

津波によりもたらされた河口周辺凹状侵食地形の回復過程 に関する理論的研究

Vo Cong HOANG*・田中 仁*・三戸部佑太*

1. はじめに

2001年3月11日に発生した東日本大震災津波の際に見られた特徴的な地形変化として、河口砂州のフラッシュや、ラグーン地形の消失により凹型地形が形成されたことが挙げられる (Tanaka et al.¹⁾, Udo et al.²⁾)。また、その後の回復過程における課題として、以前の河口地形に戻らない河川が多く見られることや、たとえ地形が戻った河口においても、凹型の侵食地形を周辺海浜砂で埋め戻すために周辺において深刻な侵食が見られることが挙げられる (Hoang ら³⁾)。このような現象は河口周辺を取り巻く局所的な課題ではなく、広域的な漂砂系の変容をもたらしつつあることが指摘されている (Hoang ら⁴⁾)。今後、東海・東南海・南海地震などによる津波がもたらすであろう河口・海浜過程を理解するためにも、東日本大震災津波によって発生した海浜地形変化が最終的にどのような平衡地形に移行するかを把握することは実務上もきわめて重要である。

そこで、本研究においては宮城県七北田川河口および赤井江において観測された2011年東日本大震災津波後の地形回復状況を報告するとともに、河口周辺の砂浜の長さが地形回復に及ぼす効果をワンラインモデルによる解析的な扱いにより検討した。これにより、河口地形の回復に対して周辺海浜の砂供給環境ならびに漂砂量係数が大きな影響を有していることが明らかになった。

2. 研究対象

本研究における研究対象領域を図-1に示す。対象河川は七北田川と、厳密には河川ではないものの、津波の影響により砂浜が決壊し、一時的に河口・ラグーン地形を呈した宮城県岩沼市赤井江も研究対象としている。

七北田川は宮城県仙台市に位置し、幹川流路延長45km、流域面積229.1km²の二級河川である。河口左岸には蒲生干潟があったが、東日本大震災津波によりラグーンと海を隔てる砂浜が完全に決壊し、以前の干潟内に砂が持ち込まれた。その後、河口閉塞、人工開削などの地形変遷を経た (Tanaka et al.⁵⁾)。

赤井江は仙台空港より南に約2.5kmに位置する。以前は海域と連結する潟湖であったが、その後、海域からは分離され、低平地からの排水は貞山運河を通じて名取川と阿武隈川を経て海に注いでいたが、津波により砂丘部の決壊が生じた (Tanaka et al.⁶⁾)。

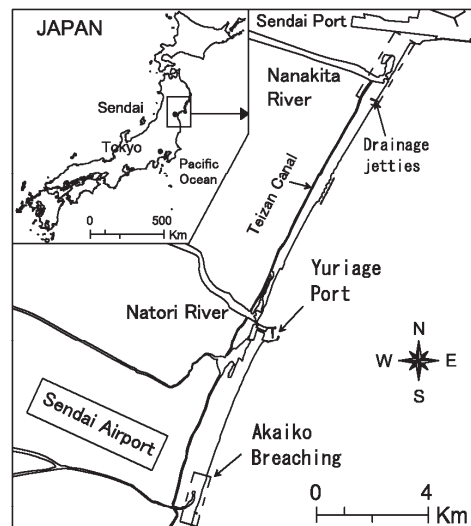


図-1 研究対象河川

*東北大学大学院工学研究科

3. 地形回復過程の特徴

図-2には七北田川における河口周辺汀線の変化を示す。北側の砂浜端部である仙台港防波堤から、南側の端部である南蒲生浄化センター排水口導流堤までの区間について示している。仙台湾に位置する河口地形の特徴の一つは河口近くのラグーンが存在である。七北田川河口も例外でなく、左岸に蒲生干潟が存在した。津波によりこのラグーンが消滅した。また、河口砂州も完全にフラッシュされた。その後の河口地形の回復に関しては Tanaka et al.⁵⁾ に詳しい。近似的に見れば凹型の地形

