

# カスプ形成による海浜変形特性

玉 井 佐 一\*

## 1. 緒 言

海浜変形については、従来より数多くの研究が行われているが、それらの研究の大半は二次元波浪水槽を用いた実験であり、波浪の直接作用による汀線と直角方向の砂移動に着目し、その結果生じた海浜の縦断形状について考察したものである。このような二次元水槽における海浜変化の実験結果と現地海岸との対応について、堀川・砂村<sup>1),2)</sup>らは、実験水槽でみられるような海浜変形現象の二次元的性が現地海岸でどの程度保たれているかを疑問視するとともに、汀線変化の三次元的性の検討が重要課題であろうと述べている。

平面的な海浜変形については実際海岸における本間・鮮于<sup>3),4)</sup>の海岸地形の形態に関する研究、茂木<sup>5)</sup>による地理学的な海浜地形の変化に関する調査結果などがみられるが、画一的な研究成果は少ない。

最近海浜流に関する研究が盛んになるとともに、それらと密接な関係をもつ海浜の平面的な変形現象が注目され、複雑な碎波帯内の漂砂の動態についての考察が進められている。

著者<sup>6),7),8)</sup>はここ数年平面波浪水槽を用いた海浜の平面変形現象すなわちカスプ、三日月形砂州または弧状沿岸砂州の形成などに関する実験的考察を行い、波および海浜特性とこれら海浜変形形状との関係について明らかにし、さらに現地海浜でこのような平面地形の形成についても若干の考察を行ってきた。特に、このような平面海浜地形の変形の実験結果においては、カスプと三日月砂州または弧状沿岸砂州とが波特性の変化に伴って対応して形成されるなど興味ある事実が明らかとなった。したがって、今回はカスプの形成による海浜変形特性について検討し、従来の二次元海浜変形の実験結果とも対比して、三次元的な海浜変形の特徴について考察するものである。

## 2. 実験設備および実験方法

実験は二つの平面波浪水槽を用いて行った。一つは長

さ 20 m, 幅 10 m, 深さ 60 cm で、他の一つは長さ、幅ともに 30 m, 深さ 80 cm である。これらの水槽の一端に自然砂によって、一定勾配斜面を設けた。波向は汀線に直角に入射する場合 ( $\alpha=90^\circ$ ) と、斜め入射波として  $\alpha=70^\circ$  および  $60^\circ$  の場合とした。なお初期海浜勾配は  $i_0=1/10$ ,  $1/15$  および  $1/20$  とし、使用実験砂は中央粒径  $d_{50}=0.28$  mm,  $0.32$  mm および  $0.87$  mm とした。造波後の地形変化は、造波後 1~1.5 hr 毎に砂面測定器を用いて測定した。また、砂浜地形の変化に伴って形成されるカスプおよび砂州の形状もこれに併行して測定した。特にカスプについては前浜砂浜に形成される beach cusp と汀線の大規模な波状性で代表される large cusp の二つに着目し、また砂州については汀線近くの三日月形砂州および沖の弧状沿岸砂州について考察した。

## 3. カスプの形成と海浜形状

カスプ地形の形成に伴って汀線より沖側の海浜地形もこれに対応した変動がみられる。図-1 は初期海浜勾配  $i_0=1/10$ , 周期  $T=2.2$  sec, 沖波波高勾配  $H_0/L_0=0.008$  の場合のカスプおよび弧状沿岸砂州の形成状況である。上述のようにカスプと弧状沿岸砂州とが対応して形成されている。この場合のカスプの bay と apex 部分の縦断形状を示したものが図-2 である。図よりわかるように apex 位置の前浜部における堆積が顕著であり、これに反して bay での堆積は少ない。また汀線より沖側

