

汀線近傍地形の沿岸方向の変動特性

栗山善昭¹・友田尚貴²

茨城県の波崎海岸において1987年～1994年に取得された沖波データと29セットの汀線近傍地形データを用いて、波長400 m以上のメガカスプの特性を検討した。干潮位に近いD.L.+0.2 mのカスプ地形は、鉛直方向にはD.L.+1.5 m以上に形成されるバーム頂部まで維持されることが多いものの、平均潮位付近(D.L.+0.6 m～+0.7 m)においてD.L.+0.2 mにおけるカスプ地形が消滅することがあった。D.L.+0.2 mにおけるカスプ地形の振幅は沖波エネルギーフラックスの荒天時後の累積値が大きくなるほど大きく、その波長は周期の3乗に比例した。

1. はじめに

砂浜海岸では、汀線近傍において沿岸方向にリズムミクな地形がしばしば形成される。このような地形は、海水浴客にとって危険な離岸流および底質粒径や生息生物の沿岸方向分布など砂浜海岸の物理環境および生態系環境に大きな影響を与えている。

汀線近傍における沿岸方向にリズムミクな地形には波長が数メートルから数十メートルのビーチカスプと波長が数十メートルから数百メートルのメガカスプがある。ビーチカスプに関しては、古くからその研究が行われ、今までに数多くの実験や現地観測が行われてきた。特に、その波長に関しては、エッジ波説および自己形成説の立場から多くの検討がなされた(Sunamura, 2004)。しかしながら、振幅に関する検討はそれほど多くなく、また、ビーチカスプの鉛直方向特性に関する研究例も少ない。

一方、メガカスプに関しては、その研究例はビーチカスプに比べると非常に少なく、玉井(1977)、佐々木(1979)、武田・砂村(1984)、柳嶋(2005)などの研究が見られる程度であり、その実態には不明な点が多い。

そこで、本研究では、メガカスプに注目し、茨城県の波崎海岸で約6年間取得された地形および沖波の現地データを解析することにより、汀線近傍における地形の沿岸方向変動特性の検討を行った。

2. 現地データの概要

波崎海洋研究施設(Hazaki Oceanographical Research Station, 以下HORS)の位置する茨城県の波崎海岸では(図-1)、岸沖方向215 m、沿岸方向400 mの範囲(図-2)の汀線近傍の地形を約1ヶ月に1回、大潮の干潮時に測量している。本研究では波長が数十メートル以上のメガカスプを対象とするため、沿岸方向の測線

間隔を40 m(測線数11本)とし、岸沖方向の測線間隔は5 m(測線数44本)とした。本研究で解析に用いたデータは、1987年1月～1994年7月までに取得されたものである。

地形データ以外には、沖波波高および周期が、鹿島港沖の水深約23 mの地点(図-1)に設置された超音波式波高計により2時間毎に観測されている。工事基準面(D.L.)を基準とした干潮位、平均潮位、満潮位は、それぞれ-0.20 m, 0.65 m, 1.25 mである。

3. 沿岸方向特性の鉛直分布

解析では、地盤高さD.L.+0.2 m～+2.9 mまでの範囲における0.1 m間隔のコンター位置をsinカーブ(式(1))で近似し、最小二乗法によってメガカスプ(以下、カスプ)の各地盤高さの振幅 η および波長 λ を求めた。

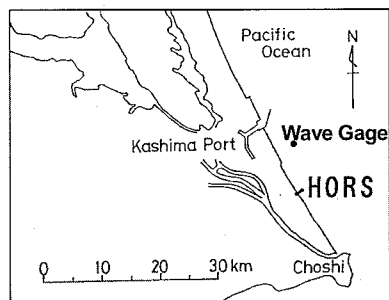


図-1 波崎海洋研究施設と沖波波高計の位置

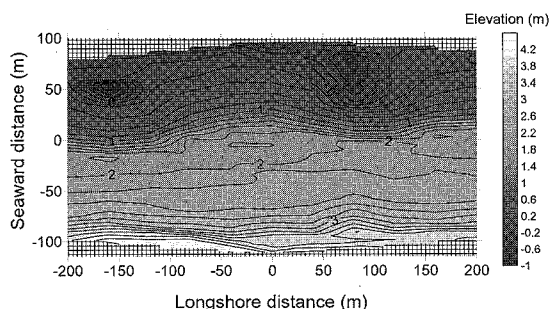


図-2 地形データの一例(1987年8月28日測量)

