

碎波帯近傍における平均流の発生要因の分離

— 波崎海洋研究施設での ADCP データの解析 —

馬場 康之*・今本 博健**・山下 隆男***・吉岡 洋****

1. 緒 言

沿岸域における平均流（波動運動より長周期の流れ）は、波浪や風に起因する流れ、および潮汐、海流、密度流等に起因する流れで構成されていると考えられている。海浜変形を議論する場合には、波浪に起因する海浜流と漂砂が主外力として検討され、その他の要因は付加的に考慮されている。しかしながら、冬季季節風による日本海沿岸の海岸では、風に起因する流れ（吹送流）が広域の海岸流として発生し、広域漂砂の駆動力となっていることが指摘されている（山下ら, 1997）。一方、太平洋側の海岸付近の流れには、波浪や風以外にも、潮流、海流、密度流等の要因が複雑に入り混じった形で影響を及ぼしていることが予想されるが、それぞれの要因がどのように関連し、流れに寄与し合っているのかは、沿岸付近の流動モデルを構築する上でも興味深い問題である。

本研究では、1998 年夏に実施された「鹿島灘における海象の共同観測」の一部として行われた、運輸省港湾技術研究所波崎海洋研究施設（Hazaki Oceanographical Research Station HORS：図-1）での、海浜流の鉛直分布の ADCP（Acoustic Doppler Current Profiler）計測から得られた平均流場と、波浪、海上風、潮汐などの外力要因との関係を明確にし、碎波帯近傍における平均流の発生要因の分離を行う。

2. ADCP による平均流の連続観測

共同観測は 1998 年 9 月 10 日から 18 日を中心に行われ、ADCP による平均流の連続観測は、9 月 13 日から 10 月 7 日の約 3 週間にわたって実施された。今回の観測項目は以下に示す 2 つである。

① 高周波 ADCP（RDI 社製ワークホース、センチネル 1200 kHz）を観測棧橋の最先端付近（岸より約 380 m 地点、設置水深約 5.0 m）に設置し、平均流場の鉛直分布の連続観測

② 観測棧橋に既設の超音波波高計による波浪の計測

ADCP 計測は、1 回の計測値が 120 秒間の平均値（発信回数 1 ping）、サンプリング間隔を 4 分間として行われ、計測セル厚は 0.25 m で全 21 層にわたって実施された。後に示す結果は、全計測厚 5 m のうち上下のそれぞれ 1 m ずつを除く 3 m 厚の部分を、厚さ 1 m の上層・中層・下層の 3 つに分け、各層内で流速を平均化した結果である。

波高計データについては、棧橋に既設の 7 台全てについて、10 Hz のサンプリング周波数でのデータ収集を、ADCP 計測全期間にわたって実施した。

風速・風向についても、波崎海洋観測施設で同時に計測が行われていたが、台風 5 号による強風のため被害を受け、その後の計測が困難な状態となった。そのため、風速・風向のデータについては、銚子地方気象台における計測結果を使用する。

波崎海岸では、沖側での第一碎波と岸側での第二碎波（時には、より岸近くでの第三碎波も見られる）が観測される。波崎海洋観測施設での碎波位置の観測結果によると、平穏時には第一碎波が岸より約 200 m 以内で発生し、その際 ADCP 設置位置は碎波帯よりも外側となる。また、台風来襲時のような強風・高波浪の条件下では、観測棧橋の沖側で碎波が生じており、ADCP 設置位置は碎波帯内に位置している。このように、今回の ADCP 設置位置は、波浪・風の条件により碎波帯の内側または外側となる。

観測期間中には、合計 5 個の台風（9805～9809 号）が日本付近に来襲している。そのうち台風 5 号は 9 月 16 日

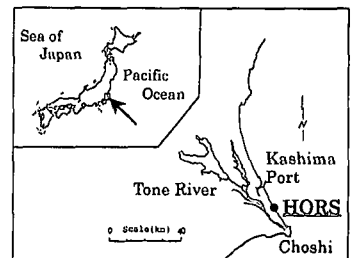


図-1 波崎海洋研究施設設置位置図

* 正会員 工修 京都大学助手 防災研究所
** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
*** 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所
**** 理博 京都大学助手 防災研究所

