

強風下における近岸帯の水理に関する実験

カン アケミ*・佐藤 道郎**

1. はじめに

台風の通過時の高波浪により短時間に大規模な海浜の決壊が生じることがある。また、通常は波が届かないようなところまで爪痕を残すことがある。このようなことは単に遠方で発生したうねりの入射によって生じたわけではなく、強風の作用下での現象であり、強風がどんな役割を果たしているかをよく把握しておく必要がある。

海岸域の流れの場に及ぼす風の影響については、例えば Niedoroda et al. (1985) の解説などで大まかなイメージが得られるが、漂砂活動の活発となるもっと陸寄りの領域のこととなるとかなり限られてくるようである。風の沿岸成分は沿岸流を強めることが考えられるが、これについては波による成分に比べて小さいと見積もられている (Fredsoe & Deigaard, 1992)。汀線に直角方向の成分については set-up への寄与があるが、加藤ら (1989) の 1 年にわたる現地観測結果によれば wave set-up に比べると風による吹き寄せの効果はあまり大きくないことが示されている。また、海風が吹く場合に波だけでは岸向きの漂砂が生じるような条件下でも風によって水面に生じる岸向きの吹送流を補償する流れが中層から底層に生じ、それによって漂砂は沖向きとなって海浜断面変化が影響されるといったことが指摘されている (King, 1972)。この点は海浜変形を解明していく上で重要と考えられる。これまで海浜変形数値モデルの構築を目指して多くの研究が行われているが、漂砂に関連する流れの場や漂砂量の評価にはこれまでのところあまり風の影響は考慮されているとは言えず、残された課題の一つと言える。

本文は漂砂の卓越する領域の流れが風の作用下でどんな影響を受けるか風洞水槽で観察してみたところ、通常、機械的に起こした波で見られる沖向きの流れと比べてかなり強い流れが見られたことを動機として、風の作用下で近岸帯の水理的条件に

どんな違いが生じるのか実験的に調べ、海浜過程に対する理解を深めるの一助とすべく行った実験結果をまとめたものである。

なお、風の作用下での流れについて松永ら (1995, 1996) は高粘性流体を用い機械的に起こした波に風を作用させ、可視化により鉛直循環流を調べる等、一連の実験から興味ある結果を示している。本研究では造波機による波は加えず水槽内で風で起こした波による特に平均水位と流れの概要をつかむことに主眼を置いている。

2. 実験

実験は幅 1 m、高さ 1.2 m、長さ 30 m の風洞付き 2 次元水路を用いて行った。水路内には 1/26 勾配の鋼製の斜面が設置されている (図-1)。風は風下端のファンで吸込む方式である。ファンに至るダクトの弁の開度を調整することで風量が調節できる。

実験時の最深部の水深は 0.89 m で、本来の水路の天蓋はこの水路の上端から 0.5 m (水面から 0.81 m) の高さであるが、そのままではあまり風速を大きくできないので図-1 のように斜面上の区間で天蓋を 0.5 m 低くして実験を行った。海風が吹く場合を想定して実験を行ったことになる。

風速測定は波が砕けていない部分では熱線風速計を用いたが碎波の飛沫のかかるようになってから岸寄りの部分ではピトー管を用いて行った。水位の測定は容量式波高計で行った。また、流速測定には電磁流速計を用いた。水位や流速の測定結果はアンプからの出力を AD 変換してパソコンに取り込んで 込んで処理した。

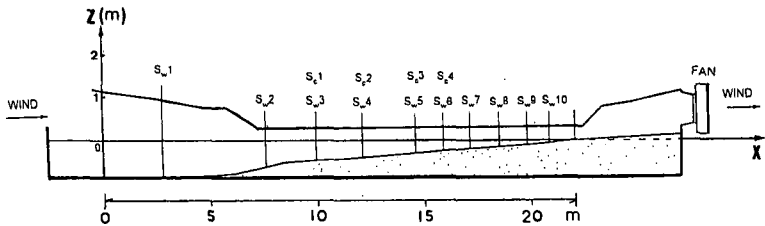


図-1 実験装置

* 正会員 工修 元鹿児島大学大学院 工学研究科海洋土木工学専攻
 ** 正会員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科

