

砕波帯付近における波および流れの挙動と海浜変形特性

玉 井 佐 一*

1. 緒 言

砕波帯付近の波および流れの挙動は、海浜の平面的な波状地形の形成と密接な関係があり、従来より多くの研究が行われている。その中で、茂木¹⁾および土佐林ら²⁾のように、沿岸流の蛇行に主体をおいた波状地形の形成と、Komar³⁾およびShepard⁴⁾のように離岸流による影響を重視するものがある。また、Sonu⁵⁾のように離岸流の lee における漂砂の堆積に着目しながらも、カスプまたは孤状砂州のような波状地形は海浜勾配と斜め入射波による影響が顕著であり、セイシュあるいは定常エッジ波の相互作用、離岸流と沿岸流が大きく影響すると述べて、いくつかの示唆があたえられているが、波状地形形成の明確な結論はえられていないのが現状である。

平面海浜変形における波状海浜の代表地形としては、large cusp および beach cusp に大別されるが、沿岸流の蛇行や離岸流の挙動は large cusp の形成に寄与することは考えられても、前浜上の beach cusp の形成には直接的な影響は少なく、本来これらの形成機構は異なった取扱いによって検討することが必要であろう。

以上の観点から、著者はまず、平面波浪水槽によって、入射波の沿岸方向の変化および海浜流の挙動を検討し、カプス形成との関係を明らかにし、large cusp および beach cusp の形成特性について究明しようとするものである。

2. 実験設備および実験方法

実験には、二つの平面波浪水槽を用いた。一つは、長さ 20 m、幅 10 m、水深 50 cm で、この水槽の一端に中央粒径 $d_{50}=0.28$ mm、0.32 mm または 0.87 mm の自然砂によって、初期勾配 $i_0=1/10$ 、 $1/15$ および $1/20$ を対象とした移動床海浜をそれぞれ作製した。他の一つの水槽は、長さ、幅ともに 30 m、水深 60 cm の水槽で、この中央部 11.3 m を隔壁によって仕切り、初期勾配 $i_0=1/18.5$ のモルタル斜面の固定床とした。

造波時の海浜流の測定は、過マンガン酸カリ (KMnO₄) を投入し、その流跡線をメモ・モーションカメラによっ

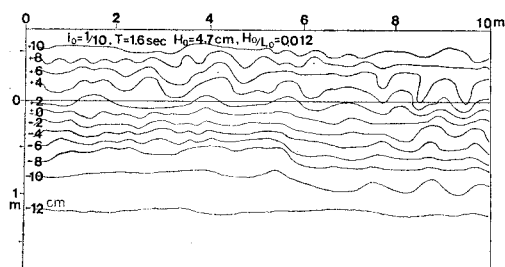
て、1 sec ごとに追跡し、この結果から、流向、および流速を求めるとともに、また、色素の拡散および入射波の影響を考え、超小型流速計 (回転翼径 3 mm) を併用して、これを底より 3 mm 上層に設置して測定するようにもした。沿岸方向の波高の変化は、ローパス・フィルターおよび容量式波高計を、海浜地形の変化は砂面測定器を用いて測定した。

3. 砕波帯内の波の変化

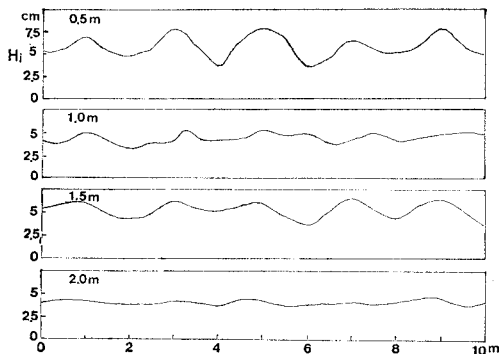
初期海浜勾配 $i_0=1/20$ における入射波高の沿岸方向の変化および wave set-up とカスプ地形との対応については、すでに若干の考察を行い発表⁶⁾ した。すなわち、明瞭な波状地形が形成される場合、それも large cusp が形成される場合には、wave set-up および入射波高の沿岸方向の変化は、波状地形の湾入部で大きく、沖側突出部で小さくなり、地形との対応がみられた。しかし、 $i_0=1/10$ のような比較的急な海浜勾配で、beach cusp が形成されるような場合の入射波の変化との関連性については不明であった。したがって今回は、主にこのような場合の入射波高の沿岸方向の変化と beach cusp 形成との関係について考察した。