が形成され、その後の地形回復には凹部左右岸の海浜砂が貢献しているため、周辺海浜での汀線後退が著しい。

図-3に示した赤井江には以前河口地形が存在したが、近年は閉塞し、連続的な海岸堤防が築かれていた。津波によりこの旧川の箇所にはブリーチングが生じた (Tanaka et al.⁶⁾)。その後、七北田川・蒲生干潟と同様に侵食地形の回復が見られた。やはり、近似的には凹型の侵食地形が形成され、その後、周辺からの沿岸漂砂の輸送により凹型地形が埋め戻されていることが分かる。

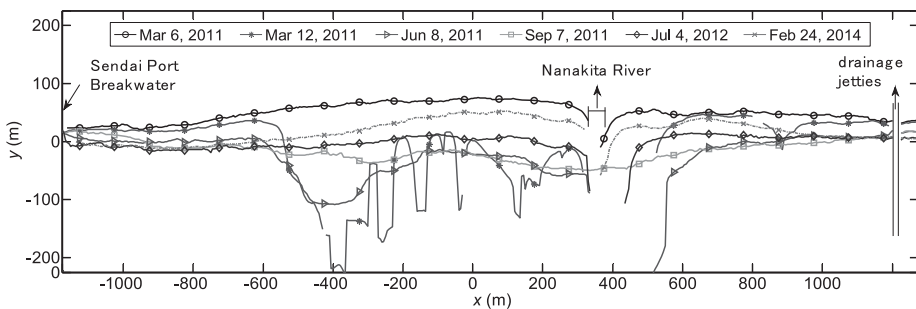


図-2 七北田川・蒲生干潟における地形回復

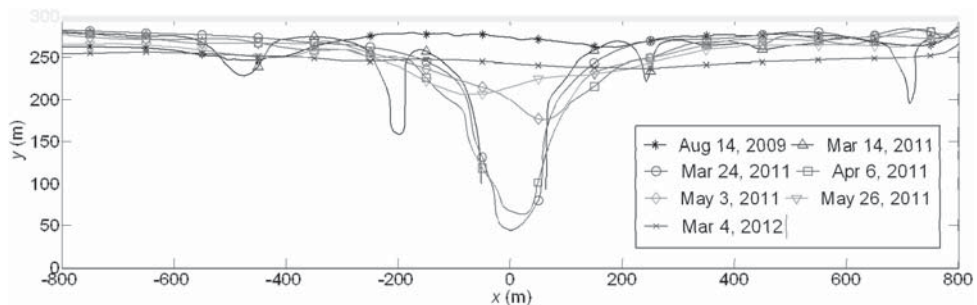


図-3 赤井江における地形回復

4. 凹型侵食地形に対するワンラインモデルの解とその特性

(1) 基本方程式と解

上述の通り、七北田川河口部・蒲生干潟および赤井江において凹型の侵食地形が共通して見られた。また、周辺海浜から沿岸方向に漂砂移動が生じて地形の回復が生じた点も共

通している。そこで、ここではワンラインモデルによるモデル化を行うこととし、津波後の侵食地形を図-4の様に単純化して与える。

ワンラインモデルの基礎式は以下の拡散方程式で近似されることが知られている。

$$\frac{\partial y}{\partial t} = e \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここで、 y : 汀線位置、 t : 時間、 x : 沿岸方

向座標, ε : 拡散係数である。拡散方程式に対しては様々な初期条件・境界条件に対する解が古くから検討されている (例えば, Barrier⁷⁾, Crank⁸⁾)。この知見を応用して, ワンラインモデルの解析的な解が得られている (例えば, Larson et al.⁹⁾, Larson et al.¹⁰⁾)。

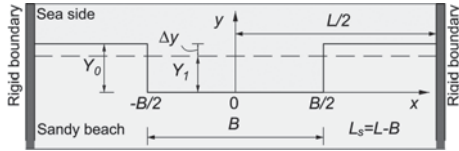


図-4 津波によりもたらされた凹型侵食地形の模式図

ここで, まず砂浜端部に構造物などが存在せず, 無限長の砂浜域が存在するとすれば, 凹型地形のその後の汀線変化は次式で与えられる (Larson et al.⁹⁾)。

$$y = \frac{1}{2} Y_0 \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{B-2x}{4\sqrt{\varepsilon t}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{B+2x}{4\sqrt{\varepsilon t}} \right) \right] \quad (2)$$