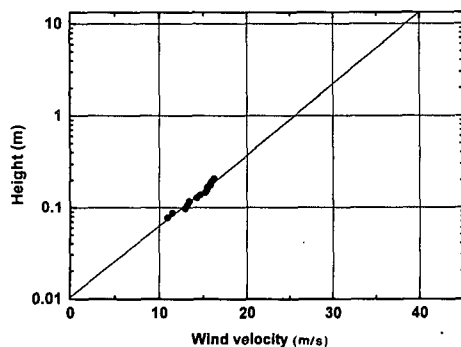


図-2 風速分布の測定例と対数分布式への当てはめ

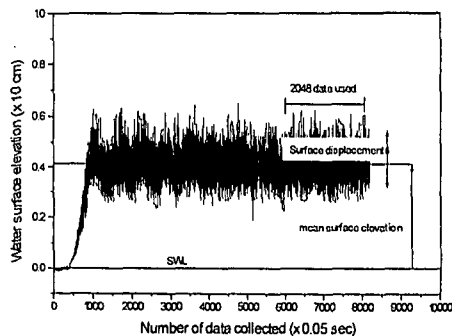


図-5 平均水位の決定

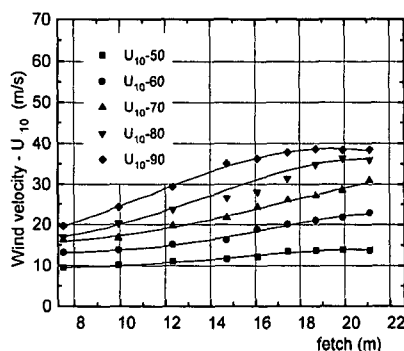
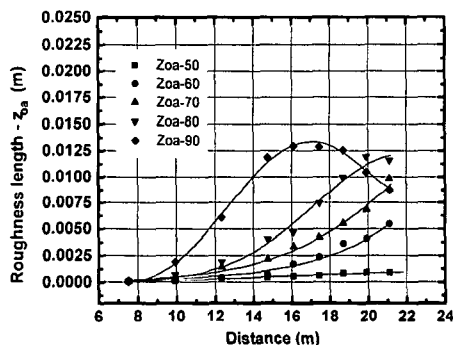
図-3 風速 U_{10} の吹送距離に伴う変化

図-4 粗度長さの変化

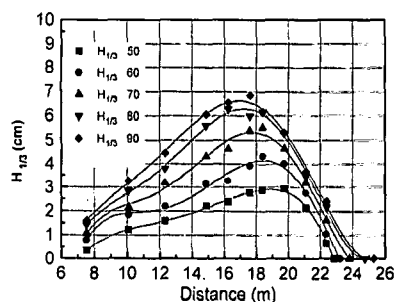


図-6 波高の変化

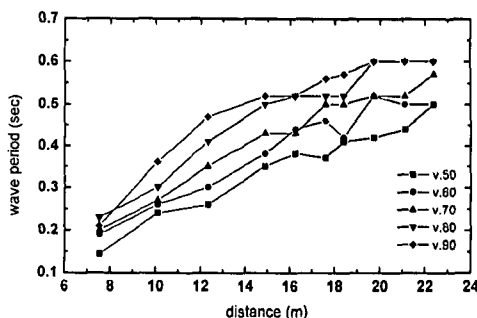


図-7 周期の変化

風の分布を10断面で高さ1cm毎に測定した。そのデータをもとに風と岸沖方向の平均流と関連付けるために海上風速 U_{10} と粗度高さ z_0 が必要となる。そこで、実験によって得られた風速の鉛直分布が対数分布に従うものとして最小二乗法で当てはめて、それから外挿により海上風速 U_{10} と粗度高さ z_0 を求めた(図-2)。ただし、その当てはめの際に天蓋付近の速度は除いてある。このようにして得られた風速と粗度の変化を図-3および図-4に示す。図中の記号の説明にある50, 60, 70, 80, 90の数字は風量調節のバルブの開度(角度)を意味しており、90°で全開である。

