

苦小牧沿岸における長周期流速変動特性

山下俊彦* ・金戸俊道** ・木下大也***
関口信一郎**** ・國田 淳***** ・渥美洋一*****

1. はじめに

従来海岸工学で対象としていた沿岸付近の流れは、潮汐と碎波帯内に発生する海浜流が主である。しかし、現地観測等により数日程度の長い周期を持つ強い流れが存在していることが指摘されている。Adams・Buchwald (1969) は陸棚波の発生には海岸に平行な風応力が重要であることを指摘している。中村 (1990) は、福島沿岸の多年にわたる現地観測データから岸を右にみて南へ伝播する 3, 4 日周期の流速変動の存在を示し、その流れが陸棚波の第二モードであることを報告している。また、この流れが二枚貝の浮遊幼生の移流、拡散に影響していることを指摘している。佐藤 (1995) は、北陸沿岸の水深 15 m 地点の流れの観測より、海岸に沿う強い流れの存在とその流れが風、大気圧と高い相関があること、高潮の方程式を用いた数値解析によりこれらの流れが主として風応力とコリオリ力によって維持されていることを報告している。しかし、このような流れについては観測データも少なく、十分には解明されていない。この数日程度の長周期の流れは、碎波帯外の深い水深帯でも大きな流速を持つため、沖合の漂砂現象や生物の浮遊幼生の移流、拡散等に重要な役割を果たしていると考えられる。

そこで本研究では、まず苦小牧沿岸で観測された流速、風速データを解析することにより、流れの長周期流速変動の時間特性と空間特性及び流速と風との相関を明らかにする。次に高潮の方程式を用いて数値計算を行い、流れの発生機構について考察する。

2. 現地観測データ

解析に用いた観測データは、図-1 に示す苦小牧港周辺の各観測地点で得られた流速及び風速である。流速データは長期一点連続観測と短期多点観測の 2 種類あ

る。流速の長期連続観測データは、図-1 に示す西港よりの離岸距離 2.5 km、水深 24.5 m、海底上 1 m の A 地点に設置された NC-2 型自記流向流速計で計測されたもので、1990 年 1 月から 1995 年 8 月までの毎正時の流速データ (90 秒間の平均流速) を解析に用いた。多点観測データは、図-1 に示す東港周辺の St. 1~St. 8 の 8 つの観測地点で水深 5.0 m に設置されたアンダー社製流向流速計 (ベンゲルモデル RCM-4) で計測されたものである。沖側の観測地点 St. 1~St. 4 は、ほぼ汀線に平行な配置で東側の方が水深が浅くなっている。計測データは、年 4 回 (6 月, 7 月, 10 月, 2 月) それぞれ 30 日間の 20 分間隔の 20 分間の平均流速である。風速は、図-1 に示す B 地点で地上 10 m に設置されたプロペラ式風向・風速計を用いて、毎正時に長期連続流速データと同時期に測定されたものを使用した。

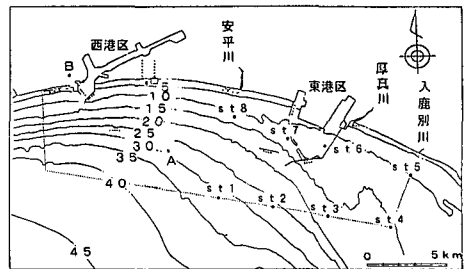


図-1 苦小牧港周辺の現地観測地点

3. 長周期流速変動特性

3.1 流速変動の時間特性

図-2 に一例として 1993 年 10 月の一ヶ月間の流速データの時系列を示す。これを見ると、潮汐に起因する約 12.5 時間、25 時間の周期に対応する流速変動とそれより短い周期の変動と、これらより大きなエネルギーを持つ 4~6 日程度の周期の長周期流速変動があることがわかる。この長周期流速変動は、汀線に平行な東西方向の流れが卓越していることもわかる。本研究ではこの数日程度の長周期流速変動に着目する。この変動成分の存