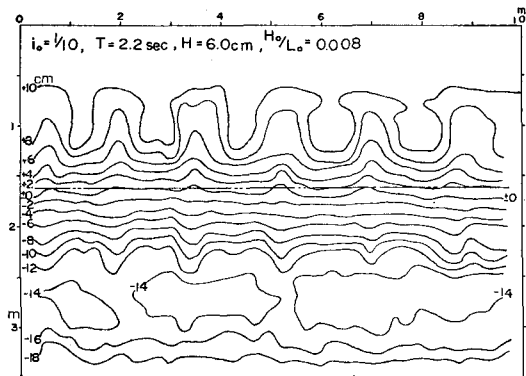


図-1 海浜地形の変化 ( $i_0=1/10$ )

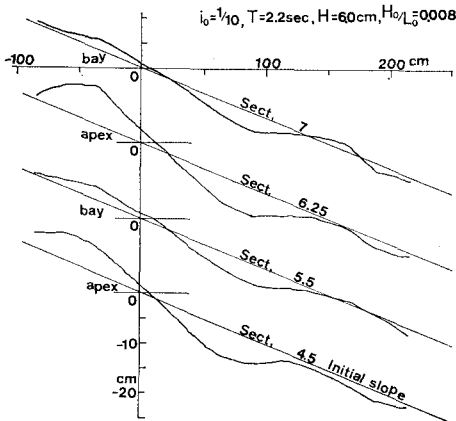


図-2 apex および bay における縦断形状 (beach cusp 形成の場合)

の洗掘深もこれに対応して apex の沖で大きく、bay 沖で少ない。図-1 におけるカスプは前浜部の顕著な砂移動によって形成された beach cusp であり、波作用によって徐々にカスプがみられるようになるが、apex では汀線と直角方向の砂移動が支配的であり、これに対し bay では遡上波の横方向の流下により、汀線と平行方向の砂移動が生じることが考えられ、apex を中央に左 bay から右 bay までの範囲内での砂移動が行われ、少なくとも同一波特性の下におけるカスプ形成後の砂移動はこのような形で平面的な砂移動の平衡が保たれていることが考えられる。

次に、 $i_0 = 1/20$ ,  $T = 1.4$  sec,  $H_0/L_0 = 0.027$  の場合の海浜地形の変化状況を図-3 に示す。この場合は図-1 にみられるような前浜部におけるカスプの形成状況と異なっており、汀線の大きな波状性によるいわゆる large cusp が形成されている。図にみられるように bay の汀線に近い位置と、さらにその沖に砂州が形成される。これは Sonu<sup>4)</sup>、茂木<sup>9)</sup> および白井<sup>10)</sup> の実際海岸における調査結果にみられるカスプと沿岸砂州との対応と同じ傾向

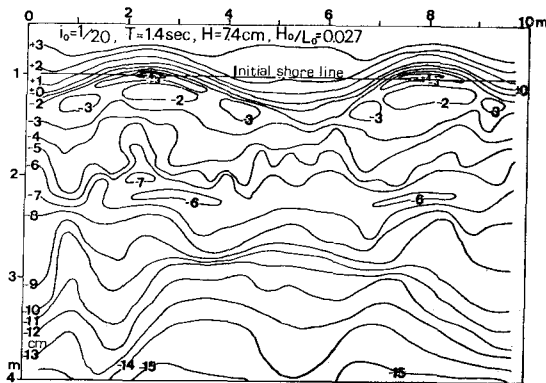


図-3 海浜地形の変化 ( $i_0 = 1/20$ )

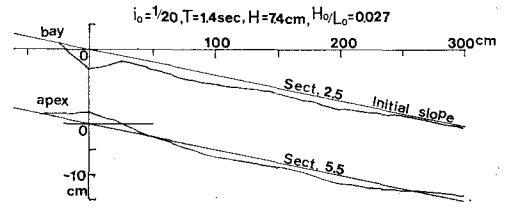


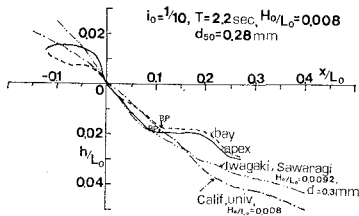
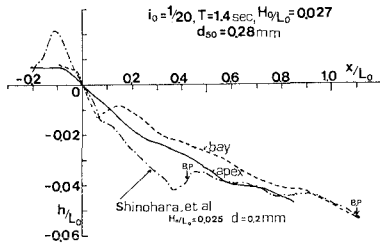
図-4 apex および bay における縦断形状 (large cusp 形成の場合)

