

高波浪時の越波による海浜地形変化

永澤 豪*・田中 仁**

1. はじめに

海浜上において砂浜の高さが十分発達している場合、越波が生じることは極めて稀である。しかし、背後に干潟を持つようなバリアーでは砂浜の高さが十分発達せず、高波浪時にしばしば越波が生じる。生じた越波は海浜の土砂を運搬し、海浜の後背地に被害をもたらす。従って、越波の実体を捉えて海浜を保全することが重要となる。

本研究では、宮城県仙台市七北田川左岸から仙台港までの海浜において、1998年9月15日から16日にかけて日本を襲った台風5号による高波浪を対象に、その越波の海浜地形への影響について詳細に現地調査を行った。また、台風通過時の波浪データを入手・解析し、越波の様子について考察を行った。

2. 調査概要

(1) 台風5号による高波浪

1998年9月15日から16日にかけて日本を襲った台風5号は16日10:00には福島県付近を通過し、16日13:00には宮城県・岩手県県境付近に達した。その後、青森、北海道を通過し、17日未明に温帯低気圧に変化した(図-1天気図)。この台風5号は、16日の中心気圧は

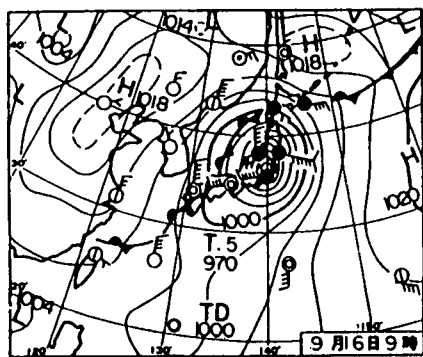


図-1 天気図 (1998年9月16日9時)

970 hPa ほどで、風速 30 m/s の暴風域を持ちながら東北地方を通過し、甚大な被害をもたらした。台風が通過した16日、運輸省によると、仙台港付近では波高が最大7 mにも達したとされ、蒲生干潟の最奥部(北側)で干潟と海を分けている海浜を越えて海水が干潟に流れ込んだ。

(2) 調査海浜

調査を行った海浜は、宮城県仙台湾の仙台港から七北田川河口左岸までの全長約1 kmの海浜である。この海浜は、後背地に野鳥の宝庫として有名な蒲生干潟を抱え、蒲生干潟と太平洋を隔てる幅100~350 mのバリアーとなっている。図-2に調査海浜の概略図を示す。

蒲生干潟は元々七北田川の河道であり、仙台港の築港に伴い河口が現在の位置に導流堤によって固定された。また、仙台港南防波堤の伸長に伴い、防波堤基部から南側2 kmに渡って侵食が生じ、汀線が後退した。これは森

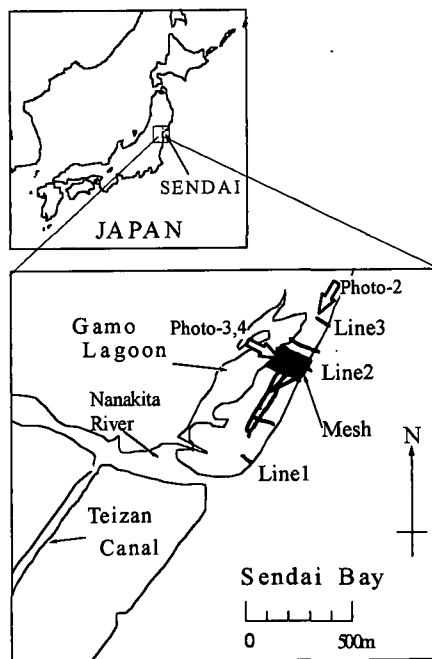


図-2 調査海浜概略図

* 学生会員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
** 正会員 工博 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻

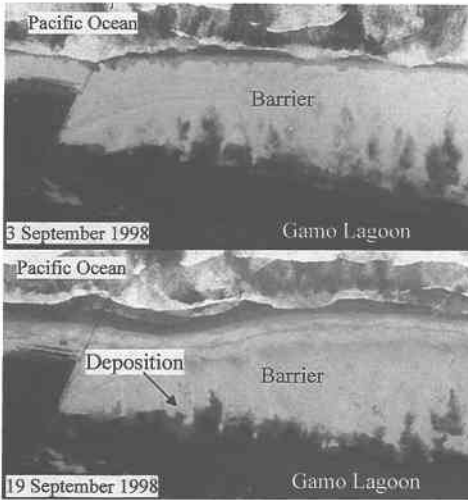


写真-1 1998年台風5号通過前後の調査海浜

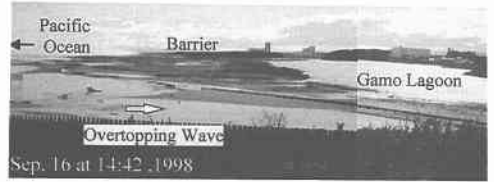


写真-2 越波の様子 (1)



