

カスプの形成に関する研究

玉 井 佐 一*

1. 緒 言

浅海域の漂砂の動向について従来から多くの考察がなされているが、特に碎波点より以浅の漂砂移動に伴う海浜地形の変化は波と流れが関連してその解明はさらに複雑である。

筆者はここ数年来、高知海岸の調査や漂砂移動に関する実験を行ってきたが、それらの中で汀線付近にできるリズムカルな砂浜形状を度々観察することができた。このような地形、すなわちカスプおよび弧状砂州の形成は波の遡上、越波などに重大な影響をおよぼすとともに防災構造物などの安定性や効果についても重要な問題である。またこのような海浜地形の成因は海浜流と関連して興味ある問題であるが、その成因についてはまだ不明確な問題が多い。

本間・鮮于^{(1),(2)}は外国の例、またわが国の海岸調査から弧状砂州の成因についてフェッチ有限、海底勾配が緩やかであることを二条件をあげている。また、Bowen・Inman⁽³⁾はエッジ・ウェーブに伴う入射波高の海岸線方向の非一様性による離岸流の問題をあげ、また Sonu (鮮于)⁽⁴⁾は海底地形の不均一性による海浜流の問題を検討している。さらにまた堀川⁽⁵⁾は湘南海岸での調査から Bowen・Inman の言う海岸線方向の波高の非一様性を観察している。最近に至って日野⁽⁶⁾は海浜流や海浜地形の変形は流体力学的不安定現象であるとの考えから、これらに対する理論的考察を行い、循環流と海浜地形の変化との関連性を検討され興味ある結果を示されており、いずれもカスプや弧状砂州の成因について活発な考察が進められている。

この研究はカスプおよび弧状砂州の形成について海浜勾配および波特性を種々変えて実験的に検討し、特にその形状の変化について考察した。また実際海岸におけるカスプおよび砂州に関する調査結果とも若干の対比を行い、このような海浜地形の成因究明の一段階としたものである。

2. 実験設備および実験方法

実験には長さ、20 m、幅 10 m、深さ 60 cm の波浪水槽を用いた。この水槽の一端に中央粒径 $d_{50}=0.28$ mm、

比重 2.66 の均一な自然砂を用いて海浜勾配 $i_0=1/10$ 、 $1/15$ 及び $1/20$ の一様斜面を作り、波は汀線に直角に入射するようにした。なお水深は 50 cm とし、波はフラップ型造波機によって起した。実験波は周期 $T=0.8\sim 2.2$ sec の範囲で、 $i_0=1/10$ では沖波波高 $H_0=1.5\sim 7.6$ cm、沖波波形勾配 $H_0/L_0=0.004\sim 0.061$ について、 $i_0=1/15$ では $H_0=1.5\sim 10.7$ cm、 $H_0/L_0=0.005\sim 0.035$ とし、また $i_0=1/20$ では $H_0=2.1\sim 7.3$ cm、 $H_0/L_0=0.012\sim 0.046$ を対象とした。地形変化の測定は汀線付近では 25 cm 間隔に、沖側では 50 cm 間隔に砂面測定器を用いて行った。またカスプおよび弧状砂州などの形状は平衡地形に達した後に測定した。特にカスプについては図-1 に示すようなスパン l_0 、高さ h_0 および幅 r_1 、 r_2 などの測定を行い検討した。

海岸の汀線付近の前進、後退によるリズムカルな海浜地形を sand waves とか shoreline rhythms, または large-cusp などと呼んでいるが、ここでは単にカスプと呼ぶことにする。またこれより沖の地形変化に関しても弧状砂州、半月型砂州 (crescentic bar) などその形状や発生位置があまりはっきりと区別されていないようである。ここでは前浜部の汀線のすぐ沖に形成される砂州のうち三日月型のものを三日月型砂州とし、外浜部の波状の砂州を弧状沿岸砂州と呼ぶことにした。