図—1(a), (b) は、周期 $T=1.6$ sec、沖波波高 $H_0=4.7$ cm、沖波波形勾配 $H_0/L_0=0.012$ の場合の海浜地形の変化と入射波高の沿岸方向の変化を示したものである。(a) 図にみられるように、前浜上に beach cusp が形成されている。また、(b) 図の入射波高の沿岸方向の変化をみると、汀線より 0.5 m および 1.5 m 地点において、沿岸方向に、1.5~2 m 間隔に波高のピークが現われ、規則的な変化がみられる。今前浜部での循環流に対して、流れの幅を考慮した間隔は上記の $1/2$ の 75~100 cm で、カスプのスパン 75 cm に近似する。すなわち、入射波高の沿岸方向の変化およびこれに伴う流れの発生は、カスプそれも beach cusp の発生に作用し、汀線近くの小さな循環流の発生間隔と beach cusp のスパンとは対応することが推察できる。なお、この場合の砕波点は、汀線より 75 cm の位置にあり、入射波高の沿岸方向の規則的な変化がこれより沖の 1.5 m 地点でもみられる。Timmermans⁷⁾ によれば、オランダ Callantsoog 北海岸にお

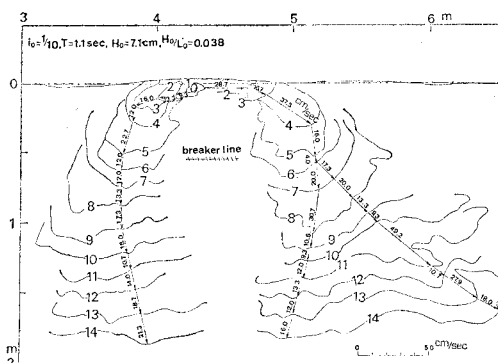
* 正会員 高知大学助教授 農学部農業工学教室



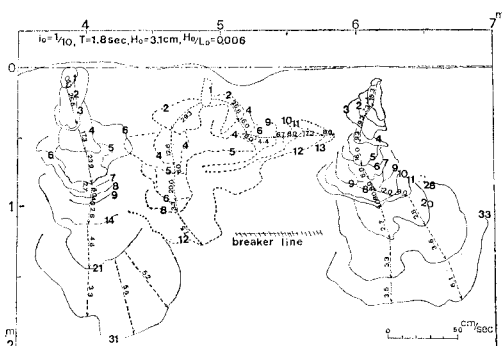
図—1 (a) 海浜地形の変化



図—1 (b) 入射波高の沿岸方向変化



図—2 海浜流の挙動



図—3 海浜流の挙動

いて、岬に囲まれた水域内で、Merian 周期に相当する、cross waves の発生がみられ、これが beach cusp の形成とよい対応がみられると発表しており、上述の実験における beach cusp の形成との関連性を示し興味深い。

さて、実験においては、 $H_0/L_0=0.060$ についても上述の実験と同様の検討を行った。すでに発表したように $H_0/L_0>0.040$ に相当し、カスプは形成されなかった。入射波高の沿岸方向の変化についても、各地点とも沿岸方向に変化しているが、それらの変化は規則的でなく、各地点の波高変化が沿岸方向に必ずしも同じではない。また、時間的にも変化がみられ、場所的および時間的にも不規則な変化をする。したがって、海浜地形はこのような影響をうけ、規則的な海浜地形の変化はむずかしく、カスプ地形の形成はみられなかったものであろう。