* 正 会 員 工 博 北海道大学助教授 工学部土木工学科
** 正 会 員 工 修 東京電力
*** 学生会員 北海道大学大学院 工学部土木工学科
**** 工 修 北海道開発局 苦小牧港湾建設事務所所長
***** 北海道開発局 苦小牧港湾建設事務所第 2 計画課長
***** 北海道開発局 苦小牧港湾建設事務所第 2 計画課

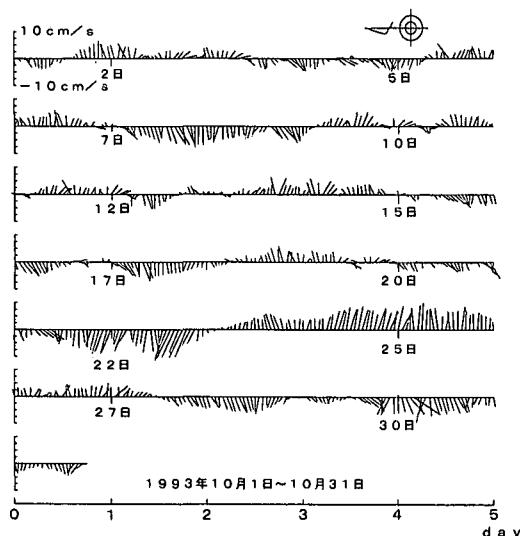


図-2 流速変動の時間特性

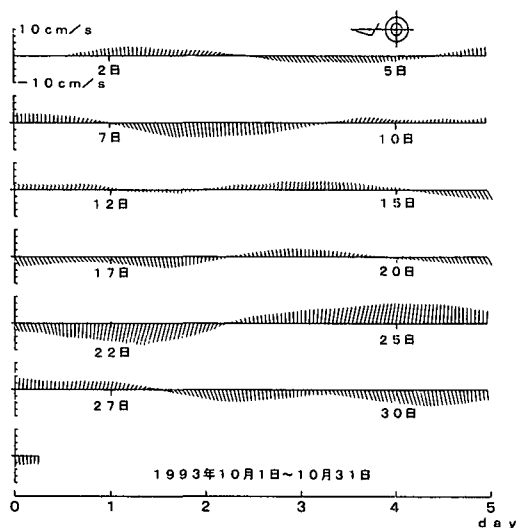


図-3 25時間移動平均流速の変動特性

在を明確に表すために、図-2と同じ流速生データに25時間の移動平均を施し、潮汐以下の短周期流速変動成分を取り除いたものが図-3である。流速変動の周期は図中の一段分に相当する5日あるいは4~7日程度であることがよくわかる。

図-4に、図-2に示した1993年10月の流速生データを汀線に平行方向と直角方向の成分にわけ、パワースペクトルを計算した結果を示す。スペクトルの計算にはMEMを用い、約30日間に相当する毎正時の700個のデータを使用した。汀線に平行方向の流速成分に着目す