静岡県に上陸した後、関東・東北地方を縦断する進路を取り、台風接近時には観測地点は非常に強い風と高い波に見舞われた。また9月22日には台風7号が和歌山県に上陸しており、比較的強い波・風をもたらした。

3. 計測データの解析

図-2は、全観測期間にわたる風速成分、平均流の沿岸方向成分および岸沖方向成分、有義波高と有義波周期をまとめて示したものである。風速についても平均流同様、観測栈橋に平行な岸沖方向成分と、それに直行する沿岸方向成分に分けられており、それぞれ沖方向、南向きが正である。

観測期間中の波浪の状況は、前半には台風5号の上陸、その後の6号の接近、8号、7号の相次ぐ上陸と日本近海を台風が続いて通過したため、うねりと思われる有義波周期の大きな波が継続的に来襲している。台風5号来襲の際には、2mを越す有義波高が観測されている。

9月末から10月初頭にかけては、有義波高・周期ともに小さく平穏であったようであるが、観測期間の終わり(10/4頃)にかなり大きな有義波高と有義波周期が観測されている。これは三陸沖にあった発達した低気圧の影響が考えられる。

銚子での風速データと ADCP 計測結果を比較すると、風速と平均流は良い対応を示している。沿岸方向・岸沖

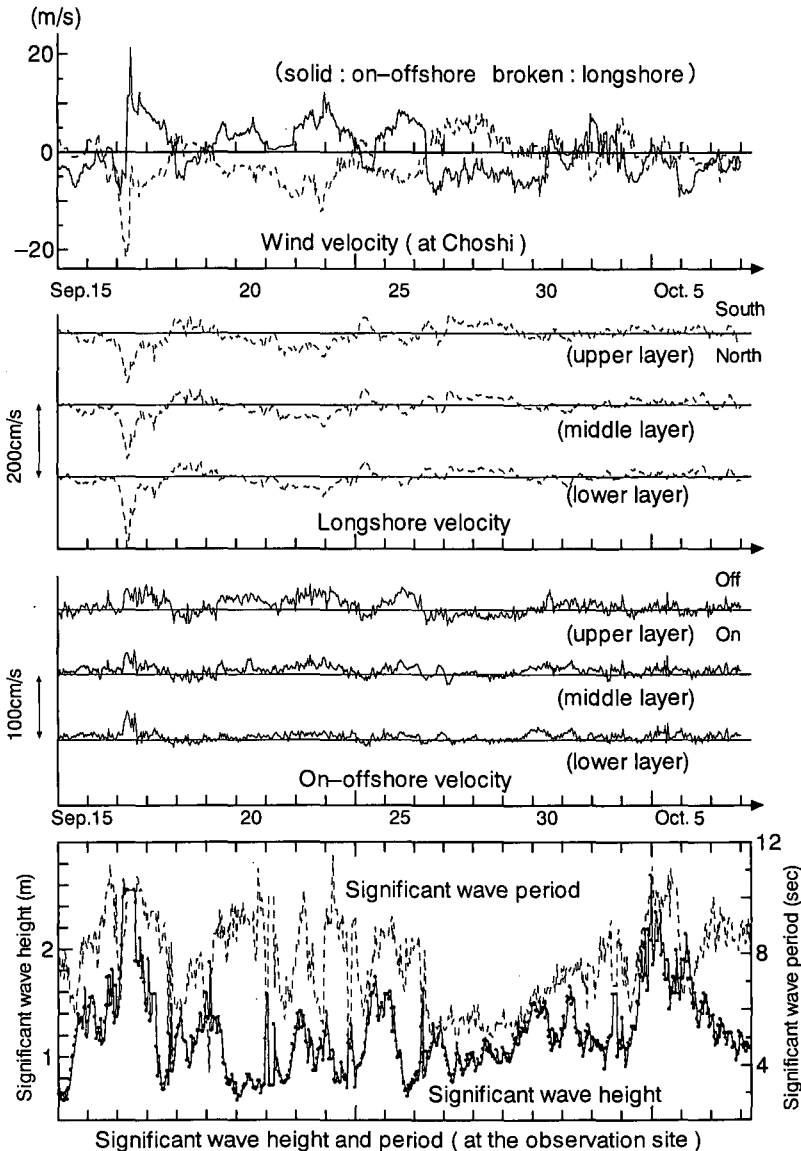


図-2 風速、沿岸・岸沖方向流速、有義波高・周期の時系列

方向別には次のようである。

沿岸方向の流速と風速については、その相関を取ると観測全期間を通じて2時間の時間遅れで極めて良い対応が見られた。上層から下層に向かって多少の流速の減衰はあるものの、全体的には鉛直方向にほぼ様な分布の流れが形成されている。一方、岸沖方向流速は、上層では風と良い対応を示すが、下層では流速値が大きく減衰し、風との明確な対応は認められなかった。