を示している。このような海浜地形の bay (Sect. 2.5) および apex (Sect. 5.5) における縦断形状を示したものが図-4 である。これよりわかるように、apex では砂の堆積がみられるが、bay では堆積はみられず、汀線が大きく後退している。また、汀線前面に明確な runnel が形成されている。

以上のように、カスプ形成に関する三次元実験の海浜変形の特徴として、bay 位置では侵食、apex 位置では堆積が進み、堀川<sup>11)</sup>が述べているように、海浜の単一測断面によって直ちに侵食海浜または堆積海浜と規定できないことがわかる。

さてこのような海浜の縦断形状について、横軸に汀線より沖方向にとった距離  $x$  と沖波波長  $L_0$  との比  $x/L_0$  を、縦軸に水深  $h$  と  $L_0$  との比  $h/L_0$  をとって示したものが図-5 および図-6 である。図-5 は  $i_0 = 1/10$  の場合で、bay および apex での代表地形を示した。また、同図に岩垣・榎木<sup>12)</sup> およびカリホルニア大学<sup>13)</sup> における二次元実験結果を併示した。これらとの比較については、波特性および底質特性または波の作用時間が必ずしも同じではないので詳細な検討はできないが、 $i_0 = 1/10$  の beach cusp が形成されるような場合の bay の位置、それも汀線近くの  $x/L_0 \approx 0 \sim 0.1$  の範囲内ではカリホルニア大学<sup>13)</sup> の実験結果と比較的によく似た傾向を示す。しかし  $x/L_0 > 0.1$  より沖側では合わない。一方 apex の位置では bay と同じ範囲内で岩垣・榎木<sup>12)</sup> の実験結果 ( $d_m = 0.3$  mm,  $H_0/L_0 = 0.0092$ ) と同じ形状を示している。

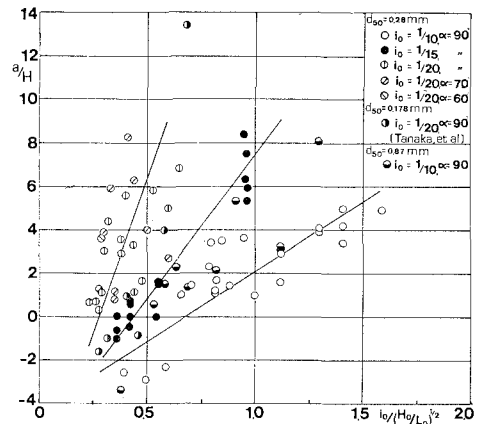
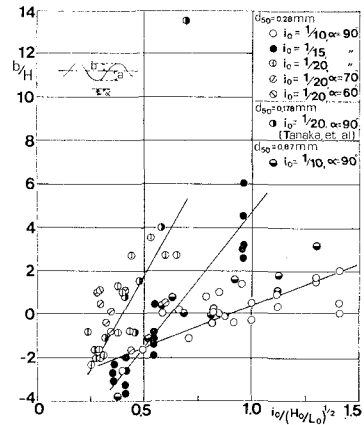
図-6 は  $i_0 = 1/20$  の場合で、図には篠原・椿<sup>14)</sup> の実験結果 ( $d_m = 0.2$  mm,  $H_0/L_0 = 0.025$ ) を併示した。それらと比較すると、bay 位置で汀線より  $x/L_0 \approx 0.03$  までは比較的似た形状を示すが、 $x/L_0 > 0.03$  のような沖または前浜上部では縦断形状は大いに異なっている。これはこのような三次元実験では、海浜地形の形成が沿岸方向の流れに左右され、それも large cusp が形成される場合であって、いわゆる沿岸方向の砂移動による海浜地形の形成が顕著であることがわかる。前述の図-5 の場合は  $i_0 = 1/10$  の急勾配海浜であり、前浜部へ beach cusp が形成される場合であって、bay または apex にお

