

ビーチ・カスプの発生と波長

武田 一郎*・砂村 継夫**

1. はじめに

ビーチ・カスプ（以下、カスプと呼ぶ）に関しては古くから多くの研究が行なわれており、古典的な研究例は Johnson¹⁾ によってまとめられている。それ以後も現地海岸^{2)~9)}、湖岸^{10), 11)}、実験室^{12)~14)}において、成因、形態、堆積過程などの検討が行なわれており、最近では海浜変形の問題との関連において工学的関心も高まってきた。しかし、従来の研究の多くは記載あるいは定性的な説明にとどまっており、入射波特性や底質粒径との関連において、定量的に検討された例は少ない。特に、現地におけるカスプの発生と消滅の条件に関する定量的な研究はほとんど行なわれていない。また、カスプの波長は、砕波波高、edge wave、あるいは swash length との関連で論じられているものの、いずれの場合も賛否両論があり、一般的な見解の一致はみられていない。そこで本研究では、カスプの発生と消滅の条件を現地における連続観測の結果から明らかにし、さらにカスプの波長を現地および実験室のデータを用いて検討した。

2. カスプの発生と消滅の条件

現地調査は、1981年7月から9月にかけての2ヶ月間、茨城県勝田市の那珂海岸（図-1）において行なわれた。この海岸は東海村海岸と阿字ヶ浦海岸の間に位置する延長約5kmの砂浜海岸で、南北にのびる直線状の海岸線を持つ。水深20m以浅の等深線は海岸線とほぼ平行に走り、水深20mまでの平均海底勾配は0.011であ

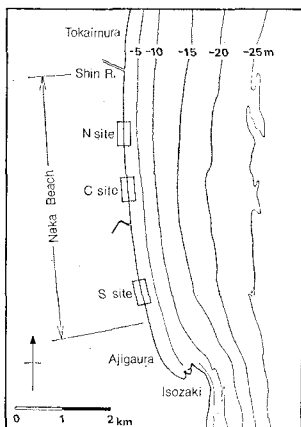


図-1 調査地域

る。海浜を構成する堆積物の粒径は北部で大きく、南部で小さい。また、この海岸における平均潮位差は約1mである。

この海岸に北の方からN地区、C地区、S地区の3つの調査地区を設けた（図-1）。20m以浅の等深線が海岸線と平行に走ることから、各地区における入射波特性に場所的相違は少ないと考えられる。調査期間中の各地区における海浜堆積物の平均粒径は、N地区で0.34mm、C地区で0.30mm、S地区で0.28mmであり、この期間中の粒径の時間的な変化はほとんどなかった。各地区において海浜および極浅海域の地形測量（自動レベル使用）を、週に1~2回の頻度で行なう一方、毎日あるいは1~2日おきにカスプの調査を行なった。

暴浪によって砂浜から侵食された砂は浅海域に運搬・堆積されて、そこにバーを形成する。このバーは、波が穏やかになると、バーの形態を保ちつつ、徐々に岸方向に移動し、ついには陸上に乗り上げる¹⁵⁾。同様の变化過程が那珂海岸においても観察された。バーが岸方向に移動し前浜にバーム状の高まりが発達するステージ、およびバーが陸上に乗り上げてバームを形成するステージにおいて、カスプの発生が各調査地区でみられた。地形測量の結果、カスプ形成時には必ず汀線の前進が認められた。そこで、汀線の前進・後退の条件がカスプの発生条件にも適用できると考え、現地汀線の前進・後退の条件を示す次式^{16), 17)}をここで用いることにする。

$$H_0/L_0 = C(\tan \bar{\beta})^{0.27}(D/L_0)^{0.67} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 H_0 =沖波波高、 L_0 =沖波波長、 $\tan \bar{\beta}$ =平均海底勾配、 D =海浜堆積物の粒径、 C =定数である。一方、砕波波高 H_b と沖波特性および海底勾配との関係は次式¹⁸⁾で与えられる。

$$H_b/H_0 = (\tan \beta)^{0.2}(H_0/L_0)^{-0.25} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\tan \beta$ =海底勾配である。式(2)は実験室で得られたものであるが、 $\tan \beta$ を $\tan \bar{\beta}$ でおきかえることにより現地海岸にも適用できると考え、式(1)、(2)を若干の近似 ($1.35 \approx 4/3$, $0.34 \approx 1/3$, $0.67 \approx 2/3$) と $L_0 = 2\pi/gT^2$ を用いて変形すると、次式が得られる。

$$H_b/gT^2 = kD/H_b \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 T =波の周期、 g =重力加速度、 k =定数であ