写真-3 越波の様子 (2)



写真-4 越波の様子 (3)

下ら (1995) によれば、仙台港南防波堤の反射波による侵食とされている。そのため、仙台港南防波堤に近い干潟最奥部のバリアーの幅が小さくなっている。従って、この海浜を高波浪が襲うと、干潟の最奥部において越波が生じ、蒲生干潟内に土砂が流入・堆積するという現象が見られる。1988年から1998年までの航空写真によると、越波による干潟内及び海浜上への堆積が認められるのが9ケースあった。これらのような後背地への大規模堆積が起きると蒲生干潟の面積が減少し、干潟内の生態系に大きな影響があると思われる。次に、1998年台風5号による高波浪前後の航空写真を写真-1に示す。これを見ると、干潟最奥部に、小規模な堆積が認められる。また、海浜の植生部上にも土砂の堆積が認められる。

本研究では、台風5号通過時の1998年9月16日、及び台風通過後の9月21日に調査を行った。特に21日の調査では、図-2に示すように、海浜にメッシュ状の測点を設けて詳細に地形を調査し、あわせて海浜の縦断・横断断面の測量を実施した。また、その後に植生分布の調査も行った。

3. 調査結果

(1) 越波時の海浜の状況

台風が宮城県を通過した9月16日に現地踏査を行った。写真-2は仙台港側から南を向いて撮影したものである(図-2, Photo-2 矢印)。これを見ると、撮影時、高波浪のピークを過ぎているものの(図-5, Photo-2, 3, 4, 5)、蒲生干潟と海域を隔てているバリアー上を越波した波が干潟へと流入している様子がわかる。写真-3は、海浜上から、写真-4は蒲生干潟から、それぞれ波の入射してくる方向(東方向)を向いて撮影したものである(図-2, Photo-3, 4 矢印)。これから、越波した波は海浜全面を越波するわけではなく、植生に覆われた耐侵食性の高い隆起の間を通過してくることがわかる。また、その間隔は規則性を持っているように見える(写真-4)。このようにバリアー頂部を越えた波は、海浜が干潟の方に下っているために海浜上を流れて蒲生干潟に流入する(写真-5)。この流入によって大量の土砂が干潟内に運搬され、写真-1にみられたような堆積地形を形成した(写真-6)。



写真一五 蒲生干潟への流入状況



写真一六 蒲生干潟内での土砂堆積

(2) 越波後の海浜地形

越波後の海浜地形平面図及び植生分布図を図-3 に示す(図-2のメッシュ部分)。海浜は海に面した前浜の勾配がきつく、中央部分で頂部を迎えて蒲生干潟の方に緩やかに下っている。また、海浜の最も高い部分には島状に高くなった部分が規則的の間隔で分布しているのがわかる。このような地形は、Ritchie・Penland (1990) の分類では Dune Terrace にあたる。茂木 (1971) によれば、高潮や暴浪によって後浜にカスパ地形ができる場合があり、その大きさは碎波波高、浜の傾斜、構成物質の粒径等に支配されるといわれるがその形成機構は明らかではないとある。ここで、仙台港の平均波高 0.81 m、周期 7.9 s を用いて武田・砂村 (1982) の式からカスパ間隔を求めると 54 m となる。これは島状の隆起間隔の実測値(約 40 m) にオーダー的に一致する。また島状の隆起部分には、汀線に近い順にハマニンニク、ハマヒルガオの植物群落が多く分布しており、干潟の水際にはアイアシ等が分布している。海浜前面にハマニンニクが分布していることは、加藤・佐藤 (1998) の調査においても報告されている。これらから、島状隆起の成因の一つとしてカスパが考えられ、植生によりそれが安定化したと推察できる。しかし、その形成機構が明らかでないため、推測の域をでない。また、植生は海浜上を越波した波が流れる際にその侵食を防ぐ役割を果たしたと考えられる。