これらの結果を見ると水路に沿って岸方向に U_{10} は次第に大きくなっており、境界層の発達と後述する波の発達と平均水位の上昇に伴う断面の縮小による加速の影響によるものと考えられる。開度90の場合 U_{10} の値は風下と風上では2倍近い違いとなっている。

また、波の発達と碎波による波高変化、平均水位の変化、岸沖方向の平均流の鉛直分布およびその岸沖方向の変化が調べられた。平均水位は風を吹かせる前に静水時の水位を測定し、それと風の作用下での平均水位との差を求めた。風の作用下での平均水位は風を起してから5分近く経過した後0.05秒間隔でサンプルした2048個のデータの平均値である(図-5)。

3. 結 果

3.1 波高と周期の変化

本実験は風波の浅海域での発達を調べることは意図しておらず、平均水面や流れとで関連で測定している。ここでは有義波高の変化を図-6に、有義周期の変化を図-7に示した。風波の吹送距離に伴う発達と浅水変形によりフェッチとともに、風量の小さい場合には20 mあたりで、風量の大きい場合には17から18 mでピークに達し、さらに岸寄りで碎波により波高は次第に小さくなる。弁の開度が大きく風量の大きい場合には距離とともに風速が増していくため、風速がフェッチに関係無く一様な場での発達とは幾分異なっていることが考えられる。碎波は波高が最大となる前後の広い範囲で生じており、崩れ波であった。本実験では底勾配と波形勾配から崩れ波の条件にあったが、碎波のタイプに風向きが関係すること、海風の場合には崩れ波碎波になることが示されている (Galloway et al. 1989)。

3.2 平均水位の変化

海風による吹き寄せで汀線近くの水位が上昇する。汀線近くでは碎波後の波による wave set-up による平均水位の上昇もある。さらには海岸線の向きと風向きによって海岸線に沿う方向の風によっても岸近くでの平均水位の上昇が生じるし、低気圧による吸い上げの影響もあり、現地で時化の時の水面の変化におけるそれぞれの寄与を見積もるのは大変なことであろう。だが、これらの汀線付近での水位上昇が平素の波の作用の及ばないような部分にまで侵食の爪痕を残すことがありうることを考慮した場合、時化による海浜の侵食を理解する上で重要である。

本実験で得られた平均水位の測定結果を図-8に示した。汀線がどのあたりにくるか調べようと考えていたが、水位上昇に伴い汀線が後退して水路側面の硝子張り部分を過ぎて鉄板張りの部分にまで達していたため、また、斜面が鉄板で浸透しないため斜面上を薄い水膜が風に引きずられるようにブローアの入口付近まで達しており、正確にどこが汀線という判断は難しかった。いくつかの場合については斜面上に印を付けてある。実際には砂浜での浸透でこのようなことはありそうに無いが、砂浜内部が飽和した状況では水はかなり上まで上がってくることが考えられる。

この実験結果を見ると風量の大きい場合、汀線での平均水位の上昇は碎波するあたりの波高 $H_{1/3}$ より小さいもののそれに近い上昇となっている。wave set-up は碎波高の10%~20%程度であることを考えると風の吹き寄せによる水位の上昇は、その風によって生じた波による wave set-up に比べてかなり大きいことを思わせる。

