* < +\infty$ でほぼ一定で α_* / α に等しいと仮定する。その結果、式(12)は式(13)のよう簡略化できる。

$$\frac{\partial y*}{\partial t} = f(x_*) + a^2 \frac{\partial^2 y*}{\partial x_*^2} \quad (13)$$

$$\text{ここで, } f(x_*) = \frac{C_s U h_0}{2 l \tan \beta} \cdot \frac{1}{(1+x_*^2)^{1.5}},$$

$$a^2 = \frac{C_s U h_0}{2 l \tan \beta} \alpha_*$$

式(13)を解くために、関数 $y*=v+w$ を考え、各々関数 v と w はつぎの方程式と初期条件を満足するものとする。

$$(I) \quad \frac{\partial v}{\partial t} = f(x_*) + a^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x_*^2} \quad (14)$$

$$t=0: \quad v=0$$

$$(II) \quad \frac{\partial w}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x_*^2} \quad (15)$$

$$t=0: \quad w=0$$

また、境界条件を満たすために関数 v と w は

$$\frac{\partial y*}{\partial x_*} \Big|_{x=0} + \frac{1}{\alpha} = 0 \quad (16)$$

の境界条件によって結びつけられている。(I)の解は、

$$\begin{aligned} v(x_*, t) &= \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi_1) \frac{1}{2a\sqrt{\pi(t-\tau)}} \\ &\quad \times \exp \left\{ -\frac{(\xi_1 - x_*)^2}{4a^2(t-\tau)} \right\} d\xi_1 d\tau \end{aligned} \quad (17)$$

である。未知関数 $\psi(t)$ を用い、(II)を境界条件

$$w|_{x_*=0} = \psi(t) \quad (18)$$

のもとで解くと、

$$w(x_*, t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{x_*}{2a\sqrt{t}}}^{\infty} \phi \left(t + \frac{x_*^2}{4a^2 \xi^2} \right) \exp(-\xi^2) d\xi \quad (19)$$

となる。関数 $\phi(t)$ は条件(16)を用いると、計算でき、

$$\begin{aligned} \phi(p) &= a \sqrt{\frac{\pi p}{2}} \left[\int_0^{p/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi_1) \frac{\xi_1}{a \sqrt{\pi(p/2 - \tau)}} \right. \\ &\quad \left. \times \exp \left\{ -\frac{\xi_1^2}{4a^2(p/2 - \tau)} \right\} d\xi_1 d\tau + \frac{1}{\alpha_*} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

となる。従って、解 $y_*(x_*, t)$ は、式(16)、(18)、(19)を用いると

$$\begin{aligned} y_*(x_*, t) &= \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\xi_1)}{2a\sqrt{\pi(t-\tau)}} \\ &\quad \times \exp \left\{ -\frac{(\xi_1 - x_*)^2}{4a^2(t-\tau)} \right\} d\xi_1 d\tau \\ &\quad + \frac{a}{\alpha_*} \int_{\frac{x_*}{2a\sqrt{t}}}^{\infty} \sqrt{2 \left(t + \frac{x_*^2}{4a^2 \xi^2} \right)} \\ &\quad \times \exp(-\xi^2) d\xi \end{aligned} \quad (21)$$

式(21)を簡略化する時に、 $f(\xi_1)$ が偶関数であることを用いた。式(21)において第1項は沿岸流による汀線変化を示し、第2項は防砂突堤による遮蔽効果を示すものと考えられる。従って、式(21)から a と $f(x_*)$ の

値が汀線変化に顕著な影響を及ぼしている。

4. 結果と考察

防砂突堤建設後まもなくの時期を考えると、上式において第 1 項が卓越する。ゆえに、

$$\begin{aligned} y_*(x_*, t) &\cong \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\xi_1)}{2a\sqrt{\pi(t-\tau)}} \\ &\times \exp \left\{ -\frac{(\xi_1-x_*)^2}{4a^2(t-\tau)} \right\} d\xi_1 d\tau \\ &\cong \int_0^t \frac{f(x_*)}{2a\sqrt{\pi(t-\tau)}} d\tau \\ &= \frac{\sqrt{t} f(x_*)}{2a\sqrt{\pi}} = \frac{a\sqrt{t}}{2\sqrt{\pi}\alpha_*(1+x_*^2)^{1.5}} \end{aligned} \quad \dots \quad (22)$$

となる。式(22)から汀線変化すなわち $f(x_*)$ は沿岸流の場所による変化率と経過時間の平方根に比例することが求まる。図-7 は現地海浜の汀線変化と $1/(1+x_*^2)^{1.5}$

After Construction of Groin
 ● 8 mon.
 ○ 1 mon.