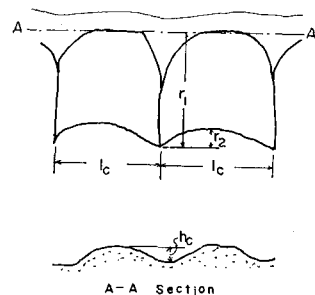


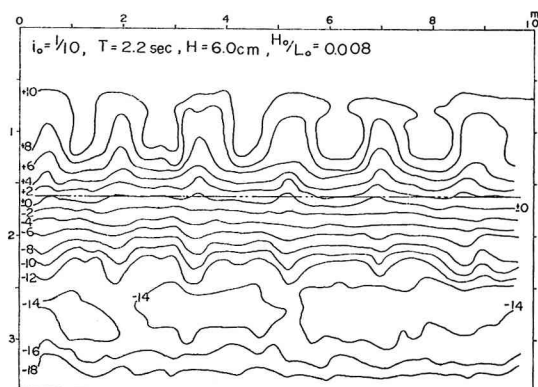
図-1 カスプ模式図

3. 実験結果とその考察

(1) $i_0=1/10$ の場合

一様勾配をもつ砂浜に波を作用させると、その波特性に応じて時間の経過とともに海浜地形が変化し、ついには平衡海浜に達するが、このような地形を平面的に見たものが図-2 である。この実験は $T=2.2$ sec、 $H=6.0$ cm、 $H_0/L_0=0.008$ のいわゆる flat な波を作用させた時の海浜変化図である。この場合 $H/d=2.14\times 10^2$ で、侵食、堆積海岸の限界曲線から見ると、堆積海岸に相当するものである。図にみられるように $-12\sim -16$ cm 付

* 正会員 高知大学助教授 農学部農業工學教室



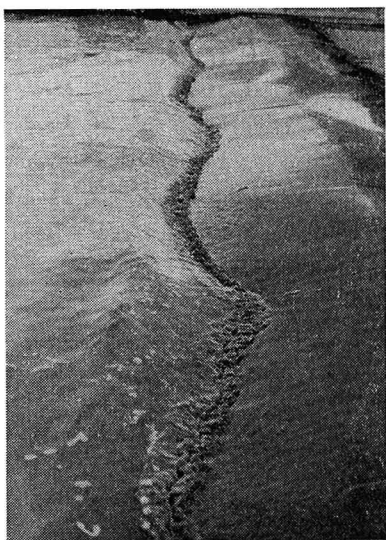
図—2 海浜地形の変化

近の砂が陸側に運ばれるとともに前浜部に堆積によるリズムカルな砂浜形状、すなわちカスプが形成され、さらに沖側にはこれと対応して波状の砂州すなわち弧状沿岸砂州が形成されている。

このような地形はいかなる原因によって生ずるのであろうか。上記のような地形変動の特性から推論すると、カスプ斜面上凸部を遡上した波は砂をともなうて凹部を流下し沖側へ堆積させるもので、沖側 -12 cm 付近と前浜との間に循環流が存在することが考えられる。日野⁶⁾や、Bowen・Inman⁸⁾ および鮮⁷⁾による海浜の流れと海浜地形の変動との関連性についての考察と関係し興味ある結果である。さらにこの付近の平面的流速分布や汀線方向

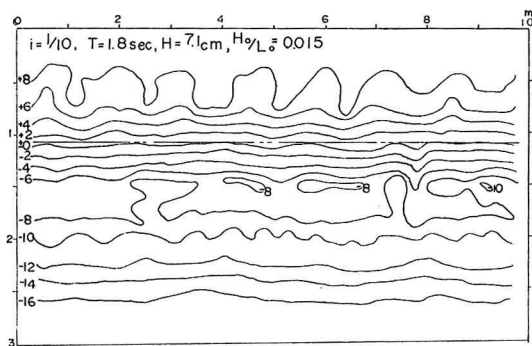
の波高の変化などとの関連性について検討して行く考えである。写真—1 は汀線方向の波の峯を示したもので、すでにカスプ凹部では波高が高くなっていることがわかる。