沿岸方向・岸沖方向ともに全層ほぼ一様の流動となっているのは、台風5号来襲時(9/16)のみである。この時には、沿岸方向の流動は20 m/sを越える強い風の影響を受け、2 m/s程度に達する大きな流速となっており、岸沖方向には、上層から下層まで沖向き強い流れが確認される。この強い沖向きの流れは碎波帯内の戻り流れ(undertow)であると考えられる。

3.1 潮流成分の分離

ADCPの計測結果に対して潮流の調和分析を行い、日周潮(O_1 , K_1 潮)と半日周潮(M_2 , S_2 潮)の潮流楕円を示したものが図-3である。この海域での潮汐は、日周潮と半日周潮がほぼ等しく、半日周潮がやや大きい程度であるが、潮流は観測地点では日周潮が半日周潮よりも卓越することが明らかとなった。また、潮流楕円の長軸が南北方向もしくはやや左に傾く結果となっているが、これは沿岸地域の潮流楕円は地形境界に影響されている結果であり、その長軸はほぼ海岸線に並行し、かつ短軸の短い扁平な形となっている。

ここで得られた4分潮の調和定数を用いて、観測期間中の潮流成分を推定すると、最大流速が約15 cm/s程度となる。この潮流成分と流速の計測値を比較すると、台風接近時の強風・高波浪の条件下では、全流速値に対する潮流の寄与率は数%にしかならないのに対して、平穏

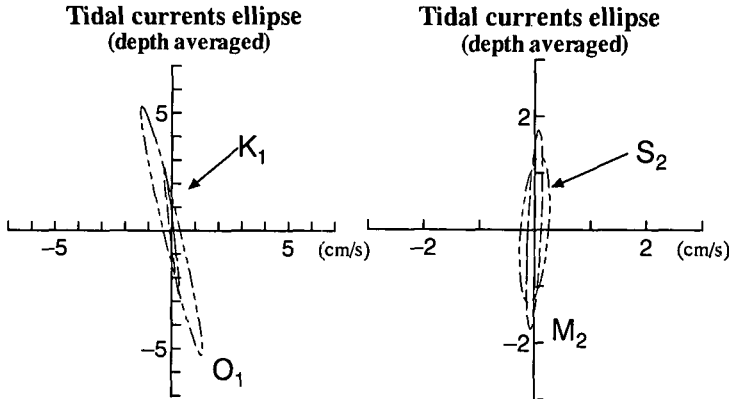


図-3 潮流楕円 (左:日周潮成分 右:半日周潮成分)

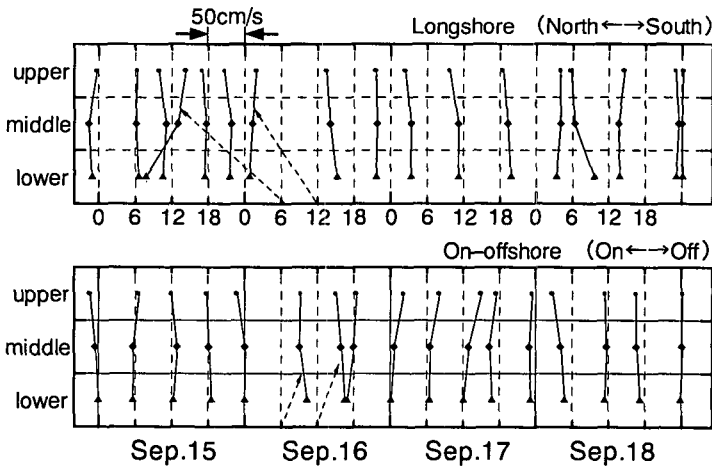


図-4 平均流(潮流成分除く)の鉛直分布

時には5割前後、大きいときには8割を越えるほどの寄与を示す場合がある。他の流動要因に対して、潮流は対象水域にほぼ恒常的に作用しているものであるが、流動全体に対する寄与は、間欠的に作用する波浪や風などの他の要因に大きく左右されており、平均流場全体から見ると副次的な役割に留まっている。