* 学生会員 理修 筑波大学大学院 地球科学研究所

** 正会員 工博 筑波大学助教授 地球科学系

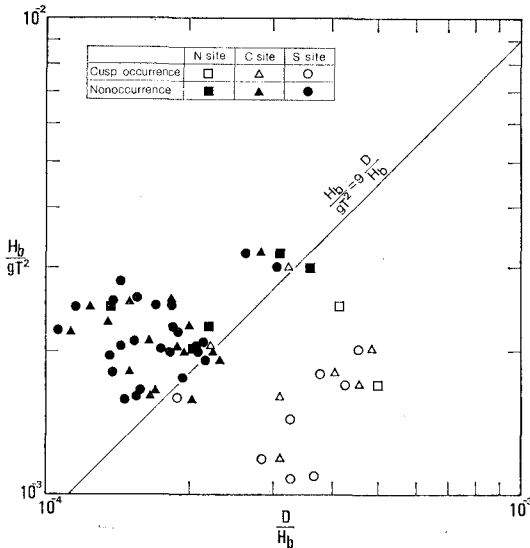


図-2 ビーチ・カスプの発生条件

る。式(3)は基本的には式(1)と同じであるが、汀線の前退・後退の条件が砕波特性と底質粒径のみで表わされているところが式(1)と異なる。 H_b および T は、概略値ではあるが、現地調査の際に直接測定することも可能であり、式(3)は現地で用いるのに都合がよい。

本調査で得られた資料を、式(3)中のパラメータ H_b/gT^2 と D/H_b を用いて整理した結果が図-2である。白の記号は、カスプが形成されていなかった状態からカスプが発生した場合、黒の記号は、カスプが形成されていない状態がそのまま継続した場合を示している。用いた波浪資料は、調査地域の南約 10 km の大洗港沖(水深 21 m)の波高計で、2時間ごとに実測された有義波データである。 H_b は、式(2)から推算された値を、前後する2つの調査日の間(両調査日を含む)で時間平均したものをを用いた。 T も同様に時間平均した値である。図-2から、カスプの発生条件は次式で与えられることがわかる。

$$H_b/gT^2 \leq 9D/H_b \quad (4)$$

なお、この式はカスプ発生の必要条件である。

暴浪によって砂浜が侵食され、汀線が後退すると、カスプが消滅することが観察および地形測量の結果明らかとなった。そこで、再び式(3)を用いてカスプの消滅の条件の検討を試みた(図-3)。図中、白の記号は以前存在していたカスプが active(調査当日、カスプが形成されていたか、あるいは形成されつつある状態)であった場合、黒の記号はカスプ

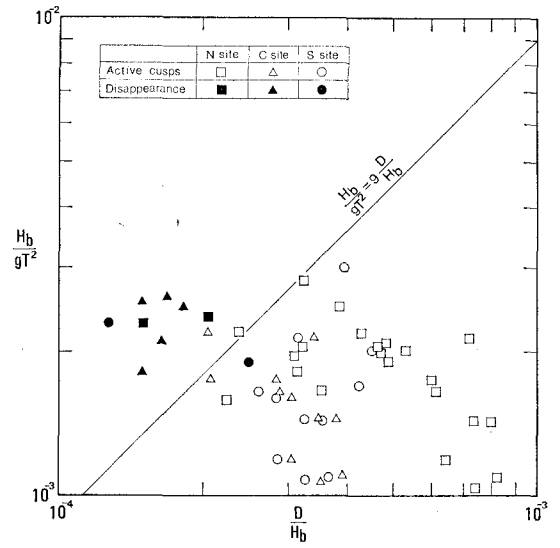


図-3 ビーチ・カスプの消滅条件

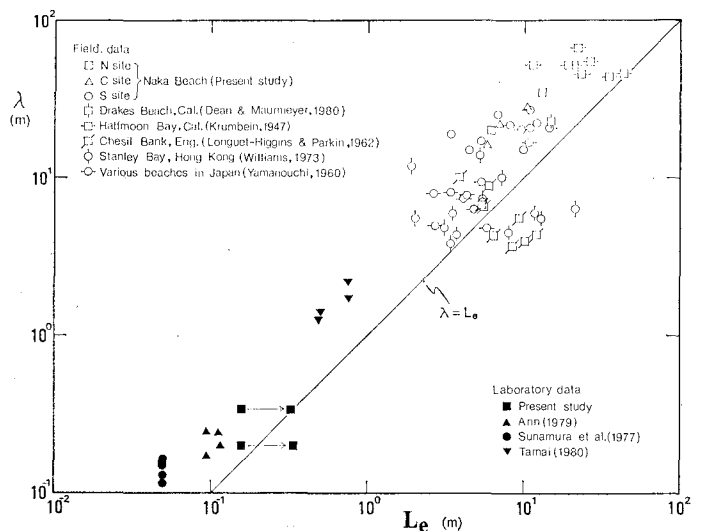
が消滅していた場合である。 H_b も T も、前と同様に、2つの調査日の間の値を時間平均したものをを用いている。この図から、カスプの消滅の条件は次式で与えられることがわかる。