¹ 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 漂砂研究室長
² (独法)港湾空港技術研究所 漂砂研究室

$$y = \frac{\eta}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x + \phi\right) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 y はコンターの岸沖方向位置、 x はコンターの沿岸方向位置、 ϕ は位相である。なお、コンター位置が複数ある場合には、海側の値をコンター位置とした。

本研究では、1987年1月～1994年7月までに取得した地形データのうち、D.L. +0.2 mにおけるカスプの波長が400 m以下であった29セットのデータを解析対象とした。

メガカスプの鉛直方向の特性を検討するために、まず、カスプ地形の振幅と波長の鉛直分布を検討した。図-3は、振幅 η と波長 λ の各地盤高さの平均値を示したものである。振幅は、D.L. +0.2 mより上方では地盤高さが高くなるほど減少するものの、D.L. +1.4 m付近からは増加傾向となり、D.L. +2.5 mから再び減少している。一方、波長はD.L. +0.5 mから+0.7 mでやや大きいかれどもD.L. +0.2 mから+1.7 mまでは鉛直方向にはほぼ一様である。それより上方ではD.L. +2.3 mまで増加し、その後減少している。

続いて、D.L. +0.2 mにおけるカスプ地形が上方にどの程度維持されているかを検討するために、深浅図毎に各地盤高さの各測線のコンターの沖方向距離 $y_{i,j}$ (i は地盤高さを示す番号、 j は沿岸方向の測線位置を示す番号) から各地盤高さの沿岸方向平均コンター位置の沖方向距離 $\bar{y}_i = (y_{i,1} + y_{i,2} + \dots + y_{i,N})/N$ (N は沿岸方向の測線数) を引いた値 $y_{i,j} - \bar{y}_i$ の沿岸方向分布とD.L. +0.2 mにおけるそれとの相関を検討した。

図-4はそうにして求めた各深浅図の相関係数の鉛直分布の平均を示したものである。相関係数は、D.L. +0.2 mから上方に向けて、+0.6 mまで減少した後、D.L. +1.4 mまでほぼ一定の値をとり、その後、D.L. +1.5 mから+2.0 mまで再び減少している。このように、D.L. +1.5 m付近より上方の領域と下方の領域でカスプ地形の特性が異なる特徴は図-3で見られた特徴と同様である。

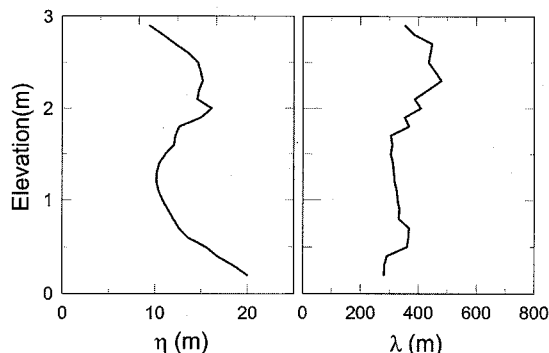


図-3 各地盤高さ毎の(a)振幅 η と(b)波長 λ の平均値

続いて、各深浅図におけるカスプ地形の鉛直方向特性を検討するために、前述の相関係数が0.5以下となる領域(有意水準5%で相関がないと判断される領域)の最も低い地盤高さを深浅図毎に求め、その頻度分布を調べた。図-5はその結果を示したものであり、D.L.+0.2 mのカスプ地形が消滅する地盤高さにはD.L.+0.5 m付近とD.L.+1.6 m付近に二つのピークがある。以下に、それぞれのグループにおける代表的なパターンを示す。

まず、沿岸方向分布が鉛直方向に維持されているケースとして、1987年8月28日の深浅図と平均断面、相関係数の鉛直分布を図-2、6に示す。D.L.+0.2 mで形成されたカスプ地形(波長230 m、振幅41 m)はD.L. +1.7 m付近まで維持されている。

次に、D.L.+0.2 mで形成されているカスプ地形がD.L.+0.5 m付近で消滅しているケースの例として、1989年7月19日の深浅図と平均断面、相関係数の鉛直分布を図-7、8に示す。D.L.+0.2 mでは波長190 m、振幅23 mの比較的發展したカスプが形成されていたにもかかわらず、平均潮位付近のD.L.+0.6 m付近ではD.L. +0.2 mと異なる沿岸方向の変動が 발달していた。しか

