

海洋短波レーダによる自己完結型の 吹送流推定システムの提案

PROPOSAL FOR SELF-CONTAINED ESTIMATION SYSTEM OF WIND-DRIVEN CURRENTS USING HIGH FREQUENCY RADAR

渡辺一也¹・富田孝史²

Kazuya WATANABE and Takashi TOMITA

¹正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 津波防災研究センター 特別研究員
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-3-1)

²正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 津波防災研究センター 上席研究官
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-3-1)

In the ocean surface, there are currents generated by ocean winds. Wind driven-currents are nonstationary phenomena temporally and spatially. Wind driven-currents affect coastal currents. Therefore, the grasps of wind-driven currents are important. It is necessary to observe velocity of currents temporally and spatially due to estimate wind-driven currents. However, it is difficult to observe spatial velocity of currents and ocean winds by current meter and anemometer of stationary type. High frequency (HF) radar can be observed spatial velocity of currents. Although ocean winds cannot be measured directly by HF radar, it is possible to estimate using wave height, wave period, and the Sverdrup-Munk-Bretschneider's (SMB) method¹⁾.

In this study, ocean winds were estimated by obtained wave height and period from HF radar and SMB method. In addition, wind-driven current was presumed using the estimated wind and bulk method. Finally, we developed self-contained estimation system of wind-driven system currents using high frequency radar.

Key Words : *Self-Contained, wind-driven current, surface velocity, wind speed, Sverdrup-Munk-Bretschneider's method, high frequency radar*

1. はじめに

海洋の流れの表面付近では、海上風に起因した吹送流が発生している。吹送流は、時間的・空間的に非定常な現象であり、沿岸の流動に大きな影響を与えているため、その把握は重要である。吹送流の影響を推定するためには、時間的・空間的な流れの把握が重要となるが、従来行われている固定式の流速計による流速観測では局所的に変化する流れまでを捉えることは難しい。空間的な流速を観測することを目的とした機器として海洋短波レーダがある。海洋短波レーダは、短波帯のビームを海面に向けて発射し、反射してきた電波により流速を計測する装置である。海洋短波レーダでは、広域の面的な流速計測を行うことが可能であり、既に多くの観測が行われている。

吹送流の推定においては、流速のデータと併せて海上風のデータも必要となる。従来の風速計による海上風計測では、観測塔やブイを利用して風速計を設置するために設置場所が限られ、空間的な風速場の観測は難しかった。空間的な風速場を知る手法と

しては、直接的に海上風を計測する手法ではないものの、海洋短波レーダにより得られた波高と周期の情報を利用し、さらに、SMB法を用いることにより間接的に面的な海上風を推定する手法がHuangら¹⁾により提案されている。この手法を用いることにより、海上における海上風の空間的な情報を得ることが可能である。

吹送流の推定として、著者ら²⁾は海洋短波レーダを使用し、その推定が可能であること示している。ただし、この手法では、海洋短波レーダにより観測された流速と流速計により観測された流速、風速計により観測された海上風のデータを用いた重回帰分析を使用するため、3種類の観測機器が必要であった。しかし、海洋短波レーダから海上風のデータを推定できる可能性が示されたため、今回はこのデータを活用することとした。

本研究では、海洋短波レーダから得られる波高、周期により海上風を推定し、吹送流の推定を行う自己完結型のシステムについて検討を行った。

2. 自己完結型の吹送流推定システム

本研究により提案する自己完結型の吹送流推定システムの概要を図-1 にまとめた。本システムは、海上風の推定から吹送流までの推定を海洋短波レーダから得られるデータのみにより行うことに特色がある。