以上のように、入射波高は沿岸方向に変化するが、この変化に規則性がみられる場合、波状地形が形成される。その中で、 $i_0=1/20$ の large cusp が形成されるような場合は、カスプ・スパン l_0 と沿岸方向の波高の変化間隔 l_H とは、 $l_0 \doteq l_H$ を示し、 $i_0=1/10$ のような beach cusp が形成される場合には、 $l_0=l_H/2$ となることわかる。

4. 海浜流の挙動

移動床実験における KMnO_4 投入後の流れのパターンおよび平均流速の変化を図—2 に示す。これよりわかるように、 KMnO_4 投入当初は汀線に沿う沿岸流がみられるが、その後冲向きの流れとなって離岸流を形成する。

特に、この流れは、循環流パターンを示すようになる。次に、上記よりさらに波形勾配の小さい $H_0/L_0=0.006$ の場合の離岸流の挙動が図—3 である。この場合は流速が、汀線から碎波点に向うにしたがって漸次減少し、上記の場合とは異なった挙動がみられる。このような現象は、佐々木・尾崎³⁾の固定床による実験結果にもみられ、碎波帯内中間域より碎波点に向うにしたがって流速が大きくなるようなタイプを純循環流型離岸流とし、他方、図—3 のように汀線から碎波点に向って流速が減少するタイプを自由噴流型離岸流としている。なお、このようなタイプについては現地観測においてもみられ、それぞれモデル化による考察⁹⁾がなされている。

さて、図—3 においては、離岸流の発生基点は前浜上の swash の最上部に位置しており、カスプの bay 相当地点より沖へ流出している。しかし、このような状態は長く続かず、Komar³⁾の考察結果と同じ傾向をみることができた。すなわち、Komar³⁾は実験および実際の海岸の調査から、large cusp と離岸流との関係について、理論的にはカスプは離岸流の中間のセル中心に発達すると推論したが、実験ではそのようなカスプは大きく成長せず数分の間に消滅し、安定なカスプは離岸流の lee に発達し、大きなカスプは強い離岸流の lee に形成されるとしている。

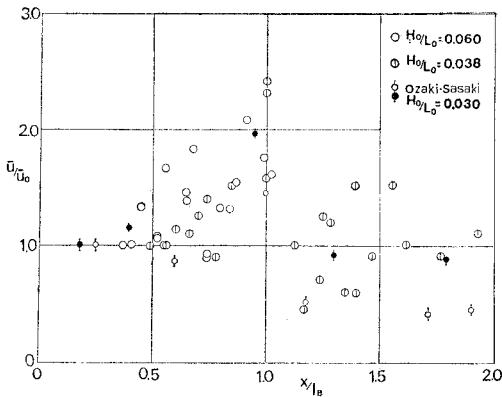


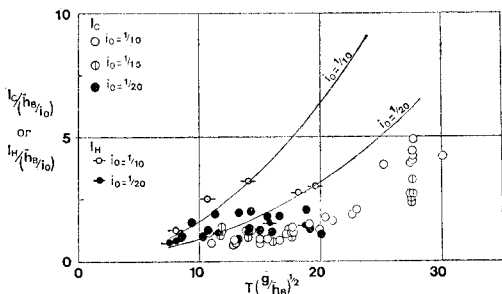
図-7 離岸流速の変化 (純循環流型離岸流)

ある。図-6 は上述したように、離岸流速が碎波点に向って減少する自由噴流型の流速変化で、碎波点では、 $\bar{u}/\bar{u}_0=0.1\sim0.3$ の値を示し、 $x/l_B>1$ の沖では $\bar{u}/\bar{u}_0=0.1\sim0.2$ のほぼ一定値を示すようになる。一方、図-7 にみられるように、中間域より碎波点に向って流速が増し、碎波点、すなわち、 $x/l_B=1$ では $\bar{u}/\bar{u}_0=1.5\sim2.5$ の値を示すようになり、いわゆる純循環流型離岸流がみられ、碎波点を過ぎると流速は急に減少する。