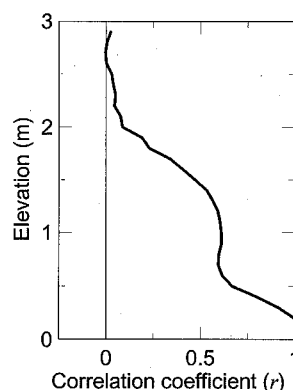


図-4 D.L.+0.2mのコンター位置に対する各地盤高さのコンター位置の相関係数

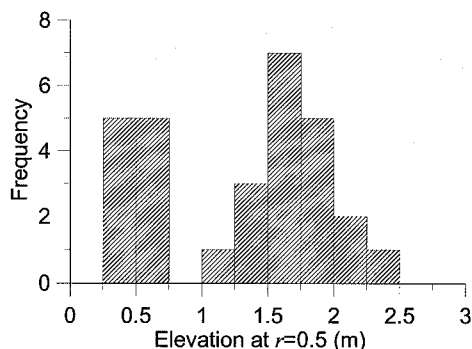


図-5 D.L.+0.2mのコンター位置との相関係数が0.5以下となる地盤高さの頻度

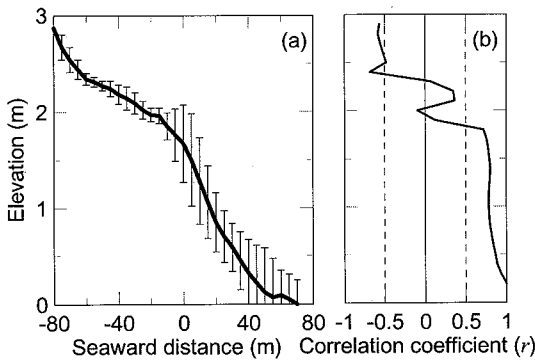


図-6 (a) 1987年8月28日における平均断面(太い実線)と地盤高さの標準偏差の2倍(細い実線), および(b) D.L.+0.2m のコンター位置との相関係数

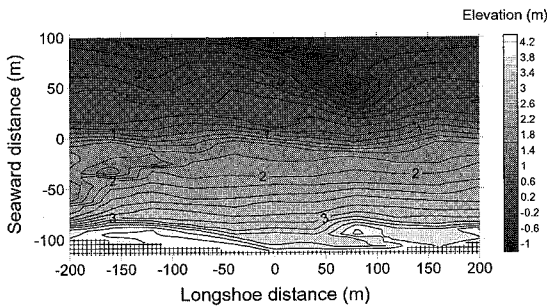


図-7 汀線近傍の地形 (1989年7月19日測量)

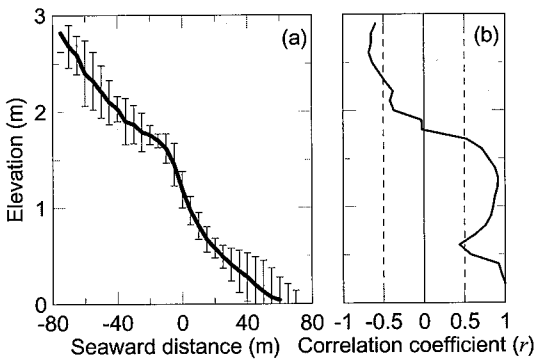


図-8 (a) 1989年7月19日における平均断面(太い実線)と地盤高さの標準偏差の2倍(細い実線), および(b) D.L.+0.2m のコンター位置との相関係数

し、それより上方では D.L.+1.0 m 付近において再び +0.2 m におけるカスプ地形と同様の沿岸方向の変動が形成されていた。

地形の沿岸方向特性の鉛直分布に関する上記の特徴を確認するために、前述の $y_{i,j} - \bar{y}_i$ に対して経験的固有関数法を適用した。図-9 はモード1から3までの固有関数の空間分布を示したものであり、図-10 は時間係数の変動を示したものである。モード1から3までの寄与率