$$H_b/gT^2 \geq 9D/H_b \quad (5)$$

3. カスプの波長

カスプの波長 λ と砕波波高 H_b が比例関係にあると報告している研究^{19),20)}がある。一方、Williamsの研究²¹⁾は、この関係を否定している。本研究において、 λ と H_b の関係を調べたところ、ある程度の相関は認められたが、満足できるものではなかった(図省略)。

カスプの波長は edge wave の波長と密接な関係にあ

図-4 Edge wave の波長 L_e とビーチ・カスプの波長 λ との関係

るとする Sallenger の研究がある²²⁾。一方, Longuet-Higgins・Parkin²³⁾や Dean・Maurmeyer²⁴⁾らの研究は, この関係に疑問を投じている。ストークスモードの edge wave の波長 L_e は次式で与えられる。

$$L_e = (gT_e^2/2\pi) \sin \alpha \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに, T_e は edge wave の周期, α は前浜勾配の角度である。図-4 は, $T_e = T$ (synchronous edge wave) として計算した L_e と λ との関係を, 既往の資料とともに, プロットした結果である。 L_e は全般的に λ よりも小さく, 両者の相関は良いとは言えない。次に, $T_e = 2T$ (subharmonic edge wave) とした場合の L_e と λ との関係を調べた結果, 図-4 と同じ程度のデータのばらつきがあり, L_e は全体的に λ よりも大きな値を示した (図省略)。

図-4 には, 従来行なわれた室内実験の結果とともに, 本研究で行なった若干の実験結果をプロットした。実験は, 長さ 21 m, 幅 0.5 m, 深さ 0.7 m の 2 次元造波水路 (筑波大学水理実験センター所属) の中に, 平均粒径 0.69 mm (標準偏差 0.15 mm) の砂で初期勾配 1/10 の海浜を作って行なわれた。波の周期を一定 ($T=1$ sec) に保ち, 砕波波高を変化させて 2 ケース ($H_b=2.0$ cm と $H_b=4.2$ cm) の実験を行なった。波の作用時間はいずれのケースにおいても 1 時間とした。式 (6) から明らかのように, L_e は α が同じならば T_e , すなわち T のみの関数となる。実験では T と α を一定としているので, $H_b=2.0$ cm および $H_b=4.2$ cm のいずれのケースに対しても, synchronous edge wave の場合は $L_e=16$ cm, subharmonic edge wave の場合は $L_e=62$ cm で一定となる。しかし, 実験の結果, $H_b=2.0$ cm のケースでは $\lambda=20$ cm, $H_b=4.2$ cm のケースでは $\lambda=34$ cm のカスプが形成され, 同一周期にもかかわらず, 波長の異なったカスプが形成された。同様な現象が平面水槽を用いた従来の実験においても観察されている²⁵⁾。上述の実験結果, 図-4 にみられるようなデータのばらつき, ならびに λ と L_e の不一致などから, カスプの波長と edge wave の波長とは直接に対応しないと考えられる。なお, 図-4 中の矢印がついている本実験のデータ・ポイントのうち, 左側のポイントは α に初期勾配の角度を, 右側のものは最終の前浜勾配の角度を用いて, それぞれ L_e を計算した結果である。

最近, カスプの波長と swash length S_i との関係が論じられている^{26)~28)}。図-5 は, 実測された S_i と λ との関係を示している。データのばらつきの程度は 図-4 と比較して小さく, λ は S_i と密接な関係にあることが

