

海浜カスプの形成機構に関する研究

玉井 佐一*

1. 緒言

最近、浅海域特に碎波帯での波の変形、海浜流の発生およびそれに伴う海浜地形の変化について研究が進められてきた^{1),2)}。

著者³⁾は海浜カスプの形成および沿岸砂州の発生などについて初期海浜勾配 $i_0=1/10$, $1/15$ および $1/20$ の場合を対象に実験的に検討し、初期海浜勾配および波特性の相違によるカスプ形成の条件を明らかにし、特にカスプの形状と波特性との関連性などについて考察した。しかし、このようなカスプまたは砂州の形成機構については、エッジウェーブの存在、入射波の沿岸方向の非一様性および海浜流の発生などその要因が多い。

この研究では、海浜カスプの形成に関する実験と同時に入射波高の分布、汀線より陸側での wave set-up の沿岸方向の変化および循環流の発生などについて検討し、カスプの特性とその形成機構について考察する。

2. 実験設備および実験方法

実験には、前報³⁾と同じ実験設備、すなわち波浪水槽として長さ 20 m, 幅 10 m および深さ 60 cm のものを用いた。実験砂は中央粒径 $d_{50}=0.28$ mm および比重 2.66 で、実験波は汀線に直角に入射するようにした。造波後の海浜地形の変化、カスプや弧状砂州の形状は、前報と同様の方法で測定した。実験波は周期 $T=1.0\sim 2.0$ sec で沖波波高 $H_0=2.9\sim 8.1$ cm としたが、その沖波波形勾配 $H_0/L_0=0.010\sim 0.044$ であった。

海浜流の挙動については、過マンガン酸カリまたはウォター・ブルーを投入し、メモ・モーショソカメラで 1 sec ごとに撮影し、流跡線を追跡する方法をとった。入射波高の沿岸方向変化は、移動測定台に取付けた容量式波高計で測定した。また、初期汀線より 50 cm 陸側で沿岸方向に 30 cm 間隔に長さ 13 cm および直径 5 cm の円筒管を埋設し、水面測定器を用いて波浪時の水位すなわち wave set-up の沿岸方向の変化を測定するようにした。

3. 実験結果とその考察

(1) カスプの形成とその特性

一様勾配をもつ砂浜に波を作用させると、造波 20~30 min 前後から比較的明瞭な海浜地形の変化が見られ、それに伴って海浜流が卓越し、海浜カスプが形成されるようになる。

写真-1 は $i_0=1/20$ の場合で、 $T=1.4$ sec, $H_0=8.1$ cm および $H_0/L_0=0.027$ の条件での造波 4 hrs 後の海浜地形の変化を示す。これからわかるように、きわめて明瞭なカスプが形成されている。しかし、波形勾配をさらに大きくすると ($H_0/L_0>0.044$)、前報の $i_0=$



写真-1 $i_0=1/20$ の場合の海浜カスプの発生
($T=1.4$ sec, $H_0/L_0=0.027$)

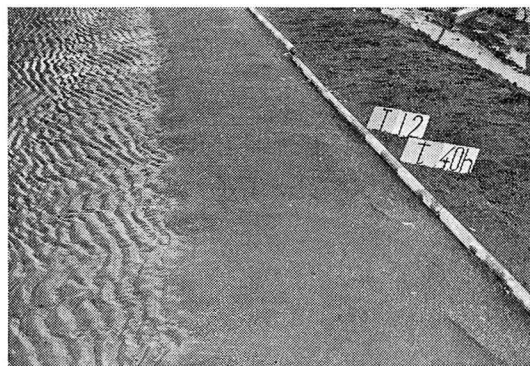


写真-2 $i_0=1/10$ の場合の海浜カスプの発生
($T=1.2$ sec, $H_0/L_0=0.014$)