次に、1998 年台風 5 号通過前後の海浜の縦断形状変化を図-4 に示す。ここでは、海浜に直角に設置した測線を 3 本示す(図-2, Line 1, 2, 3)。3 測線とも大きく侵食

されて汀線が後退している。特に Line 1 では汀線が 20 m 以上後退した。侵食された砂は、一部は岸沖方向に運搬され、また一部は越波によって運ばれて干潟内に堆積

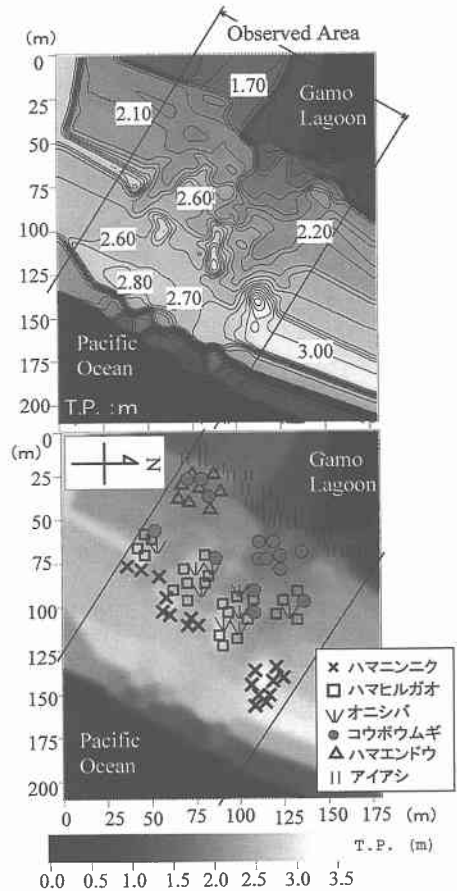


図-3 越波後の海浜地形と植生分布

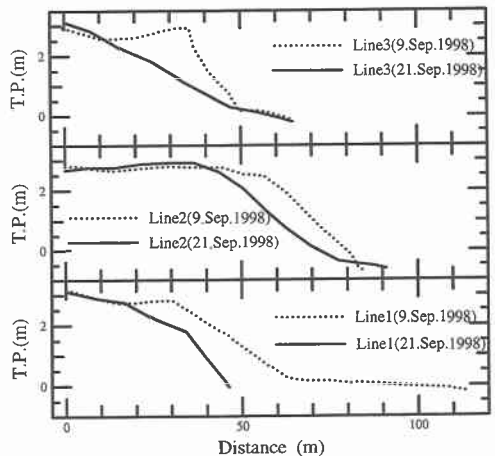


図-4 高波浪後の海浜の縦断形状変化

したと考えられる。越波は海浜上にも砂を堆積させたと考えられるが、Line 2 と Line 3 には 10~20 cm の堆積が見られるものの、バリアー頂部は約 3 m であり変わりが無い。また、砂州上の植生の最前線部は、侵食が止まり台風前後で縦断形状に変化がない部分であった。

4. 波浪と越波の解析

(1) 遡上高さおよび越波量

越波した波の様子をより詳しく捉えるために、波浪データを用いて遡上高さ及び越波量の算定を行う。波浪データは、最寄りの仙台港に設置してある運輸省の波高計が 1998 年台風 5 号の高波浪で破損したため、破損前の波向き・波高の相関がよい福島県いわき市小名浜港のデータを用いた。波高計は水深 19 m に設置してあるため、計算では、浅水変形と屈折を考慮して沖波のデータに換算して用いている。また、潮位データは、運輸省が観測している仙台港の検潮記録を用いた。遡上高さ R_u は、Ogawa・Shuto (1984) の式 (1) 式を用いて計算した。

$$\frac{R_u}{H_0} = \frac{0.46}{\beta} s^{-0.12} \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-0.23} \left[3.04 s^{1.07} - \frac{2.94 \pi^2 A^2}{F^2} \right] \cdot s^{-0.09} m^2 \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-0.75} + \pi A \zeta^2 m^2 \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-1} \dots (1)$$