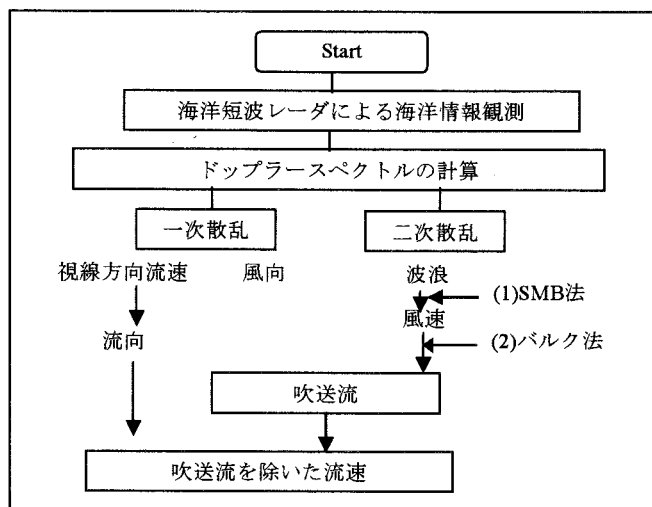


図-1 海洋短波レーダにより取得できるデータと吹送流除去システムのフロー

海洋短波レーダによって観測可能な海象情報は、流速・流向、波高・周期、風向であり、それぞれのデータ取得の関係について図-1に示している。それぞれのデータについての計測技術については、表層流速のように既に確立し活用されているものもあれば、波浪・風速のようにまだ手法が確立しておらず、研究中のものもある。

海洋短波レーダによる観測では大きく分けて、ドップラースペクトルの一次散乱から得られるものと二次散乱から求まるものの2種類がある。ドップラースペクトルの一次散乱を用いることにより、視線方向流速と風向を測定できる。この視線方向流速をベクトル合成することにより、流向を求めることが出来る。二次散乱からは波高・周期、方向スペクトルを求めることが可能である。

今回提案する手法では、吹送流を推定するためにバルク係数を用いているため、海上風の算定が必要となる。しかし、海洋短波レーダでは、今のところ海上風を直接測定することが出来ない。そこで、間接的ではあるものの、Huangら¹⁾によって提案されているSMB法を用いた手法により海上風を求めることとした。

3. 海上風データの推定について

海上風の推定にあたっては以下に示す式(1)を使用した¹⁾。

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 0.26 \tanh \left[\left(\frac{1}{f_m U_{10}} \right)^{3/2} \frac{(3.5g)^{3/2}}{10^2} \right] \quad (1)$$

ここで、 H_s ：波高、 U_{10} ：海上10mの風速、 f_m ：波浪スペクトルのピーク周波数である。この式はもともとSky radarに対して提案されていたものをHFレーダでできるように改良したものである。

この式の妥当性について、NOWPHASにより計測された新潟沖（マフコタワー）の波高・周期と海上風速のデータを用いて検討を行うこととした。ここでは、波高・周期と海上風の観測が2時間ごとに行われている。

まず、新潟沖の風の特徴について整理した。図-2に、風速・風向の度数分布を示す。新潟沖における海上風の観測は、海面より17.6mの地点で行われている。式(1)では、基準高さ10mの風速の使用を想定しているため、式(2)に示される、べき法則を使用し海上10mにおける風速への換算を行うことにより補正を行った。本文中に示されている風速の図および使用したデータは、全て、べき法則により海上10mへと修正を行ったものである。