図-5 無次元海浜縦断形状 ( $i_0=1/10$ )図-6 無次元海浜縦断形状 ( $i_0=1/20$ )

いて汀線に直角方向の砂移動が、 $i_0=1/20$  の場合より強い結果、やや広い範囲で二次元実験に類似していることが考えられる。すなわち、海浜勾配が急な場合、汀線付近、それまどく限られた範囲内で二次元性が強いことがわかる。

次に平面的な海浜変形についてみると、まず beach cusp は  $i_0=1/10$  のような比較的急勾配海浜の前浜部に形成され、また large cusp は上述のように  $i_0=1/20$  の緩勾配海浜において汀線の波状性で特徴づけられる。さて、これらのカスプは波特性および海浜特性に応じて、堆積または侵食作用によって形成され、平面的な汀線の前進または後退がみられる。それらの中で造波後の汀線変化において apex および bay とともに堆積によって全般的に初期汀線より前進するもの、侵食によって全般的に後退するもの、および両者の間で apex は前進し、bay は後退するものがある。今これらについて、初期汀線よりの apex の変化長を  $a$ 、bay の変化長を  $b$  とし、沖波波高  $H_0$  との比  $a/H_0$  および  $b/H_0$  をとって波形勾配  $H_0/L_0$  との関係をもと<sup>15)</sup>、全体的傾向として  $H_0/L_0$  の増大とともに汀線の後退が大きくなる。 $a/H_0$  と  $H_0/L_0$  との関係では  $H_0/L_0 > 0.020 \sim 0.030$  で  $a/H_0$  はほとんど正の値、すなわち apex 汀線は初期汀線より前進するが、 $H_0/L_0 > 0.030$  では後退する。一方、 $b/H_0$  と  $H_0/L_0$  の関係は  $H_0/L_0$  が小さい  $H_0/L_0 \approx 0.010 \sim 0.015$  の範囲においても bay 汀線が後退する。特に、 $H_0/L_0 > 0.025 \sim 0.030$  では全般的に汀線の後退が生じる。

二次元実験における汀線の前進または後退について、堀川・砂村<sup>2)</sup>は、波、海浜地形および底質粒径の効果を考慮した条件式を、また尾崎<sup>16)</sup>は底質の沈降速度を

図-7 apex の変化  $a/H_0$  と  $I_r$  との関係図-8 bay の変化  $b/H_0$  と  $I_r$  との関係

加味した条件式を示しているが、これらの結果と著者の実験結果とを比較すると、汀線の前進に対する境界値と本実験の apex および bay とともに前進する場合とは比較的良好合う。

さて前述の apex または bay の変化長の無次元表示  $a/H_0$  および  $b/H_0$  と Iribarren 数、 $I_r = i_0/(H_0/L_0)^{1/2}$  との関係を示したものが、図-7 および 図-8 である。図には斜め入射波および中央粒径の異なる場合、さらに田中・新保<sup>17)</sup>の二次元波浪水槽の実験結果を併示した。図にみられるように、 $a/H_0$  および  $b/H_0$  とともに  $I_r$  の増加にしたがって増大し、各海浜勾配別に直線的関係がみられる。その中で  $i_0=1/10$  の場合、 $I_r$  の増加とともに比較的ゆるやかに  $a/H_0$  および  $b/H_0$  は増大するのに対し、海浜勾配の緩やかな  $i_0=1/20$  においては  $I_r$  の僅かの変化に対し、急激に増大する。底質粒径  $d_{50} = 0.87 \text{ mm}$  の場合については  $a/H_0$  および  $b/H_0$  とともに  $d_{50} = 0.28 \text{ mm}$  の場合より、やや大きな値を示すようである。また田中・新保<sup>17)</sup>の実験結果と比較すると粒径が異なるが、 $a/H_0$  においては本実験値より、やや右寄り