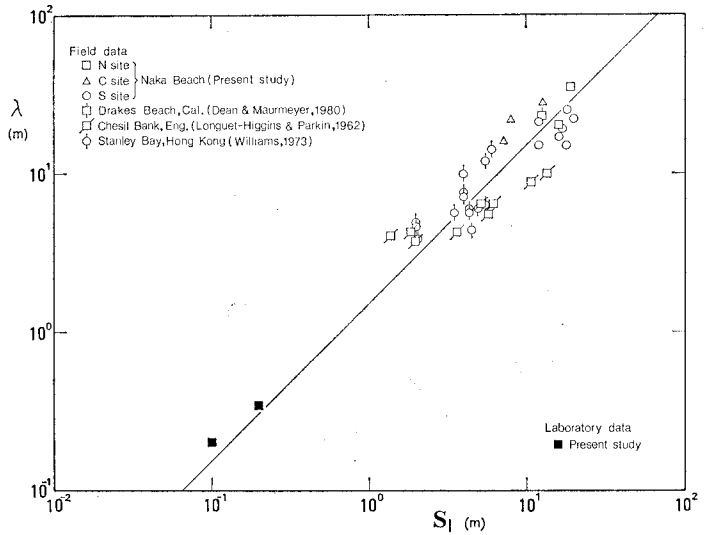


図-5 Swash length S_i (実測値) とビーチ・カスプの波長 λ との関係

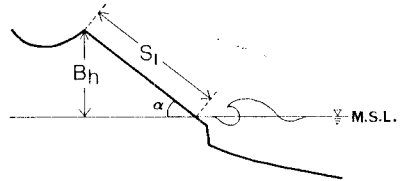


図-6 ビーチ・カスプ形成時における前浜の模式断面図

予想される。しかし, S_i の実測データは少なく, この関係を確立するには十分ではない。従来の研究では, S_i と波浪特性ならびに底質粒径との関係は明らかにされていないので, 本研究では, この関係を定量化し, S_i の推算が可能な既往のデータを用いて S_i と λ との関係について検討した。

カスプ発生時に前浜に発達するバーム状の高まり, あるいはバームの高さを B_h (図-6), 前浜勾配の角度を α とすると, S_i は次式によって示される。

$$S_i = B_h / \sin \alpha \quad \dots\dots\dots (7)$$

B_h は, 武田・砂村²⁹⁾によれば, 現地海岸および実験室の区別なく, 次式で与えられる。

$$B_h = 0.125 H_b^{5/8} (g T^2)^{3/8} \quad \dots\dots\dots (8)$$

一方, 前浜勾配 $\tan \alpha$ は Sunamura³⁰⁾ により, 現地海岸では

$$\tan \alpha = 0.12 \sqrt{H_b / g^{0.5} D^{0.5} T} \quad \dots\dots\dots (9)$$

実験室では

$$\tan \alpha = \{0.013 / (H_b / g^{0.5} D^{0.5} T)^2\} + 0.13 \quad \dots\dots (10)$$

で示される。一般に α は小さいので $\sin \alpha \approx \tan \alpha$ である。よって, 現地の S_i は式 (7), (8), (9) から

$$S_i = 1.04 H_b^{9/8} (g T^2)^{1/8} D^{-1/4} \quad \dots\dots\dots (11)$$

実験室の場合は式 (7), (8), (10) から

$$S_i = \{9.62 H_b^{21/8} (g T^2)^{3/8}\} / \{10 H_b^2 + g T^2 D\} \quad \dots\dots (12)$$

と表わすことができる。式 (11), (12) を用いて計算した

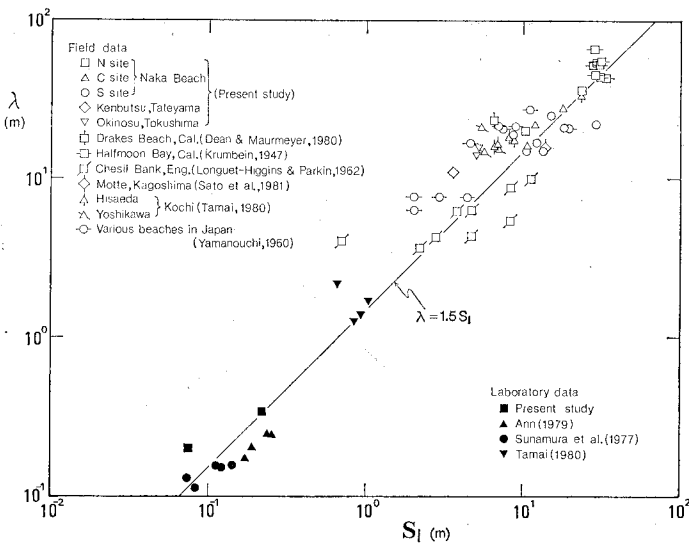


図-7 Swash length S_L (計算値) とビーチ・カスプの波長 λ との関係

S_L と λ との関係プロットした結果が図-7である。多少データのばらつきが見られるが、この関係は L_e と λ との関係(図-4)よりも良好な相関を示す。図-7より、 λ と S_L の関係は、現地・実験室にかかわらず、次式で与えられる。

$$\lambda = 1.5 S_L \quad \dots\dots\dots (13)$$

4. おわりに

現地におけるカスプの発生の条件は式(4)、消滅の条件は式(5)、カスプの波長はswash length [式(11)]を介して式(13)のように与えられる。これらの式中の H_b は第1次砕波の波高である。カスプの形成にはswash processが支配的であると考えられるので、カスプの問題は最終砕波(汀線砕波)との関連で論じられるべきであろう。この点を今後の課題としたい。