次に、 $T=1.8$ sec, $H=7.1$ cm, H_0/L_0

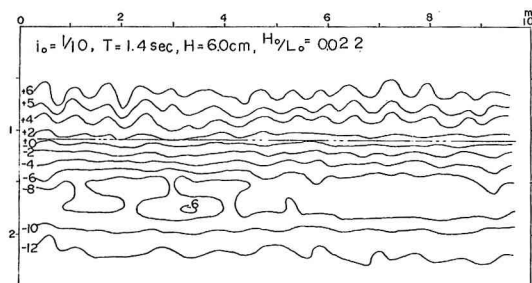


写真—1 入射波の変形

$=0.015$ としたときの地形変化が図—3 である。この場合も前浜部に顕著なカスプが見られる。しかし沖の弧状沿岸砂州はほとんど見られなくなる。さらに波形勾配を大きくした時の海浜地形の変化を図—4 に示す。この場合は、 $T=1.4$ sec, $H=6.0$ cm, $H_0/L_0=0.022$ であり、前浜部にスパンの短いカスプが発生する。図によれば汀線

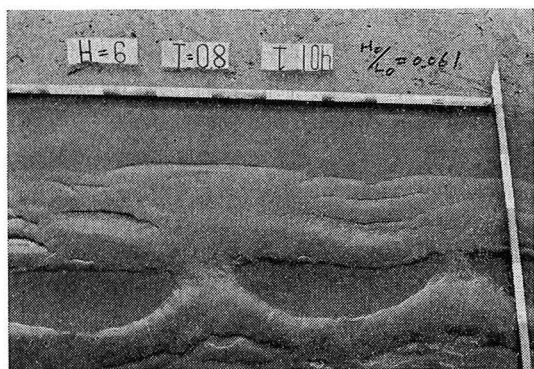


図—3 海浜地形の変化



図—4 海浜地形の変化

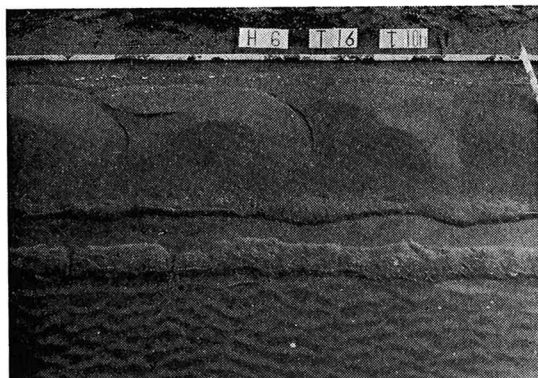
の前進は顕著ではないが、沖の砂が岸側に運ばれ堆積海岸を形成している。しかし沖側には図—2 のような明確な弧状砂州は見られない。一方、汀線から 50 cm 沖側に三日月型砂州が形成されるようになる。波形勾配をさらに $H_0/L_0=0.061$ と大きくした場合の汀線付近の地形変化を写真—2 に示す。これからはカスプの生成は認めら

写真—2 三日月型砂州の形成 ($i_0=1/10$)

れないが、スパン 80 cm 程度の明確な三日月型砂州が認められるようになる。

以上 $i_0=1/10$ の場合の地形変化、特にカスプおよび三日月型砂州の生成についてまとめると、

この実験の範囲内では $H_0/L_0 \geq 0.040$ となるとカスプはほとんど形成されないようになる。一方、三日月型砂州については $H_0/L_0 < 0.016$ では形成されないが、 H_0/L_0 の増大とともに明確に現われるようになる。特に $H_0/L_0=0.016$ の場合には写真—3 に示すように三日月型ではな

写真-3 直線状砂州の形成 ($i_0=1/10$)

く、直線状の砂州が形成される。

(2) $i_0=1/15$ の場合

この場合も $i_0=1/10$ と同様平衡地形に達するとカスプまたは三日月型砂州の著しい変動は見られなかった。

図-5 は $T=2.2$ sec, $H=3.7$ cm, $H_0/L_0=0.005$ の flat な波の場合のカスプおよび弧状砂州の生成状況である。この場合は堆積海岸に相当するものであって、汀線の前進が見られる (図中二点鎖線が初期地形の汀線)。これは沖の $-8 \sim -12$ cm 付近の砂が運ばれ堆積したものである。したがってこのような flat な波の場合にも明瞭なカスプが形成されることがわかる。次に $T=1.8$ sec, $H=7.1$ cm, $H_0/L_0=0.015$ の場合の海浜地形の変化を図-6 に示した。 $i_0=1/10$ の場合の図-3 に比べてカスプの形状はあまりきれいではなく、沖地形も複雑に変形している。さらに波形勾配を大きく $H_0/L_0=0.035$ とし