に分布するが、図-8の  $b/H_0$  についてみると、比較的良好に合っている。斜め入射波については実験値が少ないが、全般的には入射角、 $\alpha=60\sim70^\circ$  程度であり、 $i_0=1/20$  であれば、顕著な相違はみられず、直角入射波  $\alpha=90^\circ$ 、 $i_0=1/20$  の場合と同じ傾向を示すようである。

各実験値について平均的に直線によって示されるが、図-7 および 8 の  $a/H_0$  と  $b/H_0$  について、特に  $d_{50}=0.28\text{ mm}$  の場合の汀線の前進、後退の境界値  $I_r$  を読みとり、このようなカスプ形成に伴う海浜の堆積、侵食結果についてまとめると表-1 のようである。

表-1 カスプ形成による汀線の前進、後退の判別  
( $d_{50}=0.28\text{ mm}$ )

| 判 別                   | $i_0=1/10$        | $i_0=1/15$        | $i_0=1/20$         |
|-----------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| apex および bay とともに汀線後退 | $I_r \leq 0.7$    | $I_r \leq 0.4$    | $I_r \leq 0.25$    |
| apex および bay とともに汀線前進 | $I_r \geq 1.0$    | $I_r \geq 0.6$    | $I_r \geq 0.4$     |
| apex は前進, bay は後退     | $1.0 > I_r > 0.7$ | $0.6 > I_r > 0.4$ | $0.4 > I_r > 0.25$ |

#### 4. カスプの形成と砂州の発生

従来、海浜の侵食および堆積は沿岸砂州の発生および不発生によって結論づけていた。しかし、田中・新保<sup>17)</sup>は自然砂および石炭粉を用いた二次元実験結果において、比高の大きい明瞭な砂州が形成される場合は少なく、暴風海浜と正常海浜の判定はきわめて困難であると述べている。尾崎<sup>16)</sup>はこのような結果について注目し、海浜の侵食、堆積についての明確な基準の制定の困難さを指摘している。そして田中・新保<sup>17)</sup>および堀川・砂村ら<sup>21,22)</sup>と同様、沿岸砂州の発生の有無による従来の侵食または堆積性の判定、分類より、むしろ汀線の前進、後退による堆積、侵食の評価の方が妥当であろうと述べている。著者の前述の結果にもみられるように、砂州は沿岸方向にも変化しており、カスプの形成と対応して波特性を示し、カスプ湾入部、すなわち bay 沖に砂州が形成され、apex では明確な比高の大きい砂州はみられず、いわゆる三日月形砂州形状を呈するようになる。したがって bay および apex では沖方向の断面形状が異なり、bay では bar 型、apex では step 型海浜断面を示す場合が多い。この結果からすれば、砂州の発生、不発生と汀線の後退と前進とは局部的または二次元的には対応するように考えられるが、全般的な海浜の侵食または堆積と海浜断面形とを対応づけることは問題があろう。山本<sup>18)</sup>の実験においても砂州の発生、不発生によって海浜型を判定する場合、典型的な海浜の形成は少なく、その判別に苦慮し従来の暴風海浜、正常海浜および遷移海浜のほかに、入射波長  $L$  と砂州頂部までの距離との関係において  $L/2$  および  $2L\sim3L$  の海浜地形が形成されるとして

いる。

著者の実験における砂州の平面的な形状についてみると汀線付近の三日月形砂州、沖に形成される弧状沿岸砂州それに直線状の砂州の三つに大別できそうである。各海浜勾配および波特性における砂州の発生とカスプとの対応などについてはすでに報告<sup>8),9)</sup>したが、上述の代表的な海浜地形の変化状況を示した図-1 および 3 においても弧状沿岸砂州とカスプとの対応がみられる。