$$U_z = U_{10} \left(\frac{Z}{10} \right)^\alpha \quad (2)$$

ここで、 U_z ：観測地点での風速 (m/s)、 Z ：海面からの距離 (m)、 α ：べき指数であり、海上の値0.12を使用した。

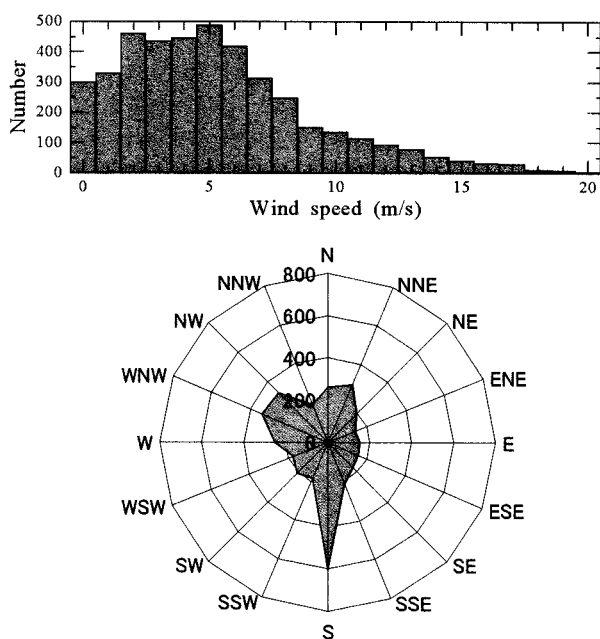


図-2 2006年の風の特徴（新潟沖）
上段：風速（海上10m）の分布，下段：風向の分布

新潟沖の風速の度数分布を見ると、5m/s程度のものが一番多く、時には10m/sを越える風も観測されている。風向の度数分布を見ると南からのものが卓越しており、北側からのものについてはばらつきが見られるような分布となっている。

次に新潟沖における波浪の特性について整理した。その結果を図-3に示す。新潟沖においては、波高は余り大きくなく最大でも5m程度となっている。また、周期は4秒から7秒あたりのものが卓越していることが分かる。

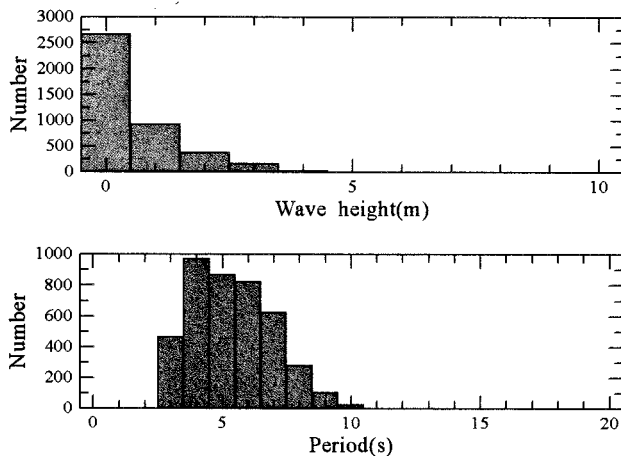


図-3 2006年の波浪の特性（新潟沖）
上段：波高の分布，下段：周期の分布

上記のデータを用いて式(1)の精度について検討を行った。風の定量的評価をするために、式(1)と波浪データから風の推定を次に試みた。波浪から海上風を推定した結果を図-4に示す。波の周期による影響を検討するために図中に記号で4種類の周期に分類をしている。