ここで, Y_0 : 有限幅侵食部の岸沖方向長さ, erfc : 余誤差関数, B : 凹部侵食域の幅である。

一方, 現実的には図-2の様に周辺海浜の長さは有限長であることから, 図-4の様に海浜長 L の対象域を考えることとすれば, 凹型地形のその後の汀線変化は次式で与えられる。

$$y = Y_0 \left[1 - \frac{B}{L} \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi B}{L} \exp \left(-\frac{4\varepsilon n^2 \pi^2 t}{L^2} \right) \cos \frac{2n\pi x}{L} \right] \quad (3)$$

式 (2), (3) に対して無次元化を施せば, それぞれに対して下記の式が得られる。

$$y^* = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{B^*-2x^*}{4\sqrt{t^*}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{B^*+2x^*}{4\sqrt{t^*}} \right) \right] \quad (4)$$

$$y^* = \left[1 - \frac{1}{L^*} \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi}{L^*} \exp \left(-\frac{4n^2 \pi^2 t^*}{L^{*2} B^{*2}} \right) \cos \frac{2n\pi x^*}{L^* B^*} \right] \quad (5)$$

ここで, 式中の無次元数は下記の様に定義されている。

$$y^* = \frac{y}{Y_0} \quad (6)$$

$$x^* = \frac{x}{Y_0} \quad (7)$$

$$t^* = \frac{\varepsilon t}{Y_0^2} \quad (8)$$

$$B^* = \frac{B}{Y_0} \quad (9)$$

$$L^* = \frac{L}{B} \quad (10)$$

以下では, 式 (4), 式 (5) をもとに凹型侵食地形の回復過程における周辺砂浜長 ($L_s=L-B$) の影響について定量的な評価を行う。

(2) 解の特性

ここでは, 図-2, 図-3に示した七北田川・蒲生干潟および赤井江における事例を想定して, Case 1 (七北田川・蒲生干潟): $B=1040\text{m}$, $L_s=1310\text{m}$ (図-5参照), Case 2 (赤井江): $B=120\text{m}$, $L_s=1480\text{m}$ (図-6参照) の二つのケースに対して, 式 (2) および式 (3) を用いて計算を行った。なお, 七北田川・蒲生干潟については図-5に示すように凹型侵食をはさんでほぼ等距離のところに沿岸漂砂を遮断する構造物があるが, 図-6に示す赤井江についてはブリーチングをはさんで砂浜長が非対称であり, 左岸側は閑上港防波堤まで約 6km の砂浜が続く。ここでは, 簡単のために右岸側の境界と対象な位置に左岸構造物があると仮定してモデルを適用した。

式 (1) 中の拡散係数 ε は次式の様 に漂砂量係数 K と結びついており, 砂移動現象のタイムスケールを表現している。

$$\varepsilon = \frac{K(H^2 C_g)_B}{8} \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \frac{1}{1-n} \frac{1}{D_C + D_B} \quad (11)$$

ここで, H : 波高, C_g : 群速度であり, 添え字 B は碎波点での諸量を表す。さらに, ρ_s : 底質密度, ρ : 流体密度, n : 砂の空隙率, D_C : 漂砂の移動限界深さ, D_B : 砂浜のバーム高さである。Hoang ら³⁾ は津波被災後の侵食域の伝搬速度から, 七北田川河口部および赤井江に対して, それぞれ $320\text{m}^2/\text{day}$ および $340\text{m}^2/\text{day}$ の値を得ている。以下ではこれの係数を用いた。なお, 仙台海岸における漂砂量係数 K の値として, 真野ら¹¹⁾ は $K=0.03$ を得ている。式 (11) に従って真野ら¹¹⁾ の K 値を ε に変換すれば $\varepsilon=280\text{m}^2/\text{day}$ となり, 上