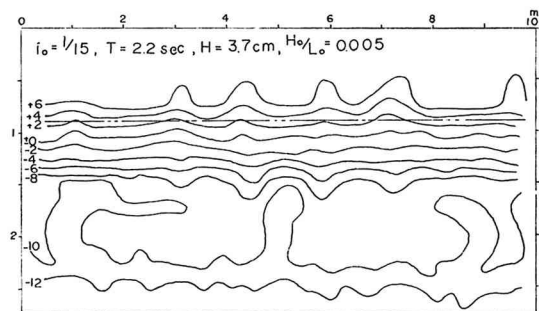


図-5 海浜地形の変化

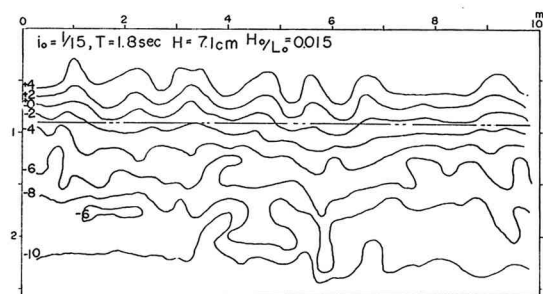


図-6 海浜地形の変化

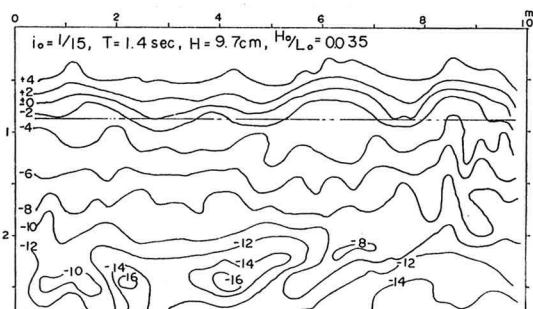


図-7 海浜地形の変化

た時の海浜地形の変化が図-7である。図-5の $H_0/L_0=0.005$ の場合に比べてカスプのスペンが大きいことがわかる。またこの時は $H_0/L_0>0.025$ であり、侵食による汀線の後退があり、沖側に砂州が形成されている。さらに波形勾配を大きくするとカスプは不明瞭となり、形成されないようになる。写真-4 は $H_0/L_0=0.025$ の場合であるが、汀線より沖側付近にカスプと対応して明瞭な三日月型砂州が形成されている。

写真-4 カスプと三日月型砂州の形成 ($i_0=1/10$)

以上 $i_0=1/15$ の場合の海浜変化についてまとめると、堆積海岸と侵食海岸とはカスプの形状が異なる。すなわち堆積海岸では前浜部へ沖側の砂を盛り上げて形成されるのに対し、侵食海岸では前浜部の砂の減退によってリズミカルな砂浜形状が形成される。しかし一般に堆積海岸に明瞭なカスプの形成が見られ、侵食海岸においては $H_0/L_0 \approx 0.035$ 程度までがカスプ形成の限度と考えられる。しかし三日月型砂州については $i_0=1/10$ の場合と同様、波形勾配が大きくなるにしたがって明瞭になる。

(3) $i_0=1/20$ の場合

$T=1.4$ sec, $H=4.3$ cm, $H_0/L_0=0.015$ の波を4時間作用させた時の地形変化状況が写真-5である。汀線付近にはスパン $l_0=140 \sim 160$ cm のカスプが見られる。しかしこの場合を除けば $i_0=1/20$ では全般的にカスプの形成が不規則で $i_0=1/10$ または $1/15$ に比べて形成されにくいようである。もちろん $H_0/L_0>0.040$ ではカスプは認められない。