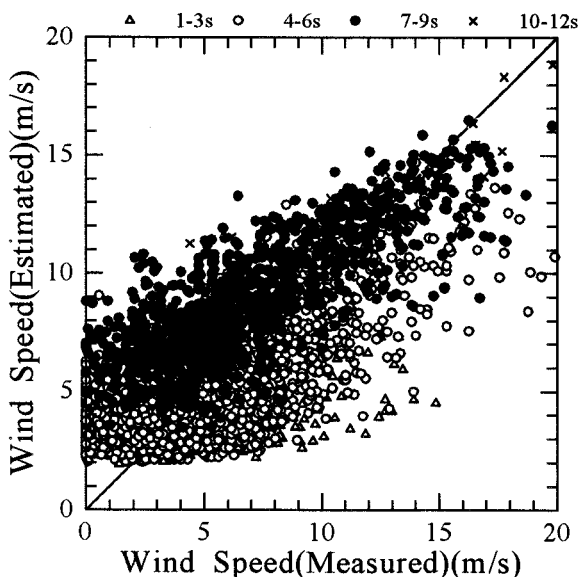


図-4 海上風の観測値と推定値の関係

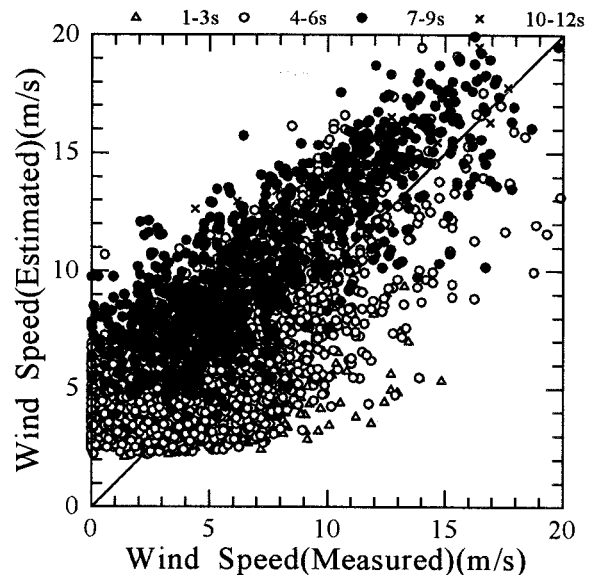


図-5 海上風の観測値と推定値の関係
(波高に20%の測定誤差を加算した場合)

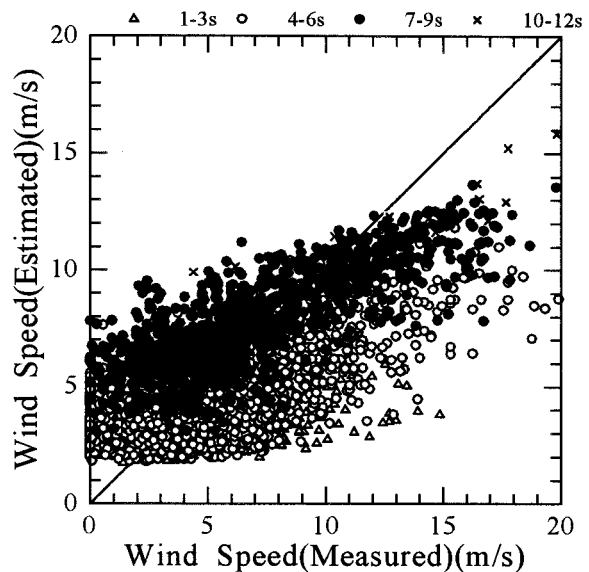


図-6 海上風の観測値と推定値の関係
(波高から20%の測定誤差を減算した場合)

図-4から、SMB法による推定値は実測と比較して良好な結果となっている。このときの相関係数を求めると0.72である。しかし、周期別に見ると△で示される周期1-3sで推定値が小さく、7-9sと周期の長い●でやや推定値が過大となっている。

そこで、海洋短波レーダによる観測がNOWPHASの観測に対して過大(+20%)もしくは過小(-20%)であった場合について、海上風の推定にどのような影響を与えるのかを図-5、図-6に示した。

図-5より、計測された波高が過大であった場合には、風速の推定値も大きくなる。特に周期の大きな領域ではその差が顕著となる。反対に、図-6のように計測された波高が小さくなると、風の推定値も小さくなるが、特に、周期が長いもので風速の大

きな領域での推定値が悪くなる。これは、周期が長く波高が小さいうねりの影響であると考えられる。SMB法では海上風に起因した波浪を対象とした関係を想定しているため、うねりの成分については考慮していないことから、推定の誤差が大きくなったものと考えられる。

同様に周期の観測精度についても検討を行った。先程とは逆に波高を固定し、周期に±20%の誤差が存在した場合に推定値がどのように変化するかを検討した。結果を図-7、図-8に示す。