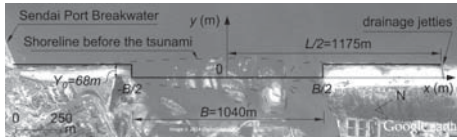


図-5 Case 1 (七北田川・蒲生干潟)における侵食地形

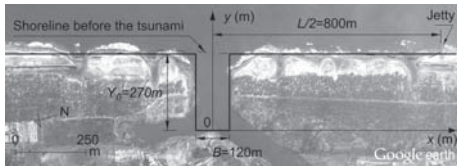


図-6 Case 2 (赤井江)における侵食地形

記の Hoang ら³⁾の値ときわめて近い値であることを確認した。

図-7には式(2)、式(3)によるCase 1での初期地形からの回復過程を示している。 $t=515$ 日までの初期の段階では凹部での汀線回復過程について両者に差は見られない。ただし、砂浜部においてはすでに違いが見られている。その後、二つの解で差が顕在化し、式(3)による解は $t=1755$ 日においてほぼ直線的な最終地形に到っているのに対して、式(2)による解ではこの時点でいまだに凹地形が残存し、最終地形に到るまでにより長

い時間を要している。

二つの解に見られるもう一つの大きな相違点は、最終汀線位置についてである。すなわち、式(2)において $t \rightarrow \infty$ とすれば $Y_1=Y_0$ を得るが、式(3)からは次式が得られる。

$$Y_1 = \frac{Y_0(L-B)}{L} \quad (12)$$

すなわち、凹部への砂供給範囲が有限である場合、最終汀線は初期汀線に比べて後退することが分かる。この点が式(2)による解との大きな相違点である。なお、式(12)は底質の保存則からも容易に求めることが出来る。

このような相違を踏まえ、図-7における凹部中央部($x=0m$)および端部境界($x=L/2$)における汀線位置の時間変化を図-8に示した。 $x=0m$ においては上述の通り、式(3)の解では $t=2000$ 日程度でほぼ最終汀線位置 Y_1 に回復しているのに対して、式(2)では $t=10 \times 10^4$ 日においても依然増加傾向を示し、最終地形に到るにはさらに長い時間を要することが分かる。また、 $x=L/2$ においても、式(3)の解では $t=2000$ 日でほぼ最終汀線位置 Y_1 に回復している。一方、式(2)では $t=10 \times 10^4$ 日においても汀線の変化が見られ、 Y_0 まで回復していない。

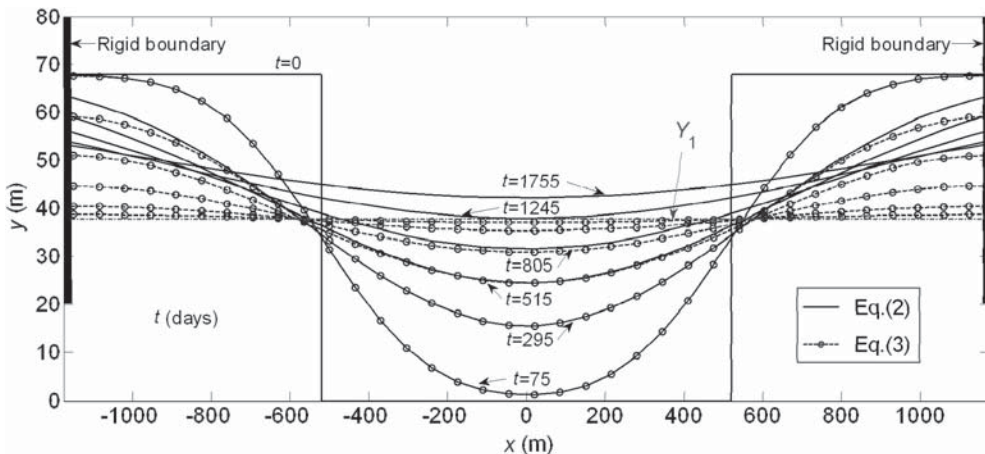
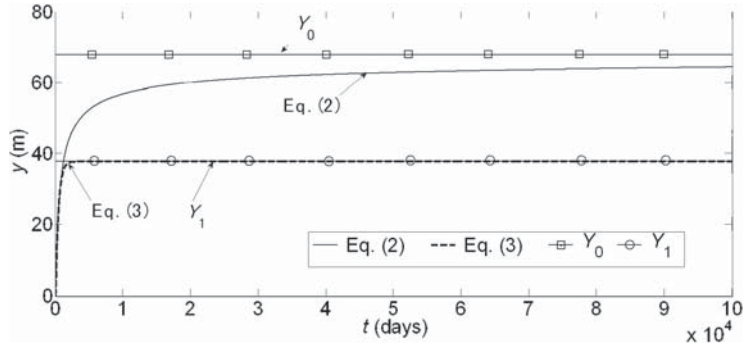
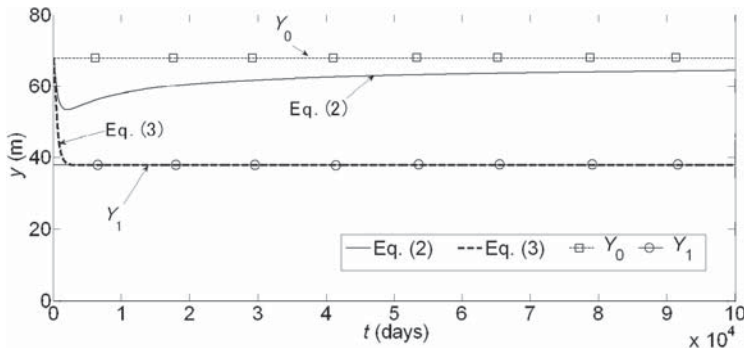