このような三日月形砂州、弧状沿岸州および直線状砂州の形成位置と波特性との関係についてまとめたものが図-9 および 10 である。図は縦軸に海浜変形後の汀線より各砂州頂部までの距離  $y_b$  と沖波波長  $L_0$  との比  $y_b/L_0$  をとり、横軸に  $H_0/L_0$  をとって示したものである。図-9 は  $i_0=1/10$  の場合であり、 $H_0/L_0=0.015\sim0.016$  で二段砂州がみられる。一段砂州は  $H_0/L_0$  の小さい波の場合にも形成され、 $H_0/L_0$  が大きくなるに従って  $y_b/L_0$  が大きくなり、 $H_0/L_0=0.061$  で山本<sup>18)</sup>の提案した  $L/2$  形砂州がみられるようになる。また図には岩垣・野田<sup>19)</sup> ( $d_{50}=0.34\text{ mm}$ ) および篠原・椿ら<sup>20)</sup> ( $d_{50}=0.88\text{ mm}$ ) の二次元実験結果をプロットしたが、一段砂州について比較的適合傾向がみられる。図-10 は  $i_0=1/20$  の場合で、上述のようにカスプの bay 沖に多段砂州がみられ、特に  $H_0/L_0=0.023\sim0.025$  においては五段の砂州が形成され、 $2L_0$  にも達している。また、 $H_0/L_0$  においては四段砂州が  $y_b=L_0$  の位置に形成される。いずれも  $y_b/L_0$  の値は  $H_0/L_0$  が大きくなるに従って大きくなる傾向がみられ、各砂州の発生限界を图中的直線で区分できそうである。 $i_0=1/15$  の場合についても沖側に三段の砂州が形成され、それも  $H_0/L_0>0.015$  に

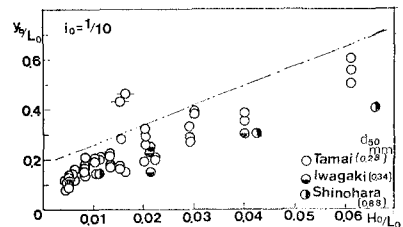


図-9  $y_b/L_0$  と  $H_0/L_0$  の関係 ( $i_0=1/10$ )

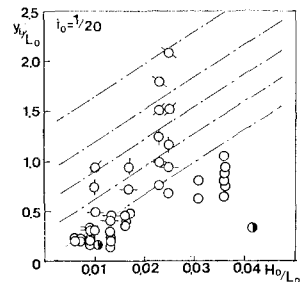


図-10  $y_b/L_0$  と  $H_0/L_0$  の関係 ( $i_0=1/20$ )

いて顕著である。

以上のように海浜勾配が緩やかになるほど ( $i_0=1/20$ ) 沖に砂州の発生が顕著になり、多段砂州がみられるようになる。

## 5. 結 語

以上、カスプの形成に伴う海浜変形特性について考察し、従来の二次元実験結果との若干の比較検討を行った。それらの結果を要約すると、次のとおりである。

1) カスプ形成による海浜の縦断形状は、カスプの bay および apex ではその形状が異なる。

2) beach cusp の apex 前浜部での堆積が顕著で、bay では少なく、沖側の洗掘深もこれに対応して apex 沖で大きく、bay 沖では少ない。

3) 海浜の平面変形について apex を中央に、左右両 bay からの汀線に沿う砂移動による変形現象が考えられる。

4) 従来の二次元実験結果との対比については、bay および apex とともに汀線に近い範囲でその形状は一致するが、沖および前浜上部では一致しない。

5) 汀線の前進、後退について apex, bay とともに前進する場合と、二次元実験結果における汀線の前進についての境界条件(堀川・砂村<sup>2)</sup>または尾崎<sup>16)</sup>)と比較的よい対応がみられる。