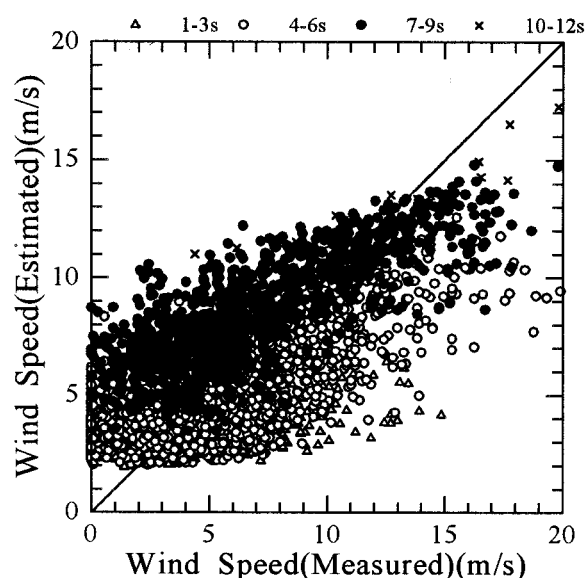


図-7 海上風の観測値と推定値の関係
(周期に20%の測定誤差を加算した場合)

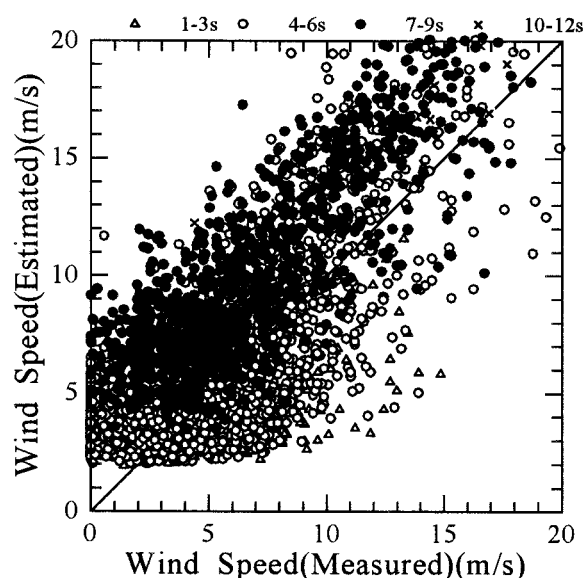


図-8 海上風の観測値と推定値の関係
(周期から20%の測定誤差を減算した場合)

この検討においても、周期観測の測定誤差により、本手法の適用範囲から外れ、推定値と実測値の誤差が大きくなっている。そのため、波高・周期の適用範囲・条件についても詳細な検討が必要である。

4. バルク法を使用した吹送流の推定

まず、吹送流の推定にあたっては、実際の使用を考えた時にリアルタイムで推定を行うことが可能であるという点からバルク法を用いることとした。バルク法は簡便であり、使い勝手が良いため広い分野において用いられている。しかし、バルク係数には様々な値のものが提案されておりどの値を使用するかにより吹送流の推定精度に大きな影響を与えると考えられる。そのため、バルク係数の感度分析を行うことにより、バルク係数が吹送流の推定に与える影響についても検討を行った。

(1) 吹送流の推定方法

吹送流の推定にあたって、流動場が十分に発達し、流速が水深方向にほぼ一定であると仮定した。概念は図-9のようであり、使用する式は海域の状態により、式(3)、(4)、(5)を選定する必要がある。式を選定にあたっては、馬場・山下¹³⁾により提案された摩擦深度による分類を使用することとした。今回は摩擦深度が十分に大きいため、領域③であるとした。そのため、計算には以下の式(5)を用いた。この手法を使用するにあたっては対焦慮息での深浅データが存在し、上記の分類が出来ることが前提となる。