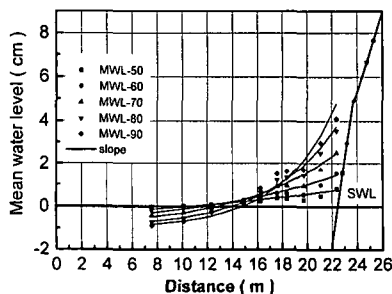


図-8 平均水位の測定結果

実際には海岸に寄せる波は海岸に吹きわたっている風だけで生じている波ばかりでなくうねりなども入っており、wave set-up はそこで水位の上昇をもたらしている風によって生じた波による wave set-up よりずっと大きい場合もありうると思われる。

加藤ら (1989) は一年にわたる膨大な現地観測結果から平均水位の上昇について調べており、興味深い結果を得ている。そこでは水位上昇量への寄与として、wave set-up が最も大きく、気圧低下、風の吹き寄せの効果はあまり大きくないことが示されている。

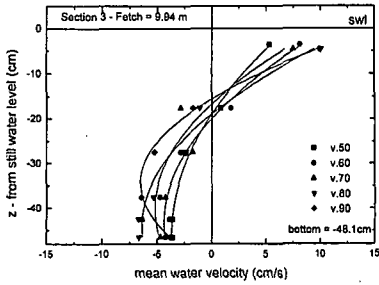
3.3 流れの変化

海風の吹き寄せに伴い岸近くでは断面の中層から下層に表面の吹送流を補償する冲向きの流れが生じる。この流れは波によって生じる冲向きのサーフゾーンの平均流を強めることになると考えられることから漂砂現象の把握にも深く関連するであろう。

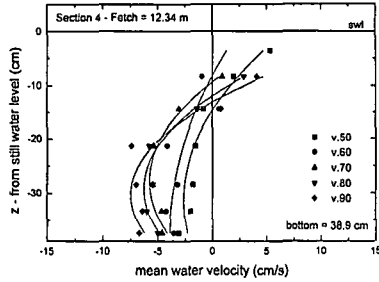
測定は図-1の造波板から10 m 弱離れた S_{w3} で示れるところから岸側の範囲の9断面である。測定結果を図-9に示した。図中の実線は流速分布の概略が分かるように挿入した多項式による近似曲線である。波の峰と谷の間の部分は測っていないが、波自身による流れと吹送流がともに岸向きに生じている。

風量が最も大きい場合、図-6から知れるように S_{w7} で波高は最大となりこれより岸側では碎波が激しくなる。風量が小さくなるにつれて波高も小さくなり碎波が卓越し始める位置は岸寄りに移ってくる。波高が最も大きくなる場所よりも沖側の領域でもかなり強い冲向きの流れが生じている。風が無く波だけでも中層部に戻り流れが生じ、水深一様な場合について Longuet-Higgins (1953) の理論をはじめいくつか理論があるが、図-6、図-7の波高と周期を持つ波に対する流れはここで得られているものの高々半分以下に見積もられる。したがって風によるところが大きいように考えられる。

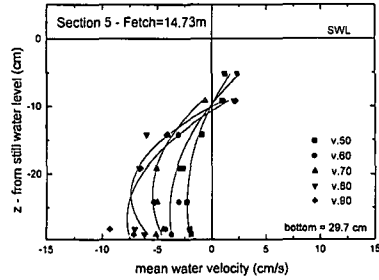
鶴谷ら (1983) は一様水深の浅いところで風が吹いた場合の吹送流について実験的に調べるとともに流速分布を与える次の式を提案している。



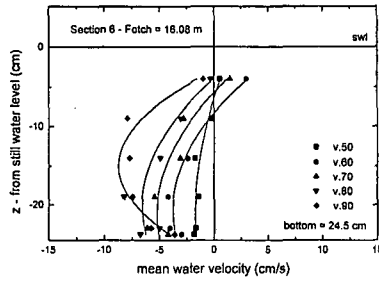
9-(1)



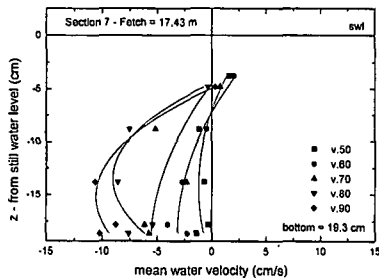
9-(2)