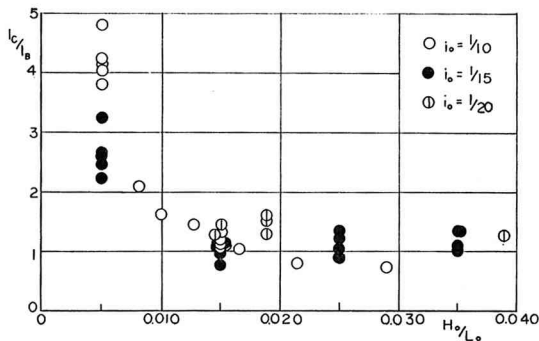
写真-5 カスプの形成 ($i_0=1/20$)

(4) 総合考察

以上 $i_0=1/10$, $1/15$ および $1/20$ の場合についてカスプのスパン, l_0 , 高さ h_0 および幅 r_1 , r_2 などについてまとめて考察する。

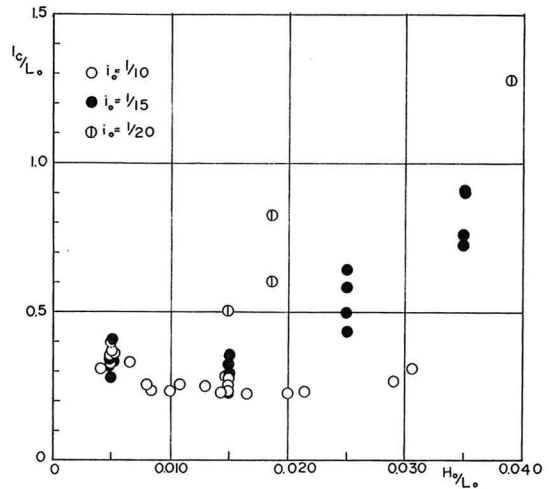
カスプや沖側の弧状沿岸砂州の形成については循環流が原因していることを推論したが、これらについては現在さらに実験によって検証を進めるよう準備中である。

さてこのような循環流の発生に関して日野⁹⁾は理論的に検討しているが、その中で循環流について碎波点より汀線までの距離 l_B を半径とする対双渦構造を形成することを示している。今筆者の実験におけるカスプのスパン l_0 と l_B との比 l_0/l_B を縦軸にとり、横軸に H_0/L_0 をとって示すと 図-8 のようである。これからわかるよ

図-8 l_0/l_B と H_0/L_0 との関係

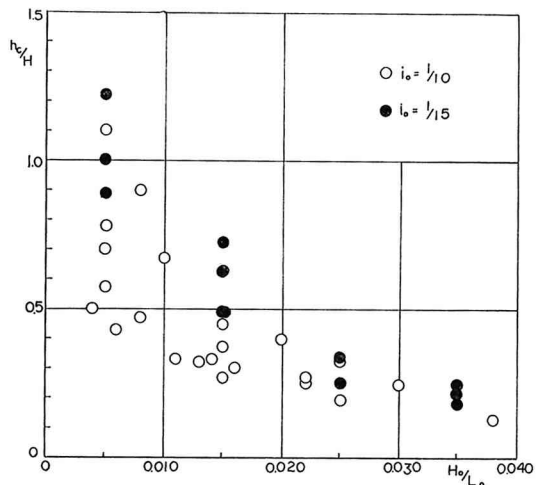
うに $H_0/L_0 \leq 0.005$ の場合, $l_0/l_B=2\sim5$ の値を示すが, H_0/L_0 が大きくなるにしたがって l_0/l_B は減少し, $H_0/L_0 \geq 0.015$ で $l_0/l_B=1$ となる。すなわちカスプのスパンが, 循環流の半径にほぼ等しくなるようである。

一方, l_0/L_0 と H_0/L_0 との関係を示すと 図-9 のようである。図より, $i_0=1/10$ および $1/15$ とともに $H_0/L_0=$