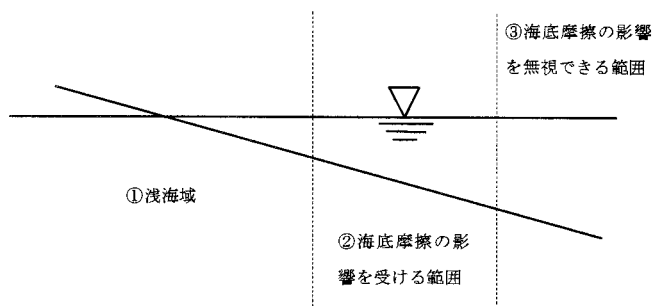


図-9 吹送流推定の際の場合分け

領域①：浅海域

$$\tau_{\text{surface}} = \tau_{\text{bottom}} \quad (3)$$

領域②：海面摩擦の影響を受ける範囲

$$fu = \frac{\tau_{\text{surface}}}{\rho h} - \frac{\tau_{\text{bottom}}}{\rho h} \quad (4)$$

領域③：海面摩擦の影響を無視できる範囲

$$fu = \frac{\tau_{\text{surface}}}{\rho h} \quad (5)$$

ここで、 τ_{surface} ：海面せん断応力 (N/m^2)、 τ_{bottom} ：底面せん断応力、 h ：水深、 f ：コリオリパラメータ (10^{-4} 1/s)、 u ：流速 (m/s)、 ρ ：海水の密

表-1 風速とバルク係数の関係

	提案者	風速条件(m/s)	バルク係数 (C_d)
Model 1	Large and Pond ³⁾	$U_{10} < 10$	1.14×10^{-3}
		$U_{10} \geq 10$	$4.9 \times 10^{-4} + 6.5 \times 10^{-7} U_{10}$
Model 2	本多・光易 ⁴⁾	$U_{10} < 8$	$(1 - 1.89 \times 10^{-4} U_{10}) \times 1.28 \times 10^{-3}$
		$U_{10} \geq 8$	$(1 + 1.078 \times 10^{-3} U_{10}) \times 5.81 \times 10^{-4}$
Model 3	VanDorn ⁵⁾	$U_{10} < 5.6$	1.04×10^{-3}
		$U_{10} \geq 5.6$	$1.04 \times 10^{-3} + 1.92 \times (1 - 5.6/U_{10})^2$
Model 4	Decon and Webb ⁶⁾		$(1 + 0.07 U_{10}) \times 10^{-3}$
Model 5	Kondo ⁷⁾	$8 \leq U_{10} < 25$	$(1.2 + 0.025 U_{10}) \times 10^{-3}$
		$25 \leq U_{10} < 50$	$7.3 \times 10^{-5} U_{10}$
Model 6	Amorcho and DeVries ⁸⁾	$0 < U_{10} < 7$	1.04×10^{-3}
		$7 \leq U_{10} \leq 20$	$1.5 \times 10^{-3} \left[1 + \exp \left(-\frac{U_{10} - 12.5}{1.56} \right) \right]^{-1} + 1.04 \times 10^{-3}$
		$20 < U_{10} < 30$	2.54×10^{-3}
Model 7	Garratt ⁹⁾	$3 < U_{10} < 21$	$0.75 \times 10^{-3} + 0.067 \times 10^{-3} \times U_{10}$
Model 8	Smith ¹⁰⁾	$6 < U_{10} < 22$	$0.61 \times 10^{-3} + 0.063 \times 10^{-3} \times U_{10}$
Model 9	Geernaert ¹¹⁾	$4 < U_{10} < 24$	$0.577 \times 10^{-3} + 0.085 \times 10^{-3} \times U_{10}$
Model 10	Yelland and Taylor ¹²⁾	$6 < U_{10}$	$0.6 \times 10^{-3} + 0.07 \times 10^{-3} \times U_{10}$

度 (1025 kg/m^3) である。

海面せん断応力を求めるためには、バルク係数を用いた式 (6) を使用した。

$$\tau_{\text{surface}} = \rho_a C_d |U_{10}| U_{10} \quad (6)$$

ここで、 ρ_a : 空気の密度 (1.2 kg/m^3)、 C_d : バルク係数である。

はじめに、式 (6) により海面せん断応力を計算し、式 (5) を使用することによって吹送流の推定を行った。

(2) バルク式の感度分析

表-1に示される実験により求められた10ケースのバルク係数について感度分析を行った。この表-1の関係をj用いて U_{10} を変化させたときのバルク係数との関係を示したものが図-10である。