図-7 Case 1 (七北田川・蒲生干潟)に対する計算結果



(a) $x=0$ における汀線変化



(b) $x=L/2$ における汀線変化

図-8 Case 1 (七北田川・蒲生干潟) での汀線変化

一方, Case 2 (赤井江) についても同様な図を図-9, 図-10 に示している。このケースでは L_s に比べて B が小さいために, 図-9,

図-10 の汀線形状において二つの解はきわめて類似した特性を示している。

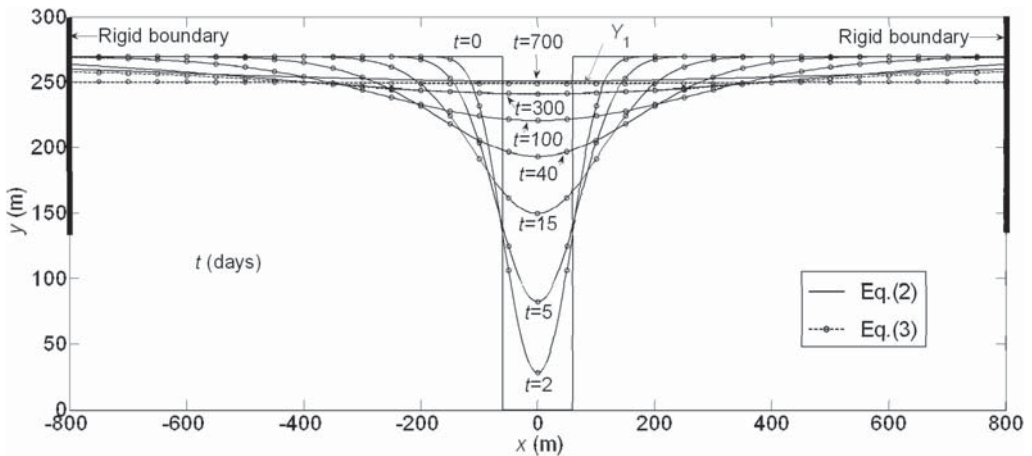
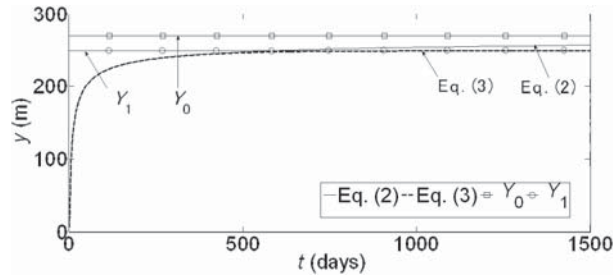
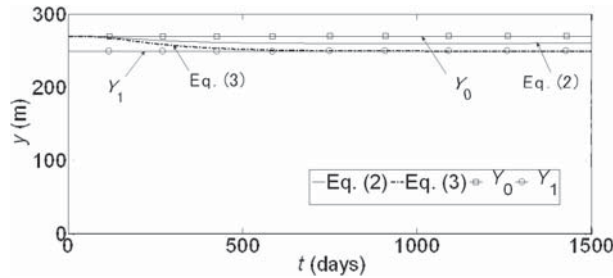