* 正会員 高知大学助教授 農学部農業工学教室

1/10 および 1/15 の場合と同様に、カスプの形成は不明確となる。

さて写真-2 は $i_0=1/10$ の場合で、 $T=1.2$ sec, $H_0=3.2$ cm および $H_0/L_0=0.014$ の条件での海浜地形の変化状況を示す。写真-1 と比較すると、両者は異なった形状のカスプを形成していることがわかる。後者の場合は、前浜部への砂の堆積によってカスプが形成され、そのスパンも前者に比べて小さい。このようなカスプの形状や大きさの相違については、実際海岸においても見られ、たとえば Kuenen⁴⁾ は、rhythmic accumulation の type を ripple-mark, larger rhythmic accumulation および beach cusp の 3 つに、また小向⁴⁾ はカスプを大きさによって分類し、さらに Brunn⁴⁾ と茂木⁴⁾ はスパンの大きさを order 別に 3 分類している。最近、Dolan⁵⁾ または白井⁶⁾ は実際海岸の調査結果から、このようなカスプについて汀線が前進している部分と後退している部分とが交互して波状の海浜地形を形成し、一般に数 100 m 以上のものを large cusp と呼び、通常前浜部に形成されるスパンの比較的短かいものを beach cusp として区別している。上記の実験結果においても写真-1 の場合が large cusp に、また写真-2 の場合が beach cusp に相当するように考えられる。

(2) カスプの形成機構

白井⁶⁾ の大湊海岸での調査においても beach cusp と large cusp とが共存しており、その形成機構の解明は複雑であるが、その関係諸因子との関連性について実験的に検討した結果を述べる。

茂木⁴⁾ は海岸と海底に見られる rhythmic pattern の類似性からこれらの形成機構について検討している。その中で、King の多方向からの波の入射による円弧状砂州の発生や Brunn⁴⁾ らの碎破による swash とこれから生ずる rip current による発生原因の説明は必ずしも満足すべきものではない。むしろ、茂木⁴⁾ は沿岸流の障害物などによる蛇行性が、河川流の蛇行と類似していると考え、その蛇行流の内側(陸側)に環流が形成され、それによって、カスプが形成されると推論し、さらにこれに swash や離岸流、または円弧状砂州の発生などが複雑に影響することを述べており、形成機構について興味ある結果を示しているが、カスプの形成機構の解明には至ってないようである。

さて、図-1(a) は $i_0=1/20$ の場合で、 $T=1.4$ sec, $H_0=4.1$ cm および $H_0/L_0=0.013$ の条件での造波 4hrs 後の海浜地形の変化状況である。汀線の前進とともに比較的明確なカスプが形成されている。このうち (b) はこの場合の造波 1hr 後および 4hrs 後の汀線より 50cm 陸側での wave set-up η の沿岸方向の変化を示す。汀線の平面的な変化とほぼ対応し、湾入部で set-up は大きく、沖側への突出部で小さくなっていることがわかる。

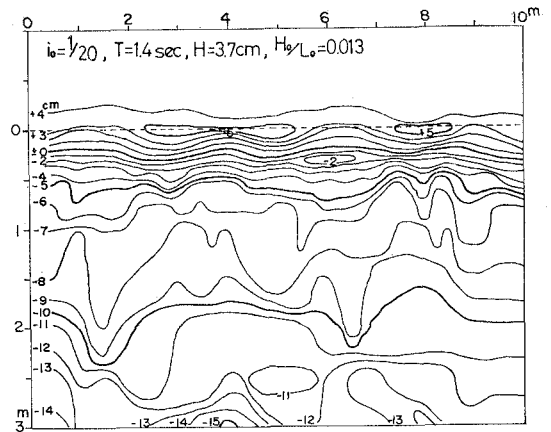


図-1(a) 海浜地形の変化

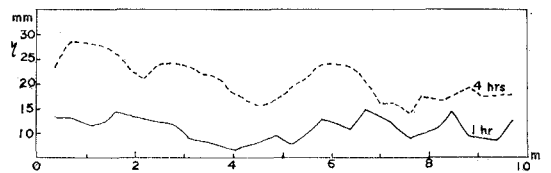


図-1(b) wave set-up の沿岸方向の変化

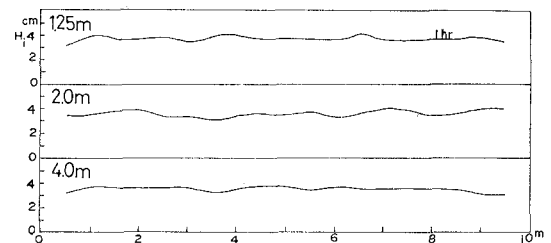


図-1(c) 入射波高の沿岸方向の変化

また、図-1(c) は初期汀線より 4.0m, 2.0m および 1.25m 沖側の位置での入射波高 H_i の沿岸方向の変化を示したものである。特に、顕著な変動は見られないが、汀線に近い 1.25m の位置で湾入部に相当する個所の波高がやや大きくなっている。