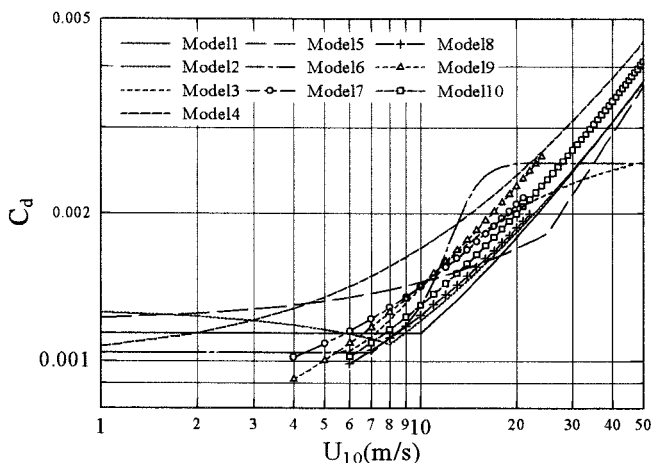


図-10 バルク係数と U_{10} の関係

今回対象とした新潟沖のマフコタワーでは海上風速の最大値が20m/sであるので、基準風速が0から20m/sのバルク係数の値を見ると、概ね 1×10^{-3} から 2×10^{-3} の範囲に分布していることが分かる。そのため、この範囲の値が吹送流の推定にどのくらいの影響を与えるのかを次に検討した。

ここでは、モデル地形として水深を30mとし、海上風速を10m/sと仮定してバルク係数の値を変化させ吹送流の推定をした。そのときにバルク係数が最大 (2×10^{-3}) のものと最小 (1×10^{-3}) のものに注目すると、バルク係数の選定により大きな差が生じ、この条件での推定値には最大4cm/sの差があることが明らかとなった。そのため、バルク係数の選定にあつては注意が必要となる。

(2) バルク式からの吹送流の推定

今回は、本多・光易⁴⁾により提案されているバルク係数を使用して新潟沖における吹送流の推定を行った。その結果を図-11に示す。

吹送流の推定には、海上風の推定に使用した新潟沖において観測されたデータを使用した。観測地点の水深は34.5mとなっている。

図-11の上段には波高の実測値を示した。2段目は波浪の周期 (実測値) である。3段目は、海上風であり、実線で示したCase 1は実測値であり、点線で示したCase 2は本手法により推定された値である。4段目は、推定した吹送流であり、実線 (Case 1) は実測風速を用いて推定したものであり、点線 (Case 2) は推定した海上風から計算したものである。