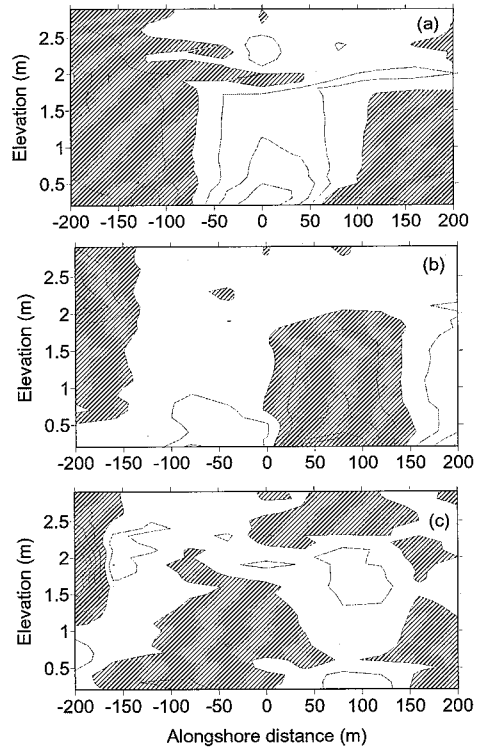


図-9 固有関数の空間分布。(a)モード1, (b)モード2, (c)モード3.コンター間隔は0.005であり,斜線が $e_n < 0$ の領域を,それ以外が $e_n > 0$ の領域を示す。

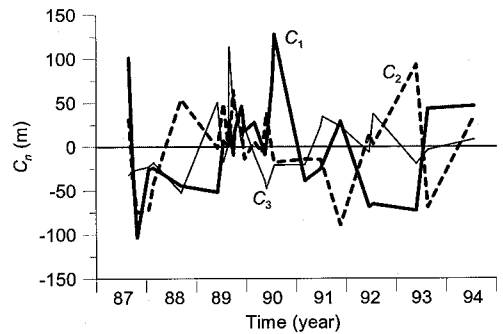


図-10 時間係数の時間変動

は、それぞれ、24%、17%、12%であった。さらに、図-11 は、各モードにおける、D.L.+0.2 m の固有関数の沿岸方向分布と各地盤高さの固有関数の沿岸方向分布との相関係数を示したものである。

図-9, 11 より、モード1, 2では、固有関数の沿岸方向分布が D.L.+0.2 m から +1.5 m までほぼ一定であり、よって、相関係数も高いのに対して、それより上方では固有関数の沿岸方向分布が変化し、相関係数も小さくなっている。この結果より、前述のカスプ地形の鉛直方向特性のうちのカスプ地形が D.L.+1.5 m 付近まで維持さ

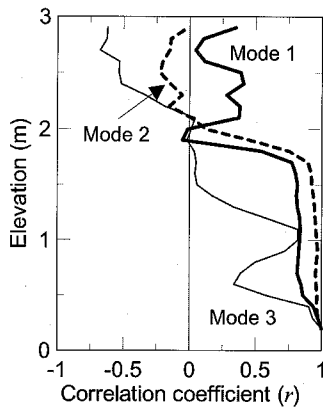


図-11 固有関数の D.L.+0.2m のコンター位置と各地盤高さのそれとの相関係数

れる特性が経験的固有関数法による解析結果のモード 1, 2 に表されていることがわかる。

一方、モード 3 では D.L. +0.5 m ~ +0.6 m で相関係数がいったん小さくなった後、+0.9 m 付近で再び相関係数が高くなり、その後、減少している (図-11)。図-8 に見られた地形の沿岸方向特性の相関係数が D.L. +0.6 m 付近で局所的に小さくなった現象は、このようなモード 3 以上の高次モードに現れていると考えられる。

続いて、これらの地形の沿岸方向分布の鉛直方向特性に影響を与えている要因としてバームに注目し、バームの特性とカスプの特性との関係を調べた。ここで、バームの頂部の位置は以下のように定義した。すなわち、各深浅図の平均断面における D.L. +0.2 m の地点を通る勾配 1/41 の直線を基準として、この直線より上方で直線からの偏差が最も大きい点をバーム頂部とする。勾配 1/41 は、波崎海洋研究施設の観測栈橋に沿って休日を除く毎日 5m 間隔で観測している断面データを用いて求めた本研究の解析期間である 1987 年 1 月～1994 年 7 月までの平均断面の前浜領域 (D.L. 0.0 m ~ +2.0 m) における平均断面勾配である。