図-2(a), (b) および (c) は $i_0=1/20$ の場合で、 $T=1.0$ sec, $H_0=6.9$ cm および $H_0/L_0=0.044$ の条件での海浜地形の変化、wave set-up η および入射波高 H_i の沿岸方向の変化を図示したものである。上述したように、波形勾配 H_0/L_0 が大きくなると、汀線変化も少なくなるとカスプの形成が不明確となる。また、wave set-up の沿岸方向の変化もあまりはっきりした傾向は現われない。入射波高の変化については、汀線より 2~3m 沖付近で著しいが、沿岸方向の変化の様相と汀線の変化との対応性は見られない。

次に、図-3(a), (b) および (c) は前述した写真-1 の場合の海浜地形、wave set-up η および入射波高 H_i の沿岸方向の変化を示したものである。この場合には、非

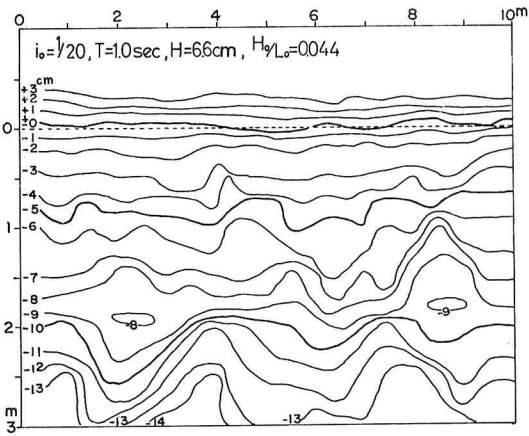


図-2(a) 海浜地形の変化

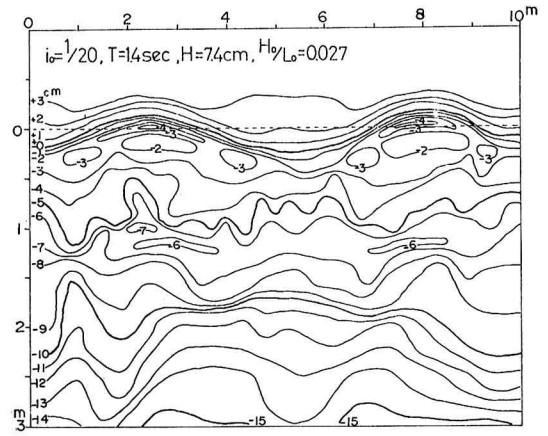


図-3(a) 海浜地形の変化

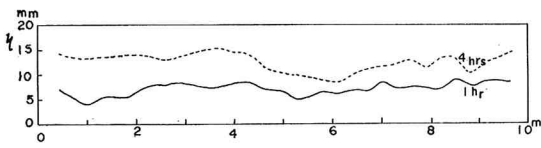


図-2(b) wave set-up の沿岸方向の変化

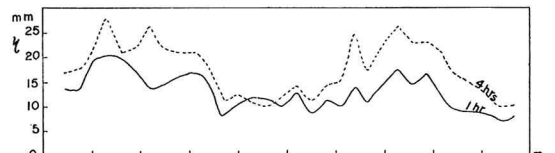


図-3(b) wave set-up の沿岸方向の変化

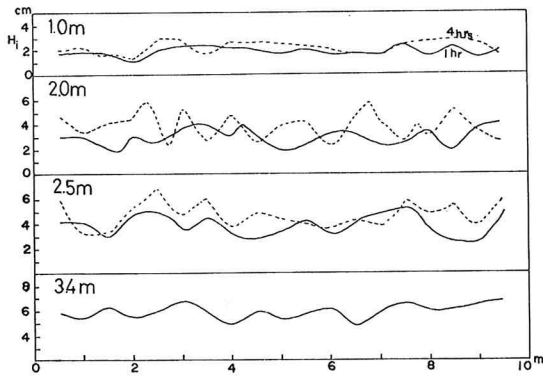


図-2(c) 入射波高の沿岸方向の変化

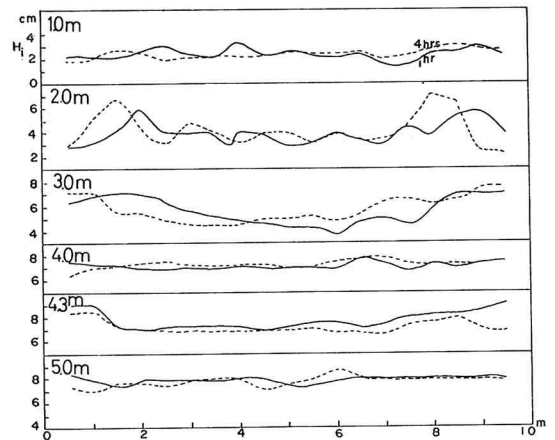


図-3(c) 入射波高の沿岸方向の変化

常に明瞭なカスピが形成され、またこの波状地形と対応して初期汀線より 20 cm 沖および 1.2 m 沖に沿岸砂州が発達している。これは Sonu⁷⁾、茂木⁸⁾ および白井⁹⁾ の実際海岸での調査結果に見られるカスピと沿岸砂州との対応と同じ傾向を示している。図-3(b) の wave set-up の沿岸方向の変化を見ると、波状地形の湾入部で高く、沖側突出部で低くなっている。図-3(c) は入射波高の沿岸方向の変化を各代表地点について示したものである。