謝辞: 本研究を行なうにあたり、高知大学玉井佐一博士および群馬大学山内秀夫博士には貴重な資料を提供していただいた。現地調査では筑波大学学生辻本英和君、森哲二君をはじめとする多くの諸君にお手伝いをお願いした。また、波浪資料は茨城県三浜港湾事務所のものを使わせていただいた。最後に、本研究は文部省科学研究費(自然災害特別研究、研究代表者尾崎晃北大教授)による研究の一部であることを付記する。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Johnson, D. W.: Beach cusps, Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 21, pp. 599~624, 1910.
- 2) Sallenger, A. H., Jr.: Beach-cusp formation, Marine

Geology, Vol. 29, pp. 23~37, 1979.

- 3) Dean, R. G. and E. M. Maurmeyer: Beach cusps at Point Reyes and Drackes Bay beaches, California, Proc. 17th Conf. Coastal Eng., pp. 863~884, 1980.
- 4) Krumbain, W. C.: Shore processes and beach characteristics, B.E.B. Tech. Memo., No. 3, 35 p., 1947.
- 5) Longuet-Higgins, M. S. and D. W. Parkin: Sea waves and beach cusps, Geogr. Jour., Vol. 128, pp. 194~201, 1962.
- 6) 佐藤道郎・黒木敬司・篠原知明: ビーチカスプの形成に関する現地実験, 第36回年次学術講演会講演集(II), pp. 841~842, 1980.
- 7) 玉井佐一: 海浜カスプ特性と海岸地形の変動予測に関する研究, 京都大学学位論文, 197 p., 1980.
- 8) Williams, A. T.: The problem of beach cusp development, Jour. Sed. Petrology, Vol. 43, pp. 857~866, 1973.
- 9) 山内秀夫: 砂浜海岸の Beach cusp に関する研究, 東京教育大学大学院理学研究科修士論文, 85 p., 1960.
- Yamanouchi, H.: Beach cusps on some beaches in Japan, Sci. Rep. Fac. Education, Gunma Univ., Vol. 27, pp. 115~131, 1978.
- 10) Evans, O. F.: The classification and origin of beach cusps, Jour. Geology, Vol. 46, pp. 615~627, 1938.
- 11) Komar, P. D.: Observations of beach cusps at Mono Lake, California, Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 84, pp. 3593~3600, 1973.
- 12) 安 照道: 海浜のリズミック地形形成に関する実験的研究, 東京大学大学院工学系研究科修士論文, 135 p., 1979.
- 13) 砂村継夫・水口 優・安 照道: 小型平面造波水槽を用いた砂浜海岸の RHYTHMIC PATTERN に関する一実験, 文部省科学研究費報告書「砕波現象を中心とする沿岸海洋の動的解明に関する研究」, 研究代表者 堀川清司, pp. 10~14, 1977.
- 14) 前出 7)。
- 15) Short, A. D.: Three dimensional beach-stage model, Jour. Geology, Vol. 87, pp. 553~571, 1979.
- 16) 砂村継夫: 自然海浜における汀線位置の時間変化に関する予測モデル, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 255~259, 1980.
- 17) Sunamura, T.: Parameters for delimiting erosion and accretion of natural beaches, Ann. Rep. Inst. Geoscience, Univ. Tsukuba, No. 6, pp. 51~54, 1980.
- 18) Sunamura, T. and K. Horikawa: Two-dimensional beach transformation due to waves, Proc. 14th Conf. Coastal Eng., pp. 920~938, 1974.
- 19) 前出 1).
- 20) 前出 9).
- 21) 前出 8).
- 22) 前出 2).
- 23) 前出 5).
- 24) 前出 3).
- 25) 前出 13).
- 26) 前出 5).
- 27) 前出 8).
- 28) 前出 3).
- 29) 武田一郎・砂村継夫: パームの形成条件および高さ, 地形, Vol. 3, pp. 145~157, 1982.
- 30) Sunamura, T.: Relationships among beach slope, sediment grain size and wave parameter, (in preparation).