図-12 に示すように、バーム頂部の高さは D.L.+1.5 m ~ +2.6 m の間に分布している。バームの頂部高さが最も多く分布している D.L. +1.6 m ~ +1.7 m は、経験的固有関数法のモード 1, 2 の固有関数の沿岸方向分布が変化する高さで一致しており (図-11)、また、カスプの振幅、波長の特性や D.L. +0.2 m のカスプ地形と各地盤高さのカスプ地形との相関係数が鉛直方向に変化する地点ともほぼ一致する (図-3, 4)。このことから、カスプ地形に関して以下のことが言える。カスプ地形は、基本的には、鉛直方向にはバーム頂部付近まで維持される (モード 1, 2)。しかしながら、平均潮位付近 (D.L. +0.6 m ~ +0.7 m) において、D.L. +0.2 m におけるカスプ地形が消滅することがある (モード 3 以上の高次

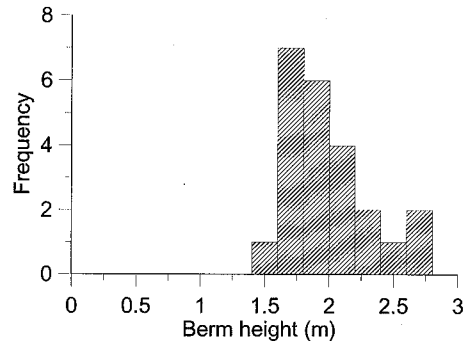


図-12 バーム頂部の高さの頻度分布

モード)。

D.L. +0.2 m のコンター位置との相関係数が 0.5 以下となる地盤高さは、カスプの振幅やバーム頂部の高さ、バームの発達具合とは相関が弱く、D.L. +0.2 m のカスプ地形が平均潮位付近で一旦消滅する原因は今後の検討課題である。

4. 振 幅

カスプの振幅が観測範囲内で一番大きかった D.L. +0.2 m のコンター位置に注目し、その振幅 η_b と波浪諸元との関係を検討した。沿岸域の地形は荒天時には沿岸方向に一樣になり、その後の静穏時に沿岸方向の変動が生ずることを考慮すると、メガカスプの振幅は、荒天時に減少し静穏時に増大すると予想される。そこで、振幅 η_b は荒天時には 0 となり、その後は、沖波のエネルギーフラックスの累積値 $\Sigma E_f \Delta t$ (Δt は時間間隔、ここでは 1 日) に比例すると仮定し、 η_b の推定値と実測値との誤差が最小になるように沿岸方向変動の振幅が 0 となる沖波エネルギーフラックス $E_{f,cr}$ を求めた。

沖波のエネルギーフラックスは波浪の不規則性を考慮した以下の式より求めた。

$$E_f = \frac{1}{16} \rho g (H_{1/3})_0^2 C_{g0} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $(H_{1/3})_0$ は沖波有義波高、 C_{g0} は沖波の群速度である。解析では 1 日平均の波高、周期から求めた 1 日平均の沖波エネルギーフラックスを用いた。

解析の結果、 $E_{f,cr} = 14.5 \text{ kN/s}$ となり、その値を基に求めた $\Sigma E_f \Delta t$ と η_b との関係は次式および図-13 の通りとなった ($r = 0.40$)。

$$\eta_b = 0.11 (\Sigma E_f \Delta t)^{0.33} \dots \dots \dots (3)$$

加藤ら (1987) は、本研究の対象である波崎海岸では毎日取得された断面データを解析し、平均汀線位置にある汀線が侵食し始めるエネルギーフラックスが約 30 kN/s であることを示した。このエネルギーフラックスは規則波のエネルギーフラックスの推定式 (式(1)の係

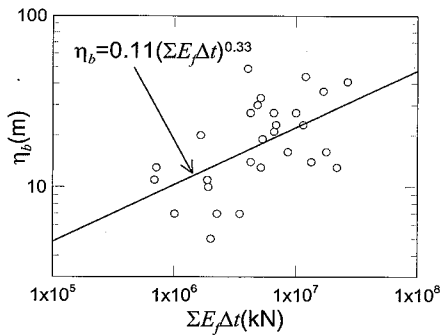


図-13 沖波のエネルギーフラックスの累積値 $\Sigma E_f \Delta t$ と振幅 η_b との相関

数が 1/16 ではなく 1/8) によって得られており、式 (2) に基づくとこの値は約 15 kN/s となる。この値は、今回得られた $E_{f,cr}=14.5$ kN/s と非常に近い値であり、カスポが消滅するエネルギーフラックスとして 14.5 kN/s が妥当であることを示していると言える。なお、 $E_{f,cr}=14.5$ kN/s は、周期を 10 s とすると、1.77 m の波高に相当する。