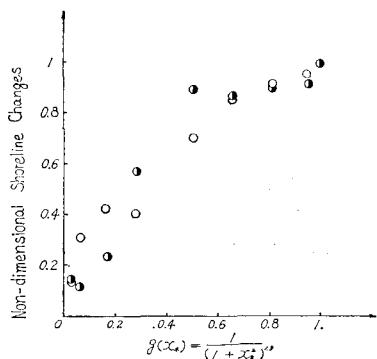


図-7 汀線変化と $g(x_*)$ の関係

の関係をプロットしたものであり、防砂突堤建設後 1 ヶ月では両者の関係は式(22)をほぼ満足する。しかし、8 ヶ月後では式(22)がもはや成立しないことがわかる。つぎに式(21)において、防砂突堤付近の汀線変化について考察する。この場合 $x_* \cong 0$ だから、式(21)は

$$\begin{aligned} y_*(0, t) &\cong \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\xi_1)}{2a\sqrt{\pi(t-\tau)}} \\ &\times \exp \left\{ -\frac{\xi_1^2}{4a^2(t-\tau)} \right\} d\xi_1 d\tau \\ &+ \frac{a}{\alpha_*} \int_0^t \sqrt{t} \exp(-\xi^2) d\xi \\ &\cong \int_0^t \frac{1}{2a\sqrt{\pi(t-\tau)}} \cdot \frac{C_s h_0}{2l \tan \beta} d\tau + \frac{a}{\alpha_*} \sqrt{\frac{\pi t}{2}} \\ &= \frac{a}{\alpha_*} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \right) \sqrt{t} \end{aligned} \quad \dots \quad (23)$$

となる。式(23)は防砂突堤基部の汀線変化が経過時間の平方根に比例することを示す。図-8 は現地防砂突堤

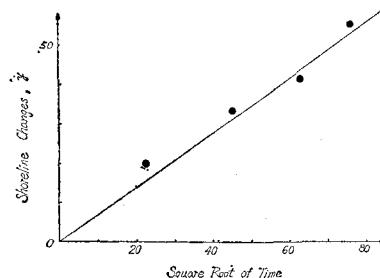


図-8 汀線変化と \sqrt{t} の関係

基部の汀線変化と \sqrt{t} の関係を示すが、式(23)をほぼ満足する。以上の事実より、汀線変化は沿岸流流速が大のほど、 h_0 が大きいほど、 $\tan \beta$ が小さいほど、防砂突堤長が長いほど顕著となる。すなわち、沿岸流が速く、漂砂の影響が深く及ぶ緩い前浜勾配の海岸では突堤に堆積する砂量は大きい。また、突堤長が長いほど遮蔽効果が良好であることを示す。最後に、現地汀線と式(21)によって計算した汀線とを図-9 で比較する。計算では

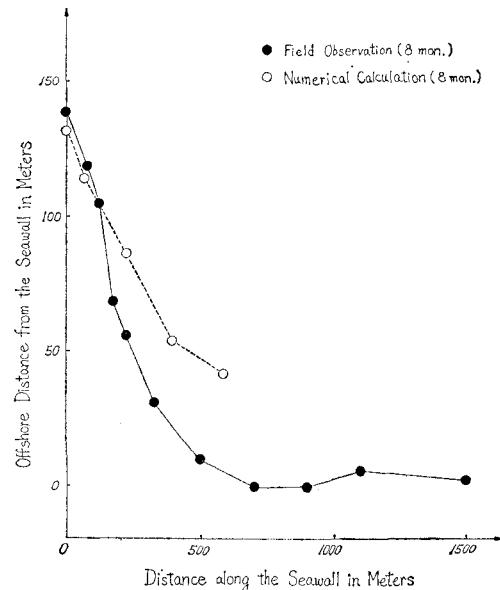


図-9 汀線変化の予測と現地データとの比較

沿岸流は上流からほぼ一定の漂砂を常に輸送しているが、これが現地海浜の現象と一致していないために、防砂突堤から離れるに従って両者の差は著しくなる。また、数値計算のために防砂突堤建設以前は、旧磯浜港前の汀線が 3.5 年間で約 120 m 前進^{1), 8)}したことから式(22)を使って

$$a/\alpha_* = 0.3786$$

を求め、さらに、防砂突堤基部の $\partial y / \partial x$ を用いて α_* を

求めた。

最後に、本研究に対し御助言をいただいた、運輸省港湾技術研究所、佐藤次長および、現地資料の提供をしていただいた、茨城県三浜港湾事務所、鶴川主幹に深謝致します。

参考文献

- 1) 荒木田哲也、鶴川義郎、水村和正: 防波堤背後の流況と汀線変化(1), 第25回海講論文集, pp. 199-203, 1978.
- 2) Gourlay, M. R.: Wave set-up and wave generated currents in the lee of a breakwater or headland, 14th Conf. on Coastal Eng., pp. 1976-1995, 1974.
- 3) Gourlay, M. R.: Non-uniform alongshore currents, 15th Conf. on Coastal Eng., pp. 701-720, 1976.
- 4) 橋本 宏、宇多高明: 海浜流の数値計算法とその応用, 第21回海講論文集, pp. 355-360, 1974.
- 5) Liu, P. L. F. and Mei, C. C.: Water motion on a beach in the presence of a breakwater, 2. Mean currents, Jour. of Geophy. Res., pp. 3085-3094, 1976.
- 6) Shiraishi, N. and Mizumura, K.: Shoreline changes in the lee of a breakwater, Coastal Zone, pp. 1401-1419, 1978.
- 7) Mizumura, K.: Littoral currents and characteristics of beaches around breakwaters, Coastal Structure 79, 1979.
- 8) 水村和正: 大洗港周辺の海浜変形について, 第15回自然災害科学総合シンポジウム, pp. 593-596.
- 9) たとえば、椎貝博美著: 流体力学演習, 朝倉, 150 p. 1968.