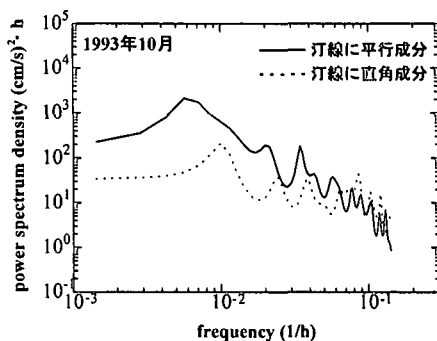


図-4 流速変動のパワースペクトル

ると、1993年10月の観測では周期約150時間、つまり周期6日付近でもっともスペクトル密度が大きく、潮汐に伴う約12.5時間、25時間周期の変動よりもかなり卓越していることがわかる。この長周期の変動は図-2、図-3で見られた周期4~7日程度の流速変動に対応し、10月に観測した流れの場でもっとも支配的である。汀線に平行方向と直角方向の流速成分を比較すると、ここで着目している長周期変動を含む周期1日以上の変動は汀線に平行方向成分が卓越していることがわかる。約6年間の各月毎の流速変動のスペクトルを計算してみると、5月~7月の初夏から夏にかけての期間を除き、この数日程度の強い長周期流速変動が存在していることがわかった。中村(1990)は福島沿岸でも数日程度の長周期流速変動は、水温躍層が形成され水温の日較差が顕著になる夏期を除いて見られることを報告しており、苫小牧沿岸と同様な特徴である。

3.2 流速変動の空間特性

図-5に一例として図-1中の東港周辺でのSt. 1~St. 8の1993年9月28日~10月7日までの流速測定結果を示す。この期間は図-2の前半の10日間とほぼ同じ期間である。この図からも、数日程度の長周期流速変動が存在し、流れ場の中で最も支配的なことがわかる。またこの流れは東西方向に卓越していることもわかる。以下では、長周期流速変動の空間特性に着目してみる。沖側のSt. 1~St. 4はほぼ同じような流速変動の傾向を示していることがわかる。流速変動の大きさに着目すると、St. 1とSt. 4はほぼ同じで、St. 2とSt. 3は大きくなっていることがわかる。例えば9月28日の東流成分が卓越する期間を見てみると、St. 1、St. 4では最大15 cm/s程度であるのに対し、St. 3では最大30 cm/sに達しており約2倍になっている。これは港の防波堤による加速効果と推定され、防波堤周辺特に先端等の水深の深い領域の漂砂等を取り扱う際に重要となることが考えられる。St. 5もSt. 1~St. 4とほぼ同様の流速変動をしていることがわかる。一方St. 8は、沖側のSt. 1等で東流が卓越してい

るときには St. 1~St. 4 とほぼ同じ傾向の流速変動を示しているが, St. 1 で西流が卓越する 9 月 29 日, 10 月 4 日, 10 月 7 日には, St. 1~St. 4 と流れの方向が逆になっている。これは, 数日程度の長周期流速変動の西流時に流れが防波堤背後に回り込み St. 8 で逆向きの流れになったものと推定される。大規模港湾の影響によるこのような循環流は, 例えば, ウバガイ等の二枚貝の浮遊幼生の移流・拡散を防ぐ効果があるものと考えられる。St. 5 では, 沖側の St. 1 とその逆向きの流れはほとんど見られない。これは防波堤の線形によるものと推定されるが, 現時点では不明なことも多い。この現象は大規模港湾の周辺海域環境特に水理環境への影響を評価する上での重要な要素であるので今後検討する必要がある。港湾の内側の St. 6, St. 7 では他に比べて流速変動はかなり小さく, 数日程度の長周期成分より潮汐による変動成分が卓越していることがわかる。次に, 図-1 によると A 点と St. 1 は比較的近い位置であるので, 10 月 1 日~10 月 7 日の同時期の結果を図-2, 図-5 で比較してみると, ほぼ同じ様な流速変動を示しているが, 底面に近い位置で測定している A 地点の方が流速の大きさが約半分程度に減少している。このような長周期流速変動の鉛直分布も漂砂等を考える際に重要であり今後検討が必要である。

図-5 に示した様に港湾の影響のあまりない St. 1~St. 4 ではよく似た流速変動をしていることがわかったので, 各々の地点の観測データに 25 時間移動平均を施したデータを用いて各々の地点間の相互相関を東西方向と南北方向成分に分けて計算した。図-6 は一例として 1993 年 10 月の 30 日間の流速観測データを用いて St. 4 と St. 1~St. 3 の相互相関係数 $C(\tau)$ を求めたものである。St. 3 と St. 4 の距離は 4.0 km, St. 2 と St. 4 の距離は 7.5 km, St. 1 と St. 4 の距離は 10.9 km である。この図より, 東西方向, 南北方向成分とも各々の地点間の相関は高く 0.9 以上である。また, St. 4 からみて西にあり, 距離が遠い地点ほど遅れ時間 τ が大きく, 地点間の距離が大きいく相関係数が少し小さくなっている。このことより, 長周期流速変動は南へ距離 10 km 程度ではあまり形を変えずに伝播していることがわかる。この性質は, 陸棚波が北半球の沿岸では岸を右にみながら伝播していくという性質と同じである。