5. 波状海浜変形特性

以上のような入射波の変形および離岸流と波状海浜変形との関連性について考察する。

沿岸方向の波高変化間隔 l_H およびカスプ・スパン l_c について、上述の図-5 と同様の取扱いにより、縦軸に $l_H/(\bar{h}_B/i_0)$ または $l_c/(\bar{h}_B/i_0)$ をとり、横軸は同様に無次元周期 $T(g/\bar{h}_B)^{1/2}$ をとって示すと、図-8 のようである。図中の曲線は、図-5 の場合と同様 $Y_r=gT^2/2\pi$ とした時の計算曲線である。図にみられるように、 $i_0=1/20$ についてはカスプのスパンおよび沿岸方向の波高変化間隔ともに、 $T(g/\bar{h}_B)^{1/2}<15$ でこの曲線に近似する。すなわち、海浜勾配が緩やかな場合、離岸流間隔および沿岸方向の波高変化と対応した large cusp の形成が顕著なことがわかる。図において、 $T(g/\bar{h}_B)^{1/2}>15$ で、 $l_c/(\bar{h}_B/i_0)$


 図-8 $l_c/(\bar{h}_B/i_0)$ および $l_H/(\bar{h}_B/i_0)$ と $T(g/\bar{h}_B)^{1/2}$ との関係

および $l_H/(\bar{h}_B/i_0)$ の値はこの曲線から偏して $i_0=1/10$ の実験値に近い分布形を示すが、これらの実験値は Iribarren 数 $I_r=i_0/(H_0/L_0)^{1/2}$ の値が $I_r>0.5$ を示し、plunging breaker に相当するものである。

一方、 $i_0=1/10$ の場合についてみると、 $l_c/(\bar{h}_B/i_0)$ の値は離岸流間隔を示す曲線とは全般的に異なった分布形を示し、 $i_0=1/10$ の場合におけるカスプの形成、すなわち、beach cusp の形成には、間隔の大きな離岸流は直接的には影響しないことがわかる。また、 $l_H/(\bar{h}_B/i_0)$ についても図のように、 $T(g/\bar{h}_B)^{1/2}<15$ で離岸流間隔と対応するが、 $T(g/\bar{h}_B)^{1/2}>15$ では合わない。さらに、全般的に $l_c/(\bar{h}_B/i_0)$ の値とも異なった値を示すが、上述したように、 $l_H/2$ とすれば、カスプのスパンと対応する。これは 3. で述べた入射波高の沿岸方向の変化と beach cusp 形成との関連性をよく表わしている。

なお、 $i_0=1/15$ の場合のカスプのスパンは、図-8 においては $i_0=1/10$ とあまり変わらず、同様の分布形を示すことがわかる。

6. 結 語

以上、入射波の沿岸方向の変化および離岸流とカスプの形成特性との関係について考察し、次のような結果をえた。

(1) 離岸流の中間のセル中心でのカスプは大きく成長せず、安定な large cusp は離岸流の lee に発達する。

(2) 碎波点における離岸流速は、自由噴流型では、初期離岸流速の $0.1\sim0.3$ に、純循環流型では $1.5\sim2.5$ の値を示す。

(3) 離岸流間隔 Y_r の無次元値 $Y_r/(\bar{h}_B/i_0)$ と無次元周期 $T(g/\bar{h}_B)^{1/2}$ とは相関がみられ、 $Y_r/(\bar{h}_B/i_0)=(gT^2/2\pi)/(\bar{h}_B/i_0)$ に近似し、edge wave の離岸流への影響が推論できる。