図-9 l_0/L_0 と H_0/L_0 との関係

0.005 ではほとんど l_0/L_0 の値は変わらず $H_0/L_0=0.010$ 付近で最小値を示し, $i_0=1/10$ では H_0/L_0 が大きくなっても l_0/L_0 の値はあまり変化しないが, $i_0=1/15$ では $H_0/L_0 > 0.015$ では l_0/L_0 は増大する。また $i_0=1/20$ では実験値は少ないが, 前二者の場合に比べて全般的に l_0/L_0 は大きい。これからわかるように同一の H_0/L_0 に対しても i_0 が緩やかなほどカスプのスパンは大きいことがわかる。これらの相違の原因を明白にするためにはさらに斜面上の波の挙動について検討しなければならないが, 初期勾配 $i_0=1/15\sim1/20$ と緩やかな場合, 斜面上の遡上波が流下する際の左右への拡がりも大きく, カスプのスパンのより大きな成長に貢献するが, $i_0=1/10$ では斜面勾配が急なことから重力の流下方向の成分が強くなり, 左右の拡がりも緩勾配のものに比べて弱く l_0 が限定されることが考えられる。

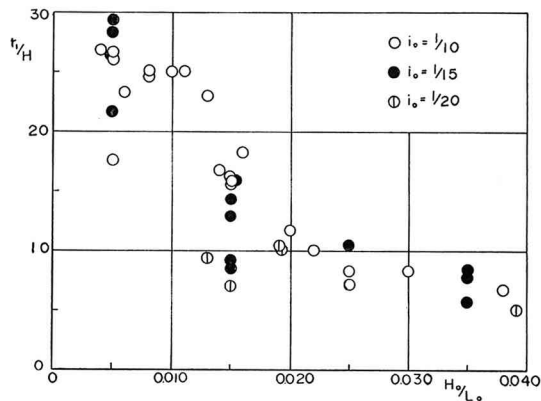
次にカスプの高さ h_0 と波高との比 h_0/H を縦軸に横軸に H_0/L_0 をとって示したものが, 図-10 である。実

図-10 h_0/H と H_0/L_0 との関係

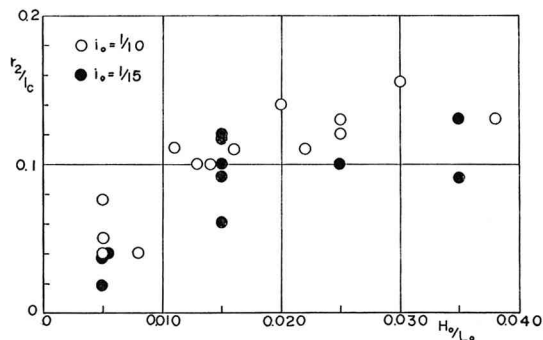
験値のちらばりは大きい、 H_0/L_0 が大きくなるにしたがって h_0/H は減少し、 $H_0/L_0 > 0.040$ となるとカスプの形成が不明確になることがわかる。また初期勾配の違いによる h_0/H の違いは顕著ではないが、やや $i_0 = 1/15$ の場合が大きいようである。

カスプの幅 r_1 について見ると図—11 のようである。横軸は上記同様 H_0/L_0 を、縦軸に r_1/H を示してある。 H_0/L_0 の増加にしたがって r_1/H は減少する。

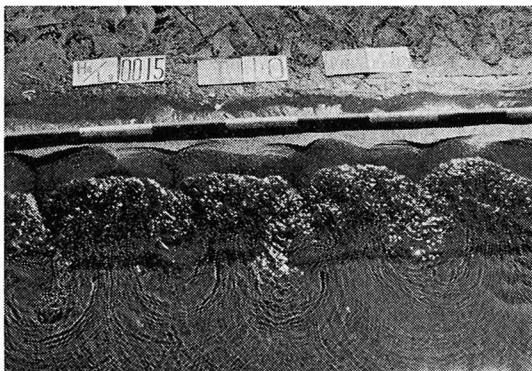
また r_2/l_0 と H_0/L_0 との関係を図—12 に示す。実験値のばらつきが大きい、 $H_0/L_0 \leq 0.05$ では H_0/L_0 の増大にしたがって r_2/l_0 の値は増大するが、 H_0/L_0 の大きい範囲 ($H_0/L_0 > 0.020$) ではその値の変化は少ない。



図—11 r_1/H と H_0/L_0 との関係



図—12 r_2/l_0 と H_0/L_0 との関係



写真—6 海浜上における波の挙動

以上カスプの形成について考察してきたが、写真—6 は砂浜上の遡上波がカスプの谷にそって流下しているもので、沖側への砂浜の成長をうながしており循環流が存在することが考えられる。