3.2 波浪・風と平均流の関係

本節では、前節で算定された潮流成分を ADCP 計測値から差し引いた結果を用いて、潮流以外の流動要因(風・波浪)と平均流場の関係について検討する。潮流成分除去後も、沿岸方向流速と風の対応は全層にわたって非常によく、岸沖方向成分についても上層の流速は岸沖方向の風とよい対応を示す。

図-4は、台風5号上陸前後の沿岸方向・岸沖方向流速成分(潮流成分除去後)の鉛直分布を6時間ごとに示したものである。

沿岸方向成分は、鉛直方向にほぼ様な分布を示しており、台風5号最接近時(9/16 12時頃)にのみ下層の流速が大きくなる結果が得られている。水深方向にほぼ様な流動が形成され、かつ風との対応が非常によいことから、平均流の沿岸流成分のほとんどは鉛直方向に十分混合した吹送流であることが認められる。

岸沖方向成分は、水深方向に流速勾配を持つ分布であることからせん断流的性質を有しており、波浪および吹送流による岸沖方向の海面勾配に起因する平均流場となっていることがわかる。台風5号接近時には20~30 cm/s程度の沖向きの流速値を持ち、下層の方が大きくなる分布となっているが、同じ時点の沿岸方向成分が同様の鉛直分布をしていることを考慮すると、この時の流動は全体的に下層での流速が上層よりも大きく、そのた

め岸沖方向成分においても下層での流速が大きくなる結果となったと思われる。

沿岸方向の流速と風速が良い対応を示しているのは既に述べた通りであるが、その両者の関係を波浪(有義波高と水深の比)と風速(銚子での観測値を水深により無次元化)の指標を用いて整理したのが、図-5である。

波浪の大小に対して、沿岸方向流速・風速比は明確な傾向は示さないが、風速に対しては、ある大きさ以上の風速になると、流速・風速比がほぼ一定の範囲内に収まる傾向を持つ。図中には、風速 10 m/s に対応する線を書き込んであるが、10 m/s 以上では流速・風速比にばらつきが少なくなるのに対して、10 m/s 以下では流速・風速比は大きな値から小さな値までをとることがわかる。

このように、一定以上の風速場では、沿岸方向流速は主に風に支配されることがわかる。逆に、風速が小さい場合、相対的に増大する波浪や潮流の影響等も考慮する必要がある。

4. 風速と沿岸方向流速との関係

図-6は、銚子での風速値が 10 m/s 以上の場合の結果について、沿岸方向流速・風速の比と銚子での風速の大小の関係を示した図である。図中には、風の影響を最も強く受ける上層の流速値による結果と、全層平均の結果を合わせて表示している。全層平均の結果も上層のみの結果も大きな違いは見られず、沿岸方向流速が水深方向にほぼ様な分布となっていることを裏付けている。図に示すように、上層での流速・風速比の平均値は約 4.6% であり、全層平均の場合は約 4.3% になる。この値は、Keulegan が示した吹送流速と風速の比 3.3% よりも大きくなっているが(Keulegan, 1951)、風速の増加に伴って表面流速も増大し、砕波が始まる時点での両者の比は 4.8% であるとした Wu の値に近くなっている (Wu, 1968)。鶴谷らは風洞実験(鶴谷ら, 1983)から、高さ 10 m での風速が 7 m/s を越えると砕波が起こり始め、急速