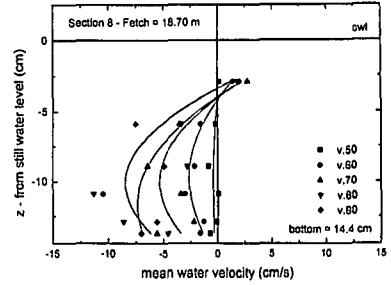
9-(3)



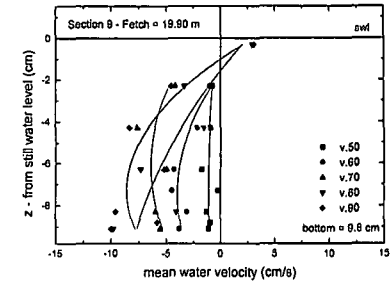
9-(4)



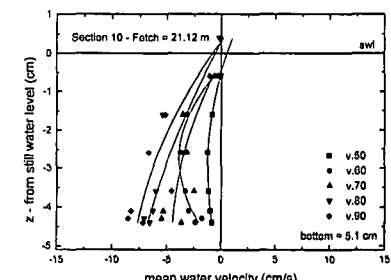
9-(5)



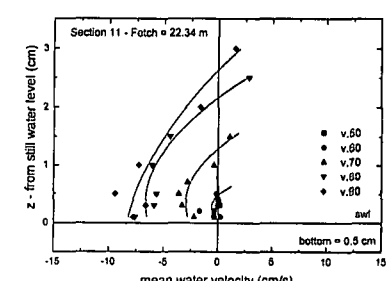
9-(6)



9-(7)



9-(8)



9-(9)

図-9 岸沖方向の平均流速分布、図中の実線は分布の概要を示すために多項式による当てはめをしたものである。波は左から右に進む。

$$u = \frac{U_{10}}{\kappa} \sqrt{C_d \frac{\rho_a}{\rho_w}} \left(\sqrt{\alpha} \ln \frac{z_{0w} + d}{z_{0w} - d} - \sqrt{m} \ln \frac{d + z_{0b} + z}{z_{0b}} \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 κ はカルマン定数、 C_d は風の抵抗係数、 α は水表面剪断力と底面剪断力の比、 ρ_a, ρ_w は空気と水の密

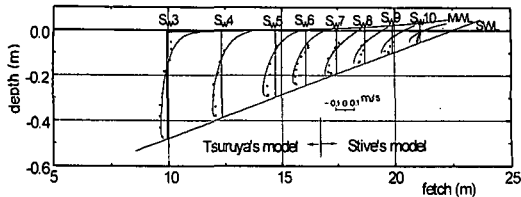


図-10 平均流速分布の岸沖方向の変化

度, z_{0w} 吹送流に対する水面の粗度高さ, d は水深, m は底面剪断力と風の剪断力の比, z_{0b} は底面の粗度高さである。

全開の場合の流速分布の岸沖方向の変化を図-10に示し, S_{w7} より沖側について鶴谷らの式による計算と比較してみた。その結果, このあたりの冲向きの流速はかなりこの式でよく表現できることが分かった。

砕波が卓越してくる領域では吹送流と底曳流れ (undertow) がサーフゾーンの流れとして重要になってくることが考えられる。ここでは, 局所的な風で生じた波の波高および周期と同じ波高, 周期を持つ機械的に発生させた波による undertow の概略の見積もりと比べて風の影響を見ることとする。undertow の計算方法はいろいろ提案されているが, ここでは Stive (1984) のものを用いている。結果は汀線に近づくほど測定値の方が小さくなっており, このあたりでは風の作用は沖側とは逆に戻り流れを弱めているようである。