次に沖の弧状砂州および三日月型砂州の形成と波特性との関係について見ると波形勾配の小さい flat な波の場合に一般に弧状沿岸砂州ができやすく、 $H_0/L_0 > 0.015$ となると砂州はほとんど見られなくなる。一方、三日月型砂州は steep な波の場合に形成されやすく、それも $H_0/L_0 > 0.016$ の条件下で最も顕著に認められる。この実験を通じて $H_0/L_0 \div 0.015 \sim 0.016$ が弧状砂州および三日月型砂州の形成の限界と考えられる。本間・鮮干¹⁾の新潟、富山での海岸調査結果によれば波形勾配が大きいと、このような砂州が促進され、flat な波は砂州を平坦化した一方的な漂砂のある所に直線的砂州が多く存在すると発表されている。

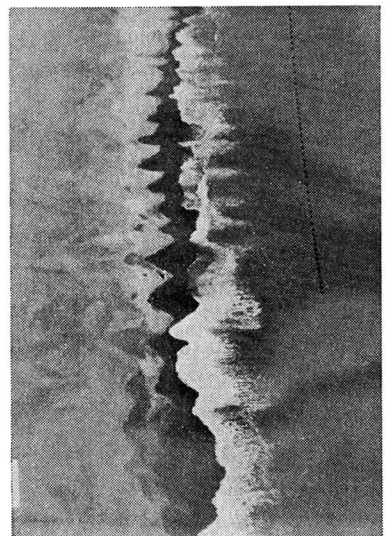
三日月型砂州の形成についてはその発生位置が碎波のうち込み点に見られることから碎波形態の相違が原因することが考えられる。すなわち巻き波型碎波と崩れ波型碎波の相違が原因するであろうが、速水⁷⁾による巻き波および崩れ波の限界曲線による波特性と砂州の発生による上記のような波特性とは一致をしない。

4. 実際海岸におけるカスプおよび砂州の形成について

実際海岸におけるカスプや弧状砂州についての調査研究は上記のように本間・鮮干¹⁾さらに最近 白井・土屋⁸⁾によって興味ある幾つかの問題があげられている。

写真—7 (a), (b) は高知県南国海岸におけるカスプの形成状況を示したものである。

そのスパンは写真—7 (a) では、 $l_0 = 20 \sim 30$ m, (b) では $l_0 = 15 \sim 20$ m であった。またこの場合の前浜勾配はともに約 $1/10$ である。白井・土屋⁸⁾の大湊海岸の調査結果においてもカスプの多くが浜勾配 $1/6 \sim 1/15$ (約



写真—7 (a) 南国海岸におけるカスプの形成 (建設省高知工事事務所撮影)

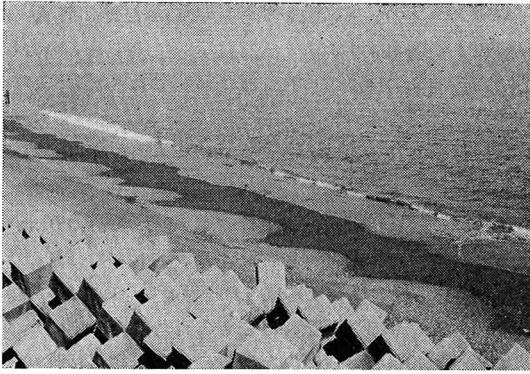
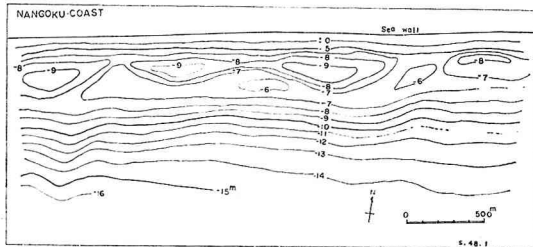


写真-7 (b) 南国海岸におけるカスプの形成

図-13 南国海岸における弧状砂州の形成
(建設省高知工事事務所測量)