この場合の碎波点は、平均的には初期汀線よりほぼ 4.3 m の位置にあるが、この位置での波高の沿岸方向の変化を測定することは、入射波または碎波点の不安定性に伴って一般に困難であった。このことから、碎波点付近の波高の沿岸方向の変化と波状地形との関係はあまりはっきりしないが、汀線より 2.0 m の位置(碎波後)での波高の変化と波状地形とは対応した変動が見られ



写真-3 碎波後の波の扇形状の進行 (i_0 = 1/20 の場合)

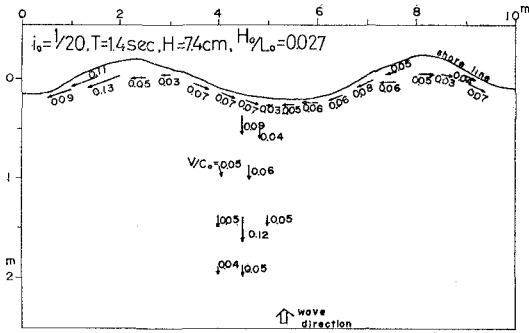
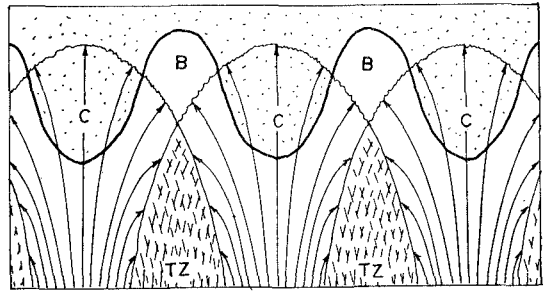


図-4 循環流の発生



B: Bay, C: Cusp, TZ: Turbulent Zone

図-6 Sheet flood structure (Gorycki, 1973)

る。実験を通じて推論されることは、前述した碎波点の沿岸方向の変化に伴って、写真-3に見られるように碎波後の波の扇形状の拡がりによって汀線近くで循環流が発生し、それに伴って波状の海浜地形が次第に形成されていくようになり、さらにこれによって循環流が卓越し、波状地形の形成が顕著になって行く。この場合、この過程に伴って沿岸方向の波高分布も変化していくようである。

このような循環流の発生について、過マンガン酸カリまたはウォター・ブルーを投入し、その流跡線を追跡して平均流速を測定した。その結果を図-4に示す。図には流速 V と沖波の波速 C_0 との比 V/C_0 を示した。これより、横軸の 2m および 8m 付近から汀線近くに形成された runnel にそって中央部に流れ、さらに沖向きの流れとなるいわゆる循環流の様相がよくわかる。このような循環流の発生は造波 3~5min 後には見られ、海浜地形の変化に伴って順次発達する。しかし一方 wave setup はこのような造波初期には生じていない。

Harris⁹⁾ は汀線に波が直角に入射する場合の海浜流について図-5のような汀線のごく近くでの小さな循環流と、碎波点 (outer breaker) 付近を中心とする大きな循環環が存在することを示しているが、前述の実験において見出される循環流は、後者の大きな循環流に相当することが考えられる。さらに、large cusp の形成はこのような大きな循環流が支配的となって形成されるのである