表-1 は, 他の観測期間も含めて地点間の時間差 τ を求め, その時の長周期流速変動の位相速度を求めたものである。この表より, 流速変動は常に西から東に向かっており, その西進速度はばらつきがあるもののおよそ 1.5 km/h から 3.0 km/h であることがわかる。

3.3 流速と風との相関

図-7 に一例として図-2 と同じ 1993 年 10 月に記録

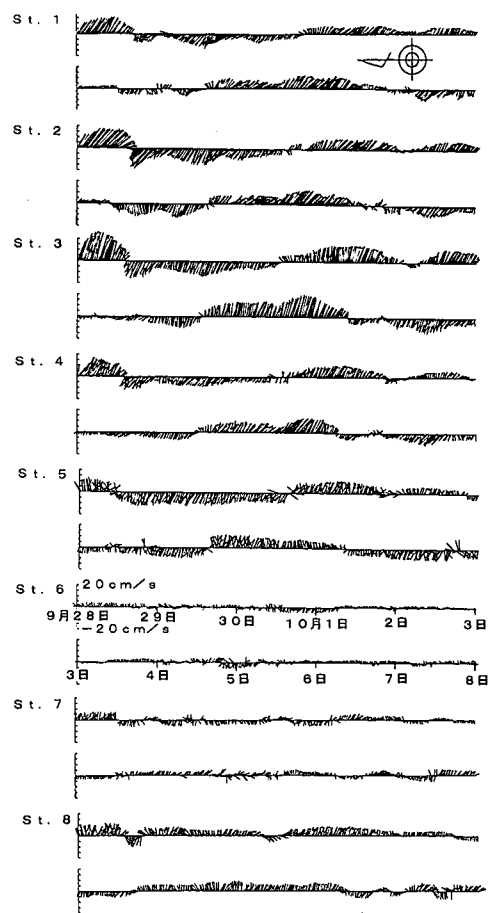
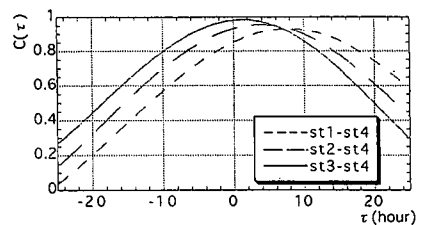
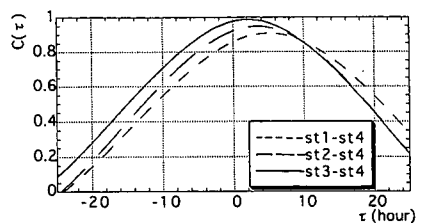


図-5 苫小牧東港周辺での流速変動の空間特性



(a) 東西方向成分



(b) 南北方向成分

図-6 長周期流速変動の地点間の相互相関

表-1

年 月	地 点	相関係数	時間差 (分)	位相速度 (km/h)
1993 5	st2-st4	0.88	300	1.5
1993 5	st3-st4	0.97	90	2.7
1993 10	st1-st4	0.93	460	1.4
1993 10	st2-st4	0.95	240	1.9
1993 10	st3-st4	0.98	80	3
1994 1	st1-st4	0.91	300	2.2

された風速生データを示す。この図より、風速データにも数日の周期を持つ変動があることがわかる。図-2の流速変動と比較してみると両者には明らかに相関があり、両者の時間差に着目すると風速の方が流れに少し先行していることがわかる。