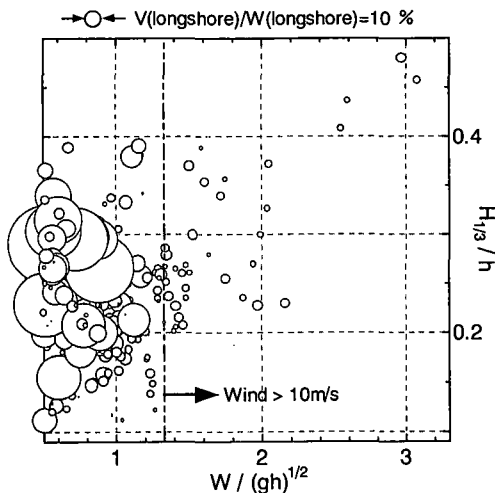


図-5 波高・風速と沿岸方向流速・風速比の関係

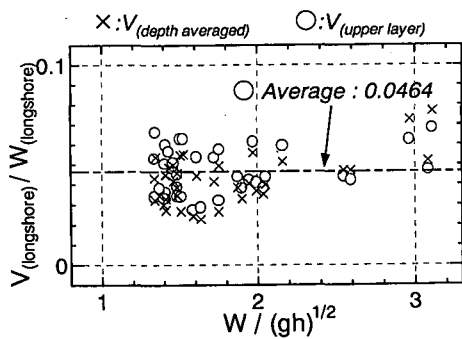


図-6 沿岸方向流速・風速比と風速の関係

に抵抗が増加するという結果を得ている。今回の観測では、計測地点が砕波帯の中にあるのは、横軸 3.0 付近の結果のみであるが、鶴谷らの結果を考慮すると風速 10 m/s 以上の場合には、砕波が起こらなくとも海面での抵抗値が増大し、流れに対して風の影響が支配的になり、その結果流速・風速比が一定の範囲内に収まる結果になると考えられる。

沿岸域を対象とした数値シミュレーション結果によると、表層流速と風速との比は約 3% となる (加藤ら, 1999)。今回の現地観測結果よりはやや小さい値となっているが、観測結果についても 2% 台から 6% 台程度までのばらつきがあること、数値シミュレーションが現地とは異なる境界条件下で行われていることを考え合わせれば、妥当な値が得られていると考えられる。

いずれにせよ、観測結果から、一定以上の強さを持った風の場においては、沿岸方向流速は風速に大きく支配され、風速の数%程度の流速となることが確認された。

5. 結 言

以上、本研究では、砕波帯近傍の平均流場に関する ADCP 連続計測の結果から、平均流場の形成に主に寄与する要因 (潮流および波浪・風) の分離を試み、以下のような成果を得た。

① 砕波帯近傍の平均流は、沿岸方向には水深方向にほぼ一様な流速分布を持ち、沿岸方向風速と時間遅れ約 2 時間で非常によく対応を示した。また岸沖方向では、表層は風との良い対応が見られるものの、下層になるに従い流速値が減衰する傾向を示した。台風接近時の強風・高波浪条件下でのみ、沿岸方向、岸沖方向とも全層に及ぶ流動が形成される結果となった。

② 調和分析により潮流成分を抽出した結果、潮流成分は沿岸地形の影響を受け、海岸に平行な流速成分が卓越

する特性を有することがわかった。また、全流速値に占める潮流成分の割合は、平穏時には 50% 程度まで達するが、風・波浪の影響が強い場合には数%ほどに低下する。

③ 潮流成分を除去した後の流動についても、沿岸方向流速は全層にわたって風との対応がよく、鉛直方向に十分混合した吹送流としての特性を強く示した。また、岸沖方向流速は風との対応は上層のみで、鉛直方向に強く減衰するせん断流的な傾向を持つことから、波浪および吹送流による岸沖方向の海面勾配に起因する平均流場となっていることが明らかにされた。

④ 風速が 10 m/s 以上の場合には、沿岸方向流速と沿岸方向風速の比が一定の範囲内に収まる傾向を示し、その平均値は 4% 余りであった。従って、強風条件下では平均流の沿岸方向成分は主に風によって支配されていることがわかる。

最後に、ADCP 観測および風速データの収集等においては、運輸省港湾技術研究所波崎海洋研究施設の職員の方々に大変なご助力を賜った。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 加藤 茂・山下隆男・伊藤政博・三島豊秋 (1999): 風による広域海浜流の発生機構と平面分布特性, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 431-435.
- 鶴谷広一・中野 晋・加藤 始・一戸秀久 (1983): 吹送流に関する風洞実験, 港湾技術研究所報告, Vol. 22 No. 2, pp. 127-174.
- 山下隆男・吉岡 洋・路 明・加藤 茂 (1997): 砕波帯内の海浜流, 波浪場の ADCP 観測, 海岸工学論文集, 第 44 巻 (1), pp. 361-365.
- Keulegan, G. (1951): Wind tides in small closed channels, J. Res. Nat. Bur. Stand, Vol. 46, pp. 358-381.
- Wu, J. (1968): Laboratory studies of wind-wave interactions, J. Fluid Mech, Vol. 34, pp. 91-111.