5. 波 長

4. と同様に、D.L.+0.2 m のコンター位置に注目し、波長 λ_b と波浪諸元との関係を検討した。メガカスポの形状には離岸流が影響していると考えられ (武田・砂村, 1984)、離岸流の発生位置の間隔に関しては、堀川ら (1973) が現地観測結果を基に離岸流の発生間隔 Y_r と周期 T の 3 乗との相関が高く、両者の関係が $Y_r=0.42 T^3$ で表されることを示している。そこで、本研究では、発達したカスポ (振幅が 20 m 以上) に対してカスポの波長 λ_b と周期 T との相関を調べた。周期としては、地形データ取得時に最も近い $E_{f,cr}$ 発生時 (カスポが消滅したと考えられる時) から地形データ取得時までの期間の平均値を用いた。

両者の相関を示した図-14 より明らかなように、カスポの波長は堀川ら (1974) によって得られた関係式より求まる離岸流の間隔 Y_r よりやや広めではあるものの、離岸流の間隔と同様に周期との相関は高い ($r=0.73$)。さらに、最小二乗法で求めた両者の相関式の周期の指数は 2.69 であり、離岸流の間隔と周期との相関式の周期の指数 3 に近い。そこで、波長が周期の 3 乗に比例すると仮定して両者の関係式を求めた。式 (4)、および図中の実線はそうにして求めた関係式である。

$$\lambda_b = 0.68 T^3 \dots \dots \dots (4)$$

6. 結 論

茨城県の波崎海岸において 1987 年～1994 年に取得された沖波データと 29 セットの汀線近傍地形データを用

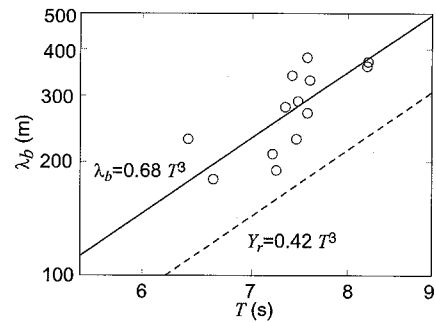


図-14 周期 T とカスポの波長 λ_b との相関。破線は堀川ら (1973) によって得られた離岸流の間隔 Y_r と周期との関係式、実線はカスポの波長が周期の 3 乗に比例すると仮定したときの両者の関係式 (式 (4)) を示す。

いて波長 400 m 以上のメガカスポの特性を検討した。その結果、以下の結論が明らかとなった。

- (1) 干潮位に近い D.L.+0.2 m のカスポ地形は、鉛直方向には D.L.+1.5 m 以上に形成されるバーム頂部まで維持される。しかしながら、平均潮位付近 (D.L.+0.6 m～+0.7 m) において、D.L.+0.2 m におけるカスポ地形が消滅することがある。
- (2) カスポの振幅は沖波エネルギーフラックスの荒天時後の累積値が大きくなるほど大きくなる。カスポの波長は周期の 3 乗に比例する。

謝辞：本研究で使用した沖波データは国土交通省鹿島港湾・空港整備事務所と当所海象情報研究室より提供されたものである。また、本研究で使用した地形データは、波崎海洋研究施設に常駐した当所漂砂研究室のメンバーならびに (株) エコーの観測補助員によって取得されたものである。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 加藤一正・柳嶋慎一・村上裕幸・末次広児 (1987)：汀線位置の短期変動特性とそのモデル化の試み、港研報告、第 26 巻、第 2 号、pp. 63-96。
- 佐々木巽 (1979)：砂浜海岸の前浜帯における地形変化－茨城県鹿島海岸の場合－、第 26 回海講論文集、pp. 253-256。
- 武田一郎・砂村継夫 (1984)：砂浜海岸の堆積過程における汀線形状－メガカスポについて－、第 31 回海講論文集、pp. 335-339。
- 玉井佐一 (1977)：カスポ形成による海浜変形特性、第 24 回海講論文集、pp. 157-161。
- 堀川清司・佐々木民雄・堀田新太郎・桜本 弘 (1974)：海浜流に関する研究 (第 2 報)－海浜流の現地観測－、第 21 回海講論文集、pp. 347-354。
- 柳嶋慎一 (2005)：汀線付近の短期的・空間的な地形変化に関する現地調査、海洋開発論文集、第 21 巻、pp. 433-438。
- Sunamura, T. (2004)：A predictive relationship for the spacing of beach cusps in nature, Coastal Engineering, Vol.51, pp. 697-711。