図-9 Case 2 (赤井江) に対する計算結果



(a) $x=0$ における汀線変化



(b) $x=L/2$ における汀線変化

図-10 Case 2 (赤井江) での汀線変化

(3) 凹型侵食地形の回復時間に関する考察

津波による侵食地形がどの程度の時間をかけて回復するかを推定することは実務的に重要な事柄である。また、上述の考察によれば、砂浜端部の有無に応じてその時間に大きな差違が見られる。そこで、より現実的な式 (3)、式 (5) をもとにこの点について考察を行う。

式 (3)、式 (5) は指数関数で表わされた解であることから、理論的に言えば汀線の回復のためには無限の時間を要する。そこで、 $x=0$ における汀線位置が $t=\infty$ での汀線位置 (式 (12)) の 99% に至る時間を以て汀線が回復したものとし、この時刻を T_e とする。

また、凹部侵食域への沿岸漂砂供給源の長さとして、次式の L_s を用いる (図-4 参照)。

$$L_s = L - B \tag{13}$$

以上の仮定をもとに、式 (5) から次の解を得ることが出来る。

$$0.99 \left(\frac{L_s^*}{L_s^* + 1} \right) = 1 - \frac{1}{L_s^* + 1} \cdot \left[2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi}{L_s^* + 1} \exp(-4n^2 \pi^2 T_e^*) \right] \tag{14}$$

ここで、式中の無次元量の定義は次式である。

$$L_s^* = \frac{L - B}{B} \tag{15}$$

$$T_e^* = \frac{\varepsilon T_e}{L^2} \tag{16}$$

式 (14) による計算結果を図-11 に示している。これによれば、無次元の汀線回復時間 T_e^* は無次元砂浜長さ L_s^* のみの関数として表され、漂砂の供給源が長いほど、また拡散係数 (漂砂量係数) が大きいほど短い時間で汀線の回復に至ることが分かる。

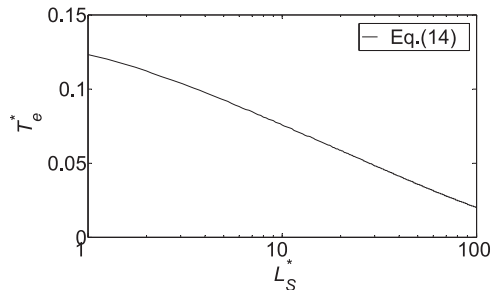


図-11 汀線の回復に要する時間の解析解

5. ワンラインモデルの解と現地資料の比較

二つの研究対象における凹型地形の回復過程について、理論(式(2)、式(3))と実測との比較を行った。七北田川・蒲生干潟、および赤井江における結果をそれぞれ図-12、図-13に示す。ここでは、凹部中心位置($x=0\text{m}$)における回復過程を図示している。この程度の時間では、二つの解に差はほとんど見られない。また、実測と理論は良好な一致を示している。

なお、以上に示したワンラインモデルの解において Y_0 の値を負値とすれば、凸地形の長方形養浜を行った際の解に対応する。無限領域を対象とする式(2)の長方形養浜に対する解に関してはDean¹²⁾により詳細な検討がなされている。ただし、実際の養浜に当たっては突堤などの構造物とセットで実施される場合も多い(例えば、宇多・石川¹³⁾)。このような場合には、式(3)に基づいて検討を行わなければならない。この時、式(12)が最終的な汀線位置に対応する。