4. 結 語

漂砂の活発となる領域でその水理条件に海風がどんな影響を及ぼすか風洞水槽の実験により調べた。その結果, 実験の範囲ではその風で生じる波の波高と周期を持つ波による wave set-up よりずっと大きな水位上昇が生じることが観察された。実際の状況では海岸付近の風の場合発生する波ばかりでなく, その外からくる波もあることからそれによる wave set-up が勝つこともあるであろう。だが, 両端を岬で挟まれたようなビーチで2次元性が保たれているような場合には局所的な風でもかなり水位が上昇する可能性を考慮する必要があると思われる。

風による吹送流は海風の場合中層から底層に冲向きのかなりの補償流を生じさせ, 砕波点より沖側の浅水変形領域ではその風成波と同じ波高・周期を持つ波による波浪流としての平均流より大きなものとなる。この領域では鶴谷等 (1983) の浅海域の吹送流に関する計算式で良く表現できる。この事は, 風が無い場合に比べて砕波点の沖側で, 中層から底層に強い冲向き流れが生じている

ことを示しており, サーフゾーンで巻き上げた底質を波の無い場合に比べてはるかに速く沖方向へ運びうることを示唆している。

また, 砕波が支配的で岸に向かって波高が減衰していく領域では undertow のような波浪流の支配的と考えられるが, 風によってどうなるのか既存の式で, 実験時の波の諸元を持つ波による undertow を概算し比較検討した。それらの結果, この領域では汀線に近づくほど冲向きの流れが計算値より小さくなっていった。

以上のように, 漂砂帯の波浪の状況が似たようなものであっても, 風の存在下と無い場合とでは平均流の流況にはいくぶん違いが見られ, その点を考慮した場合, 海浜変形に相違が生じることが考えられることからさらに検討を進めていく必要がある。

謝辞: 本実験を行うにあたり, 特に準備段階で中村和夫技官の助力を得た。また, 実験とデータの整理にあたり当時学部生であった松隈 一氏に助力を得たことを記し謝意を表する。

参 考 文 献

- 加藤一正・柳嶋慎一・磯上知良・村上裕幸 (1989): “波による汀線付近の水位上昇量 一波崎海洋研究施設における現地観測一”, 港湾技術研究所報告, 第28巻第1号, pp. 3-41.
- 鶴谷広一・中野 晋・加藤 始・戸秀久 (1983): “吹送流に関する風洞実験 一吹送流に及ぼす反流の効果一”, 港湾技術研究所報告, 第22巻第2号, pp. 127-174.
- 松永信博・鈴木康文 (1995): “風応力作用下で生ずる海浜鉛直循環流系の高粘性流体シミュレーション”, 平成6年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp. 324-325.
- 鈴木康文・松永信博 (1995): “風応力作用下で生起する海浜鉛直循環流系の画像処理解析”, 平成6年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp. 326-327.
- 堀 克弘・植田 操・川上裕史・松永信博 (1996): “強風時に生起する鉛直循環流の特性”, 平成7年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp. 366-367.
- Fredsoe, J. and R. Deigaard (1992): “MECHANICS OF COASTAL SEDIMENT TRANSPORT”, World Scientific, pp. 139.
- Galloway, J. S., Collins, M. B. and A. D. Moran (1989): “On-shore/Offshore Wind Influence on Breaking Waves: An Empirical Study”, Coastal Engineering, 13, pp. 305-323.
- King, C. A. M. (1972): “Beaches and Coasts”, Edward Arnold, pp. 165-189.
- Longuet-Higgins, M. S. (1953): “Mass transport in water waves”, Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A, 245, pp. 535-581.
- Niedoroda, A. W. Swift, D. J. P. and T. S. Hopkins (1985): “The Shoreface”, Coastal Sedimentary Environments (Edited by R. A. Davis, Jr.), Springer-Verlag, pp. 540-553.
- Stive, M. J. F. and H. G. Wind (1986): “Cross-shore mean flow in the surf zone”, Coastal Engineering, 10, pp. 325-340.