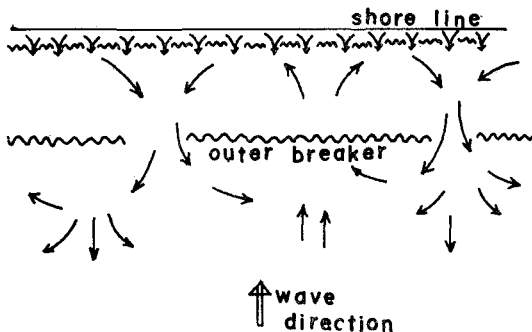


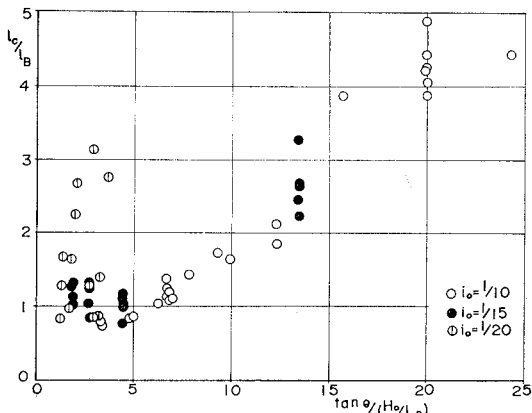
図-5 循環流パターン (Harris, 1969)

う。

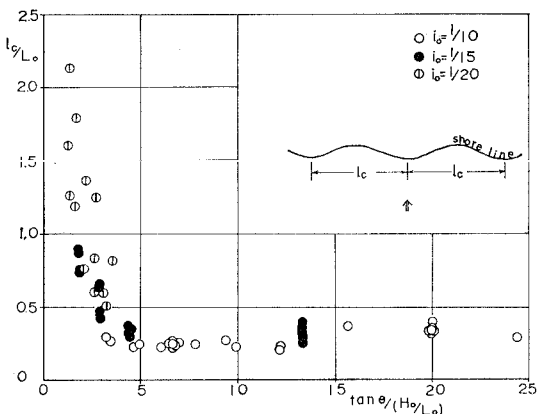
一方前浜部に形成される beach cusp は、前者の小さな循環流が支配的となる場合であろう。Gorycki¹⁰⁾ は汀線近くの波の平面的挙動について図-6に示すような sheet flood の発生を示している。これは著者の実験における碎波後の扇形状の進行(写真-3)と類似しているが、特に $i_0=1/10$ の場合に見られた前浜部の波の挙動⁹⁾ とさらによく似ており、スパンの短い beach cusp の形成に特に影響しているように考えられる。日野¹¹⁾ は海浜流の発生、発達について海浜勾配 $i_0=1/10$ および $1/20$ を対象に理論的解析を行い、遠浅の海岸ほど離岸流やカスプ地形が発達しやすいという結果を得ているが、これは前述した実験結果における大きな循環流の発生と large cusp の形成とに対応するものであろう。

著者は前報⁹⁾ の実験結果を通じて、カスプの形成は海浜勾配 $i_0=1/10\sim 1/15$ の範囲が顕著で、 $i_0=1/20$ では $1/10\sim 1/15$ の場合より不規則で形成されにくいようであり、この傾向は実際海岸とも対応することを述べたが、上記の考察においてわかるように $i_0=1/10\sim 1/15$ の場合のカスプの形成は beach cusp を主体としたものであり、また実際海岸の海浜勾配は前浜勾配を対応させて取扱ったものである。今回の $i_0=1/20$ の場合の実験では、large cusp の形成が主体となっているものと考えられる。

前回⁹⁾ の実験で得られたカスプのスパン l_c と今回の実験結果とをまとめて図-7および図-8に示す。前者はスパン l_c と碎波点より汀線までの距離 l_B との比 l_c/l_B を縦軸に、横軸には $i_0=\tan \theta$ と H_0/L_0 との比、 $\tan \theta/(H_0/L_0)$ をとって図示したものである。 $\tan \theta/(H_0/L_0) > 4.0$ では l_c/l_B は $\tan \theta/(H_0/L_0)$ の増大とともにほぼ直線的に増大するが、 $\tan \theta/(H_0/L_0) < 4.0$ では $\tan \theta/(H_0/L_0)$ の減少とともに急激に増大する傾向が見られる。同様に、図-8は縦軸に l_c/L_0 をとって示したもので、 $\tan \theta/(H_0/L_0) < 4.0$ で $\tan \theta/(H_0/L_0)$ の減少とともに l_c/L_0 は急激に増大することがわかり、さらに $\tan \theta/(H_0/L_0) > 4.0$ ではあまり顕著な変動は見られない。これらからわかるように、カスプのスパンと海浜勾配および波特性との関係を比較的明確に表わすことができる。