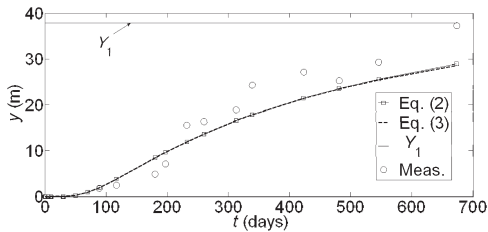


図-12 Case 1 (七北田川・蒲生干潟)での汀線回復過程に関する理論と実測との比較

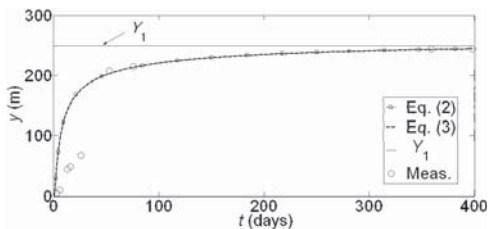


図-13 Case 2 (赤井江)での汀線回復過程に関する理論と実測との比較

6. おわりに

本論文においては、津波によりもたらされた河口周辺凹状侵食地形の回復過程に関して、ワンラインモデルに基づく解析解による理論的考察を行った。その結果、凹状侵食地形の回復には周辺砂浜の長さが大きな影響を有していることが明らかになった。また、ここで得られた解析解は長方形養浜を行った際の解にも対応するものであり、養浜後の汀線変化などの予測にも使用することが出来る。その点については別報にて報告を行う予定である。

謝辞：本研究を行うにあたり、(財)河川環境管理財団河川整備基金の助成を受けた。ここに記して深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) Tanaka, H., Tinh, N. X., Umeda, M., Hirao, R., Pradjoko, E., Mano, A. and Udo, K.: Coastal and estuarine morphology changes induced by the 2011 Great East Japan earthquake tsunami, *Coastal Engineering Journal*, Vol.54 (1), 2012.
- 2) Udo, K., Sugawara, D., Tanaka, H., Imai, K. and Mano, A.: Impact of the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami on beach morphology along the northern Sendai Coast, *Coastal Engineering Journal*, Vol.54 (1), 2012.
- 3) Vo Cong Hoang・田中 仁・三戸部佑太：津波により侵食された河口部の sink 効果による周辺海浜での汀線後退，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. B2-70, pp. I_506- I_510, 2014.
- 4) Vo Cong Hoang・三戸部佑太・田中 仁・Nguyen Trung Viet：津波来襲後の広域漂砂系の変容，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.B2-70, pp.I_521-I_525, 2014.
- 5) Tanaka, H., Adityawan, M. B. and Mano, A.: Morphological changes at the Nanakita River mouth after the Great East Japan Tsunami of 2011, *Coastal Engineering*, Vol.86,

- pp.14-26, 2014.
- 6) Tanaka, H., Adityawan, M. B., Udo, K. and Mano, A.: Breaching and tsunami water drainage at old river mouth locations during the 2011 Tsunami, Proceedings of 34th International Conference on Coastal Engineering, 2014.
 - 7) Barrer, R. M.: *Diffusion in and through Solids*, Cambridge University Press, 1941.
 - 8) Crank, J.: *The Mathematics of Diffusion*, Clarendon Press, 1975.
 - 9) Larson, M., Hanson, H. and Kraus, N. C.: Analytical solutions of the one-line model of shoreline change, *Technical Report CERC-87-15, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station*, 1987.
 - 10) Larson, M., Hanson, H. and Kraus, N. C.: Analytical solutions of one-line model for shoreline change near coastal structures, *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering*, Vol.123, No.4, pp.180-191, 1997.
 - 11) 真野 明・Muhammad Hasanudin・沢本正樹：沿岸漂砂量公式に用いる年平均波，海洋開発シンポジウム論文集，第 21 卷，pp.55-59, 1996.
 - 12) Dean, R.: *Beach Nourishment -Theory and Practice-*, World Scientific, 420p, 2003.
 - 13) 宇多高明・石川仁憲：実務者のための養浜マニュアル，土木研究センター，178p, 2005.