ここで、 H_0 : 沖波波高, L_0 : 沖波波長, s : 斜面勾配, m : 前浜勾配, β, ζ, A, F : 諸係数。

但し、前浜の勾配及び斜面勾配を 0.1 の一様勾配とした。その結果を図-5 に示す。これを見ると、図-4 に示したバリアー高さの頂部 (約 3 m) を越える遡上高さが約 1 日間続いている。図示した遡上高さは有義波を用いた結果であり、最大波高が来た場合には 8 m にも達すると計算された。

次に、越波量の算定には富永・佐久間 (1972) の式を用い、田中・山内 (1997) にならって修正式 (2) 式とした。

$$Q = \alpha(R + Tide - H_c)^n \dots (2)$$

ここで、 Q (cm³/cm) : 1 波あたりの越波量, R (cm) : 打ち上げ高さ, H_c (cm) : バリアー高さ, $Tide$ (cm) : 潮位, $\alpha = 0.5, n = 2$ である。同様に合田 (1970) の手法から波高がレーリー分布式に従うと仮定して期待越波量を求めた。この結果を図-5 に示す。台風 5 号による高波浪の越波量累積値は、519 m³/m にも達し、過去 10 年間で、4 番目の大きさである。波高は、過去 10 年で最大であるのに対して、累積越波量が 4 番目程度なのは、越波が生じる継続時間が 1 日程度と他と比較して短いためである。

1998 年台風 5 号のケースの場合、その越波量の割に航空写真から確認される干潟内への堆積量が小さい。また、

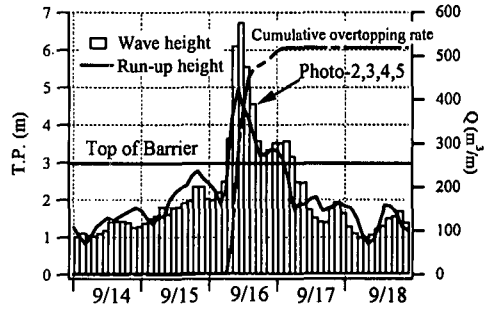


図-5 遡上高さおよび波高及び越波量

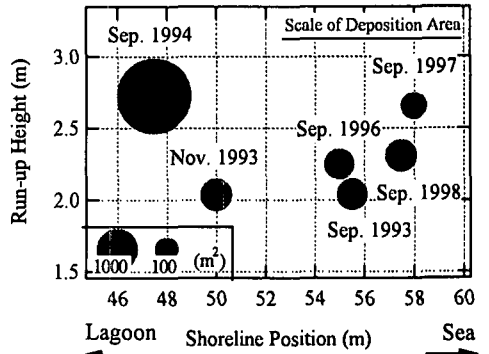


図-6 遡上高さおよび汀線位置及び堆積規模

過去 10 年間の遡上高さについて算定してみると、たとえ遡上高さが大きくても、航空写真には干潟内への堆積が見られないものがある。このような場合は、越波はしたものの、干潟までは届かなかった場合と考えられる。そこで、1993 年から 1998 年までの航空写真から干潟内に堆積が確認できる場合の遡上高さおよび越波が最も激しい測線 3 (図-2 参照) の基準点から汀線までの距離、及び航空写真から得た堆積規模の関係を図-6 に表した。ここで、汀線位置は、バリアー幅の大きさを表している。1997 年 9 月、1998 年 9 月のケースでは遡上高さが大きいにも関わらず、バリアー幅が大きいため堆積規模が小さい。それに対して、1993 年 11 月、1994 年 9 月のケースでは遡上高さが 1997、1998 年のケースと同等以下であるが、バリアー幅が小さいために堆積規模が大きくなっている。これから、干潟への堆積規模は、バリアー幅に依存しているといえる。

(2) 越波流速

バリアー頂部を越えた波は、干潟方向に緩やかに下った海浜上を流れて蒲生干潟に流入する (写真-5)。そこで、流水によるバリアー頂部から干潟までの海浜の侵食を評価するために、この時の流速及び水深を越波量から算定する。簡単のために等流水深を仮定し、砂州への水の浸透は考えない。期待越波量は 1 周期あたりの越波量