図—7 l_c/l_B と $\tan \theta / (H_0/L_0)$ との関係



図—8 l_c/L_0 と $\tan \theta / (H_0/L_0)$ との関係

以上の結果をまとめると、カスプの形成は入射波の沿岸方向の不均一性、特にこれに伴う砕波後の平面的な波の扇形状の拡がり循環流の形成に寄与し、これが漸次発達して波状の地形を形成し、さらにこれに伴って循環流が卓越する。特に、カスプのスパンの大きな large cusp の形成には、大規模な循環流が支配的となり、スパンの短い beach cusp は小さな循環流とさらに前浜上の扇形状の波の遡上とその後の引き波の集中化によって形成されることが推論できる。さらに一般的には海浜勾配が急な場合に beach cusp が形成されやすく、緩やかな場合に large cusp が形成されやすいと考えられる。したがって、実際海岸ではカスプの形成に及ぼす海浜地形の影響の範囲が beach cusp の場合と large cusp の形成の場合とは異なり、large cusp は沖の広範囲の海底勾配の緩、急が影響することが考えられる。また、海岸の平面形状や波浪特性と上記の諸現象の発生などが関係するであろう。これらについては現在実施しつつある高知海岸での調査と比較検討して行きたい。

4. 結 論

海浜勾配 1/20 の場合を対象としてカスプの形成と入射波高、wave set-up の沿岸方向の変化および海浜流発生に関する実験を行い、それらの関連性と若干の形成機構について考察したが、要約すると次のとおりである。

(1) 海浜勾配 1/20 の場合には、明瞭な large cusp が形成され、これは沖の砕波点付近を中心とする大きな循環流の発生によるものである。

(2) 前浜部に形成されるスパンの比較的短い beach cusp は、汀線付近の小さな循環流によって形成され、特に前浜上の波の扇形状の遡上と引き波の集中化が原因する。

(3) 明瞭な波状地形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、地形との対応が見られる。

(4) 砕波後の波の扇形状の拡がり循環流の発生に原因すると思われる。

最後に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った。ここに記して深甚の謝意を表わす次第である。

参 考 文 献

- 1) Bowen, A. J. and D. L. Inman: Edge wave and crescentic bars, Jour. of Geophys. Research, Vol. 76, No. 36, 1971.
- 2) 日野幹雄: 海浜流系の発生理論, 土木学会論文報告集, No. 225, 1974.
- 3) 玉井佐一: カスプの形成に関する研究, 土木学会第21回海岸工学講演会論文集, 1974.
- 4) 茂木昭夫: 海岸および海底の Rhythmic pattern について, 東北地理, 第15巻, 第3号, 1963.
- 5) Dolan, R.: Coastal landforms, crescentic and rhythmic, Geol. Soc. Amer., Vol. 82, 1971.
- 6) 白井 享・土屋義人: 大潟海岸における海岸変形の特徴について (2), 海浜地形の特性, 京大防災研究所年報, 第16号B, 1973.
- 7) Sonu, C. J.: Three-dimensional beach changes, Jour. of Geol., Vol. 81, No. 1, 1973.
- 8) 白井 享・土屋義人・芝野照夫: 大潟海岸における海岸変形の特徴について (3), カスプと底質の特性, 京大防災研究所年報, 第17号B, 1974.
- 9) Harris, T.F.W.: Nearshore circulation, Field observations and experimental investigations of an underlying cause in wave tanks, Symposium on Coastal Eng., South Africa, 1969.
- 10) Gorycki, M. A.: Sheet flood structure, Mechanism of beach cusp formation and related phenomena, Jour. of Geol., Vol. 81, No. 1, 1973.
- 11) 日野幹雄: 応答性を考慮した海浜流系と海浜地形の発生, 発達に関する理論, 土木学会論文報告集, No. 237, 1975.