1/20 で1箇所)の範囲に形成されており、特に1/7~1/10が顕著であることは筆者の実験とよい対応を示している。

図-13は写真-7(a), (b)と同じ個所の海底地形を示したものであり、距岸250m付近に弧状砂州が形成されている。

5. 結 論

底質の中央粒径 0.28mm による砂浜初期勾配 $i_0=1/10, 1/15$ および $1/20$ を対象に汀線付近の海浜変形、特にカスプや弧状砂州の形成およびその形状と波特性との関係について検討し、次のような結論をえた。

(1) カスプの形成は堆積海岸に明瞭に見られ、侵食海岸においては $H_0/L_0 \leq 0.040$ まだがカスプ形成の限度で、それ以上 steep な波についてはカスプは不明確となる。

(2) 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る。このような傾向は実際海岸の調査結果とも対応する。

(3) カスプのスパン l_0 と汀線から砕波点までの距離 l_B との比 l_0/l_B と H_0/L_0 との関係において、 $H_0/L_0 \leq 0.005$ では $l_0/l_B \approx 2 \sim 5$ の値をとり、 $H_0/L_0 > 0.015$ となると $l_0/l_B \approx 1$ となる。

(4) l_0 と沖波波長 L_0 との比 l_0/L_0 と H_0/L_0 との関係において $i_0=1/10$ の場合はその変化は少ないが、 $i_0=$

$1/15$ および $1/20$ と勾配が緩やかになると l_0/L_0 は大きくなる。また H_0/L_0 の増大とともに l_0/L_0 も増大する。

(5) カスプの高さ h_c と入射波高 H との比 h_c/H と H_0/L_0 の関係では H_0/L_0 の小さい時、 h_c/H は大きく、 H_0/L_0 の増大とともに減少する。

(6) カスプの沖側前進凸部と浜側凹部までの距離 r_1 と H との比 r_1/H と H_0/L_0 との関係では H_0/L_0 の小さい場合 r_1/H は大きく、 H_0/L_0 の増大とともに減少する。

(7) カスプの沖側前進凸部と沖側での凹部までの距離 r_2 と l_0 との比 r_2/l_0 と H_0/L_0 との関係では $H_0/L_0 < 0.05$ では r_2/l_0 は H_0/L_0 の増大とともに増大するが、 $H_0/L_0 > 0.015$ ではその値の変化は少ない。

(8) 三日月型砂州については波形勾配が大きい範囲、 $H_0/L_0 > 0.016$ で形成される。特に $H_0/L_0 = 0.016$ の場合には直線状の砂州が見られ、 H_0/L_0 の増加とともに三日月型となる。

(9) 沖の波状砂州、すなわち弧状沿岸砂州については波形勾配の小さい flat な波、 $H_0/L_0 < 0.016$ の場合に形成されやすい。

6. あとがき

実験では、 $i_0=1/10, 1/15$ および $1/20$ について検討した。また使用砂も $d_{50}=0.28\text{mm}$ のみによった。今後さらに多くの実験によってカスプや砂州の形成および形状変化と波特性との関係について検討するとともに、このようなカスプや砂州の成因についても詳細な実験によって検討して行きたいと考えている。またエッジウェーブの存在、さらに循環流とカスプの形成との関連性などについても究明したいと考えている。

最後にご指導を賜った上森千秋教授に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) M. Homma and C. Sonu: Rhythmic pattern of longshore bars related to sediment characteristics., Proc., VIIIth Conf. on Coastal Eng., 1963.
- 2) 例えば鮮干澈: 沿岸砂州について, 土木学会第18回年次講演会講演集, II—41, 昭38.
- 3) A. J. Bowen and D. L. Inman: Edge waves and crescentic bars., Jour., of Geophys. Research, Vol. 76, No. 36, 1971.
- 4) C. J. Sonu: Field observation of nearshore circulation and meandering currents., Jour. of Geophys. Research, Vol. 77, No. 13, 1972.
- 5) 堀川清司: 海岸工学, 東大出版会, 昭48.
- 6) 日野幹雄: 海浜流系の発生理論 (3), 土木学会第20回海岸工学論文集, 1973.
- 7) 速水頌一郎: 砕波機構 II, 土木学会海岸工学講演集, 昭30.
- 8) 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16号B, 昭48.