6) カスプ形成による apex および bay の変化  $a/H_0$  または  $b/H_0$  と Iribarren 数  $I_r=i_0/(H_0/L_0)^{1/2}$  との関係は各海浜勾配に対して直線関係がみられ、二次元実験結果(田中・新保)<sup>17)</sup>とも比較的よく合う。これより apex および bay の前進、後退を考慮した汀線の前進、後退の領域区分は表-1のように示される。

7) 砂州頂部までの距離  $y_0$  と  $L_0$  との比  $y_0/L_0$  は  $H_0/L_0$  の増大とともに大きくなり、 $i_0$  の緩やかな時多段砂州の形成が顕著で、各砂州の発生の境界を直線によって区分できよう。

8) 三日月形砂州、弧状沿岸砂州ともに bay 沖にカスプと対応して形成される。

9)  $i_0=1/20$  において、斜め入射波  $\alpha=60\sim70^\circ$  であれば、汀線変動は直角入射波 ( $\alpha=90^\circ$ ) の場合とあまり大差ないようである。

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ご懇切なご教示をいただいた。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)によるものである。ここに記して深甚なる謝意を表す次第である。

## 参 考 文 献

- 堀川清司・砂村継夫・鬼頭平三: 波による海浜変形に関する一考察, 第 20 回海講論文集, pp. 357~363, 1973.
- 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右・岡田 滋: 波による二次元汀線変化に関する一考察, 第 22 回海講論文集, pp. 329~334, 1975.
- Homma, M. and C.J. Sonu: Rhythmic pattern of longshore bars related to sediment characteristics, Proc. 8th Conf. Coastal Eng., pp. 248~278, 1963.
- Sonu, C.J.: Three-dimensional beach changes, Jour. Geology, Vol. 81, No. 1, pp. 42~64 1973.
- 茂木昭夫: 神奈川県二宮海岸における海岸・海底の季節的変動, 地理学評論, 38-12, pp. 727~738, 1965.
- 玉井佐一: カスプの形成に関する研究, 第 21 回海講論文集, pp. 115~120, 1974.
- 玉井佐一: 現地海岸におけるカスプの特性, 第 23 回海講論文集, pp. 254~259, 1976.
- 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.
- 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, pp. 79~84, 1963.
- 白井 亨・土屋義人・芝野照夫: 大潟海岸における海岸変形の特性について (3), カスプと底質の特性, 京大防災研年報, 第 17 号 B, pp. 597~606, 1974.
- 堀川清司: 漂砂特論, 1970 年度水工学夏期研修会講義集, A, 土木学会水理委員会, pp. 1~34, 1970.
- 岩垣雄一・榎木 亨: 海浜の平衡勾配と碎波による砂移動に関する実験, 第 2 回海講講演集, pp. 99~105, 1955.
- Johnson, J.W.: Scale effects in hydraulic model involving wave motion, Trans. A.G.U., Vol. 30, No. 4, pp. 517~525, 1949.
- 篠原謹爾・椿東一郎・斉藤 隆: 砂浜の平衡形状に関する研究, 九大応力研所報第 17 号, pp. 1~21, 1961.
- 玉井佐一: カスプ形成による海浜変形特性, 農土学会大会講演要旨集, pp. 448~449, 1977.
- 尾崎 晃・渡辺 揺: 波による二次元汀線変化の相似に関する実験的研究, 第 23 回海講論文集, pp. 200~205, 1976.
- 田中則男・新保 修: 移動床模型実験用底質材料としての石炭粉の特性について, 港湾技研報告, Vol. 12, No. 1, pp. 4~57, 1973.
- 山本晃一・野積 尚: 海浜変形の相似性に関する研究, 一海浜移動床模型実験の相似律一, 土木研資料, 第 975 号, 131 p., 1975.
- Iwagaki, Y. and H. Noda: Laboratory study of scale effect in two-dimensional beach processes, Proc. 8th Conf. Coastal Eng., pp. 194~210, 1963.
- 篠原謹爾・椿東一郎・斉藤 隆: 漂砂と波の特性に関する研究, 第 5 回海講講演集, pp. 61~71, 1958.