(4) 海浜勾配 $i_0=1/20$ におけるカスプ・スパン l_c および沿岸方向の波高変化間隔 l_H は $T(g/\bar{h}_B)^{1/2}<15$ において、 $l_c=Y_r$ および $l_H=Y_r$ となり、離岸流による large cusp の形成が推論できる。

(5) (4) において $T(g/\bar{h}_B)^{1/2}>15$ および $i_0/(H_0/L_0)^{1/2}>0.5$ においては、 l_c および l_H は、 $i_0=1/10$ または $1/15$ の分布型に近似するようになる。

(6) $i_0=1/10$ の場合、 l_H は $T(g/\bar{h}_B)^{1/2}<15$ において離岸流間隔に近似し、 $l_H=Y_r$ を示すが、 $T(g/\bar{h}_B)^{1/2}>15$ では合わなくなる。

(7) $i_0=1/10$ の場合、カスプ・スパン l_c と l_H については $l_c=l_H/2$ を示し、beach cusp が形成される場合のスパンと入射波高との関係が明らかとなった。

付記： この研究を進めるにあたり、高知大学農学部上森千秋教授および京都大学防災研究所土屋義人教授より御懇切なる御指導と御鞭撻を賜わった。また、この研

究の一部は、文部省科学研究費自然災害特別研究(代表者 榎木 亨阪大教授)によるものであり、研究打合せ会において、有益な御助言をいただいた。さらに、離岸流についての考察には、北大尾崎 晃教授および佐々木幹夫氏の貴重な研究成果を参考にさせていただいた。以上記して深甚なる謝意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) 茂木昭夫: 海岸および海底の Rhythmic pattern について, 東北地理, 第 15 卷, 第 3 号, pp. 79~84, 1963.
- 2) 土佐林忠夫・藤田兼吉: カスプについて(第 2 報), 科学, Vol. 20, No. 10, pp. 470~471, 1950.
- 3) Komar, P. D.: Nearshore cell circulation and the formation of giant cusps, Geol. Soc. Amer., Bull., Vol. 82, pp. 2643~2650, 1971.
- 4) Shepard, F. P.: Submarine Geology, 2nd ed., New York, Harper & Row, 1948.
- 5) Sonu, C. J.: Three-dimensional beach changes, Jour. Geology, Vol. 81, No. 1, pp. 42~64, 1973.
- 6) 玉井佐一: 海浜カスプの形成機構に関する研究, 第 22 回海講論文集, pp. 135~139, 1975.
- 7) Timmermans, P. D.: Proeven over den invloed van golven opeen strand, Leidsche Geologische Mededeelingen, Dl. 6, pp. 231~386, 1935.
- 8) 佐々木幹夫・尾崎 晃: 離岸流に関する研究, 第 24 回海講論文集, pp. 600~604, 1977.
- 9) 例えば, Bowen, A. J.: Rip currents I, II, J.G.R., Vol. 74, pp. 5467~5490, 1969.
- 10) 日野幹雄: 海浜流の発生理論, 土木学会論文報告集, No. 225, pp. 17~29, 1974.
- 11) 堀川清司・佐々木民雄・堀田新太郎・桜本 弘: 海浜流に関する研究(第 2 報), 第 21 回海講論文集, pp. 347~354, 1974.
- 12) Thornton, E. B.: Variation of longshore current across the surf zone, Coastal Eng., pp. 291~309, 1969.
- 13) Noda, E. K.: Rip currents, Coastal Eng., pp. 653~668, 1972.
- 14) James, I. D.: A non-linear theory of longshore currents, Estuarine and Coastal Marine Science, Vol. 2, pp. 235~249, 1974.
- 15) 尾崎 晃・佐々木幹夫・碓氷善美: 離岸流に関する研究, 第 23 回海講論文集, pp. 471~476, 1976.
- 16) Ursell, F.: Edge waves on a sloping beach, Proc. Roy. Soc., Ser. A, pp. 79~97, 1952.