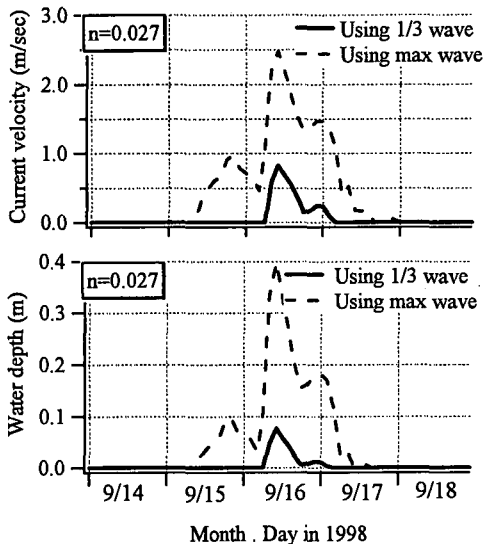


図-7 越波流速及び越波水深

をその周期で割って単位時間あたりの越波量になおして求める。しかし、1周期の中で越波するのは、波が砂州高さを超える時間だけであるから、これではある瞬間に流れる流量を過小評価するため、流速を求める場合には不適当である。そこで、波形を正弦波形と仮定し、(波高+潮位)がバリアー頂部を越える時間を用いて越波流量を評価しなおして計算した。計算にはマンギンの式を用い、粗度係数は $n=0.027$ とし、勾配は実測値から $i=0.153$ とした。計算結果を図-7に示す。有義波高を用いた場合、最大流速は 0.84 m/s 、水深は 8 cm となった。また、波高にレイリー分布を仮定して最大波高がきた場合を計算すると、流速 2.5 m/s 、水深 40 cm となった。これらは、台風通過時の現地踏査による結果とほぼ一致する。佐々木ら(1995)は堤体の植生についての耐侵食強度実験を行っており、イネ科のチガヤは堤体上の流速が 3.5 m/s まで十分な侵食低減効果があるとしている。その土質と植生の種類は異なるが、耐侵食強度を小さく見積もってもバリアー上の植生は、今回の越波に対して十分侵食を防ぐ役割を發揮したと考えられる。

5. まとめ

(1) 1998年9月16日に東北地方を来襲した台風5号によって蒲生干潟と海域を隔てるバリアー上に越波が

生じた。この越波によって運ばれた土砂が蒲生干潟内に堆積した。

(2) 越波後の海浜には島状の隆起が見られ、その上には植生が分布していた。

(3) 波浪データを用いて計算した結果、約1日間バリアー頂部を越える遡上高さが続き、累積越波量は $519\text{ m}^3/\text{m}$ に達した。

(4) 越波した波が海浜上を流れる流速を計算した結果、海浜上の植生は侵食に対して十分な耐侵食果を發揮したと考えられた。

謝辞:本研究を行うにあたり、運輸省第二建設局塩釜港工事事務所ならびに宮城県仙台土木事務所、(財)日本気象協会からは貴重な資料を提供して頂いた。また、本研究の地形調査を行うに際し、東北大学工学部土木工学科環境水理学講座の諸兄から協力を得た。ここに記して深く謝意を表す。本研究に対して文部省科学研究費の補助を受けたことを付記する。

参考文献

- 合田良実(1970): 防波護岸の越波流速に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第9巻, 第4号, 41 p.
- 加藤史訓・佐藤慎司(1998): 砂浜海岸の植生群落と地形変化の現地調査, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 666-670.
- 佐々木克也・宇多高明・藤田光一・服部 敦・平館 治(1995): 堤防のり面の耐侵食強度評価実験, 土木学会第49回年次学術講演会概要集, II-A, pp. 486-487.
- 武田一郎・砂村継夫(1982): ビーチ・カスプの発生と波長, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 319-322.
- 田中 仁・山内健二(1997): バリアー・アイランド上の越波によるラグーン内での土砂堆積, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 646-650.
- 富永正昭・佐久間襄(1972): 海岸堤防に関する研究(11), 土木研究所報告 143-3, 36 p.
- 茂木昭夫(1971): 第II編 汀線と碎波帯, 浅海地質学, 海洋科学基礎講座7, 東海大学出版会, pp. 204-206.
- 森下保壽・高橋次郎・川又良一・坂井隆行・片野明良(1995): 構造物の反射波による海浜地形の制御効果, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 711-715.
- Ritchie, W. and S. Penland(1990): Aeolian sand bodies of the south Louisiana coast. In Nordstrom, K. F., N. Psuty and B. Carter, (eds.), Coastal Dunes, Form and Process, John Willy & Sons, 116 p.
- Ogawa, Y. and N. Shuto(1984): Run-up of periodic waves on beaches of non-uniform slope, Proc. 19th Int. Conf. on Coast. Engng., pp. 328-344.