図-8は、図-4の流速と同様に風速のスペクトルを計算した結果である。風速の汀線に平行方向の成分には図-4の流速変動と同様、周期150時間程度の卓越した変動があることがわかる。一方、風速の汀線に直角方向の成分には、100時間程度の周期の流速変動に対応した同じ周期を持つ卓越した成分があることがわかる。また、海陸風によるものと推定される1日周期を持つ変動も卓越することがわかる。

表-2は、図-1のA点の流速とB点の風速の相互相関係数を計算し、相関係数が0.8以上の大きい場合を示したものである。表中には相関係数のピークから求まる風に対する流速の遅れ時間も示す。表に示した月以外の月については、例えば1993年度の場合風と流速との相関は0.7~0.8程度の比較的高い相関であった。表に示した

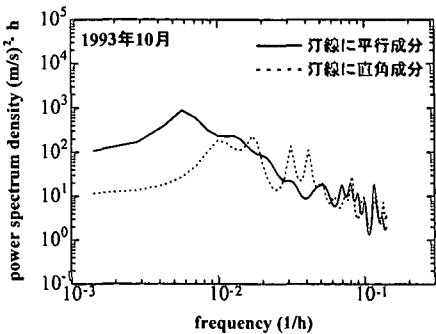


図-8 風速のパワースペクトル

表-2

年 月	相 関 係 数	遅れ時間 (hour)
1990 11	0.89	11
1991 10	0.83	9
1992 4	0.83	10
1992 5	0.89	6
1993 8	0.85	6
1994 3	0.84	8
1995 8	0.81	10

相関が高い場合には、約6時間から11時間の時間差があることがわかった。

以上の結果から、まず風が強くなりその後約6時間から11時間後に流れが励起されていることが推測され、風によって海水面に働く接線応力が長周期流速変動を引き起こす外力の1つであることが考えられる。

苫小牧沿岸の4~7日周期の流速変動が風と高い相関を持つことを示した。そこで、風に影響を与える要因として気圧配置、主に低気圧及び高気圧の位置関係と風速、流速の関係を調べた。長周期の流速変動が卓越している期間は、高気圧と低気圧がペアで苫小牧近くを通過するときであり、苫小牧を中心にして西に低気圧、東に高気圧があるときは風、流れ共に西流が発達し、西に高気圧、東に低気圧があるときは東流が発達していることがわかった。これらのことから、気圧配置によっておおよそ決まる風の方向と気圧変化による海水面の変動が流れに影響を与えていることが考えられる。

4. 長周期流速変動の数値計算

ここでは、数日程度の長周期流速変動の発生外力として、低気圧の通過に伴う風応力と気圧変動を考える。数値計算は高潮の方程式を用いた佐藤(1995)と同様な方法で行った。数値計算の概略を示すと、次の様になる。

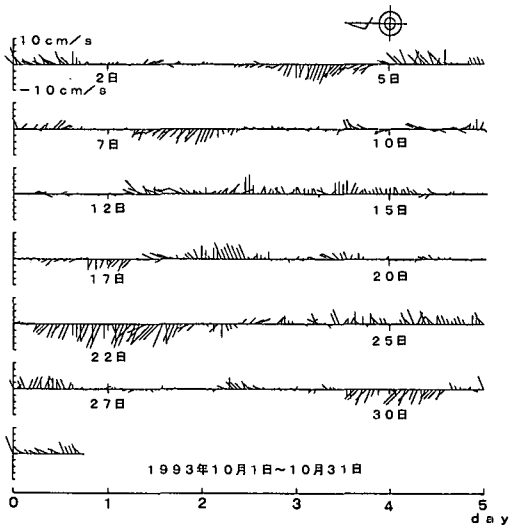


図-7 風速変動の時間特性

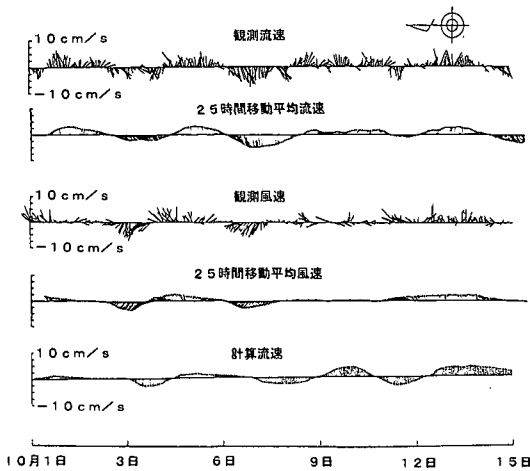


図-9 観測流速、観測風速及び計算流速

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{d} \right) - fN + gd \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{d}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial x} - \frac{\tau_{sx}}{\rho_w} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} - \epsilon \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) = 0 \cdots (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{d} \right) + fM + gd \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{d}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial y} - \frac{\tau_{sy}}{\rho_w} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} - \epsilon \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) = 0 \cdots (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} M + \frac{\partial}{\partial y} N = 0 \cdots (3)$$

ここで、 x, y は汀線に平行方向、直角方向の座標、 M, N は x, y 方向の線流量、 d は水深、 f はコリオリの因子、 g は重力加速度、 ρ_w は海水の密度、 τ_s は海面におけるせん断応力、 τ_b は海底せん断応力、 ϵ は水平渦動粘性係数であり、 $1 \text{ m}^2/\text{s}$ とした。また、それぞれの添え字 x, y は方向を表す。

地形条件としては、港湾等がなく単純化したものとした。 x 方向に平行な汀線を持ち $1/100$ の一様勾配を持つものとした。コリオリの因子は領域内一定とする f 平面近似を用い、北緯 42° における値を用いた。計算領域とし

ては 600 km 四方の領域を考え、境界条件は汀線境界で $M, N=0$ とし、その他の境界は全て閉境界とした。格子幅は 10 km で時間ステップは 30 秒である。外力としては、風は観測された時々刻々のものを用い、半径 40 km の円内で一様とし、その周囲では中心からの距離の自重に反比例する形で低減させた。気圧傾度による流れは小さいことが推定されたので本研究では気圧傾度の項は考慮しなかった。

図-9 は、上から順に図-1 の A 地点で観測された 1993 年 10 月 1 日～10 月 15 日の流速、観測流速に 25 時間移動平均を施したもの、同時期の観測風速、25 時間移動平均風速、汀線から 10 km の流速の計算結果である。流速の観測データは苫小牧沖約 2.5 km のものであるが、計算は汀線から 10 km のものであるため直接比較することはできないが、定性的な対応は良好である。また、計算された流速変動の汀線から 10 km 地点での位相速度を求めてみると 2.5 km/h となり、現地観測の結果(表-1 の 1993 年 10 月) とほぼ一致することがわかった。しかし、流速の計算結果と観測データの時間差に関しては半日から一日程度のずれが生じている期間もあり、今後さらに検討を進める必要がある。

5. おわりに

苫小牧沿岸の周期 $4 \sim 7$ 日、位相速度約 2.0 km/h で西へ伝播する長周期流速変動の存在と特性を明らかにした。また、この流れを起こす外力として風応力、復元力としてコリオリ力を考慮した高潮の方程式を用いた解析により、苫小牧沿岸の長周期流速変動をかなり説明できることがわかった。

参考文献

- 佐藤慎司 (1995): 日本海沿岸で観測された流れの特性, 土木学会論文集, No. 521, II-32, pp. 113-122.
- 中村善治 (1990): 沿岸域の水理環境とウバガイの漁場形成機構に関する研究
- Adams, J. K. and V. T. Buchwald (1969): The generation of continental shelf waves, J. F. M., 35, pp. 815-826.