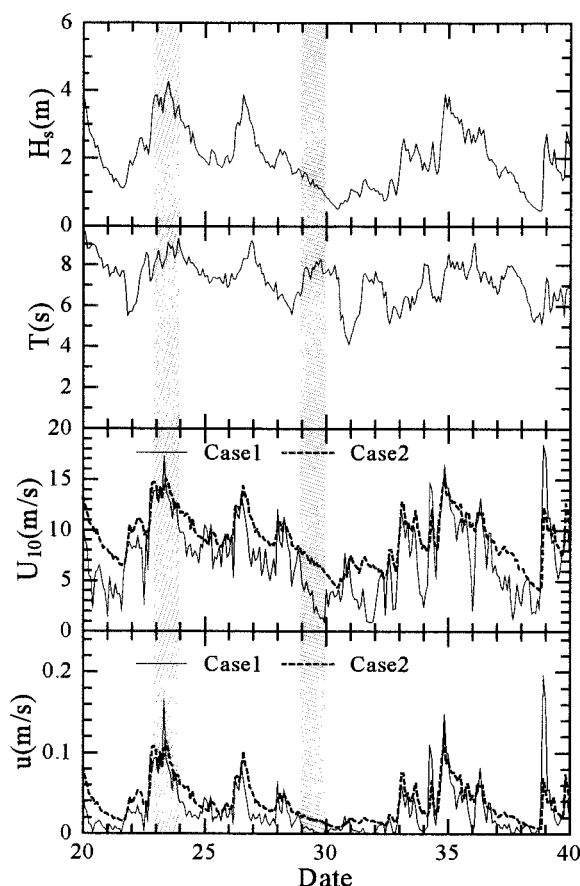


図-11 バルク式より求めた吹送流と波浪，風速データ

図中にハッチで示した23日のような強風時に注目すると波浪が大きく，精度良く海上風の推定が出来る。その結果，吹送流の推定も良好なものとなった。しかし，図中にハッチで示した29日に見られるように，周期が長く波高が小さい，うねりの影響があると考えられるデータにおいては，3段目のCase2の風の推定が大きいくずれているため，吹送流の推定も大きくずれる結果となった。

5. おわりに

(1) 結論

本研究では，海洋短波レーダを利用した自己完結型の吹送流推定手法について開発を行った。海洋短波レーダにより取得できる波高・周期データと，SMB法・バルク法を組み合わせる使用することにより海洋短波レーダから得られる波高・周期の情報のみで吹送流の推定が可能であることが示された。

(2) 今後の課題

a) 海上風の算定

海上風の算定にあたっては，波浪データを使用するため海洋短波レーダによる波浪観測の精度により左右される。また，SMB法を使用しているため，うねりの成分は考慮していないため，うねりの影響

を含んだデータを除く必要がある。

b) バルク式の選定

バルク式の選定によって吹送流の推定結果に大きな影響を与えるため，どの値を使用するか詳細な検討が必要である。

c) データ精度の検討

本手法では，NOWPHASのデータを使用し海上風の推定を使用した，海洋短波レーダにより取得されたデータを使用していないため，実際に海洋短波レーダにより取得されたデータでの検討を行う必要がある。

d) 手法の適用範囲（地域）の検討

今回は新潟沖において検討を行い良好な結果を得たが，それ以外の海域において本システムの適用が可能かについて検討を行う必要がある。

謝辞：本研究を行うにあたって，（独）港湾空港技術研究所海象情報研究室に特別なご配慮を頂き，NOWPHASの海上風，波浪，流速などの貴重なデータを提供して頂いた。ここに記し，謝意を表する。

参考文献

- 1) Weimin Huang, Gill, E. Wu, S., Wen B., Yang, Z. and Hou. J.: Measuring Surface Wind Direction by Monostatic HF ground-Wave Radar at the Eastern China Sea, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.29, No.4, pp.1032-1037, 2004.
- 2) 渡辺一也・富田孝史：海洋短波レーダによる津波観測の実現に向けた吹送流成分の除去手法の検討，海洋開発論文集，第23巻，pp.1129-1134，2007.
- 3) Large, W. G., and S. Pond.: Sensible and latent heat flux measurements over the ocean., *J. Phys. Oceanogr.*, 12, 464-482., 1982
- 4) 本多忠夫・光易 恒：水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究，海岸工学論文集，第27巻，pp.90-93，1980.
- 5) Van Dorn, W.G.: Wind Stress on an Artificial Pond, *J. Mar. Res.*, 12, pp. 249-276, 1953.
- 6) Decon, E. L. and Webb: The Sea (ed. M. N. Hill), Vol. 1, pp. 43-87, New York; Interscience, 1962.
- 7) Kondo, J.: Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, *Boundary-Layer Meteorol.*, 9, pp. 91-112, 1975.
- 8) Amoroch, j. and J. J. De Vries: *J. Geophys.*: A new evaluation of the wind stress coefficient over water surfaces, *Res.*, Vol 85, No.C1, pp. 433-442, 1980.
- 9) Garratt, J. R.: Review of drag coefficients over oceans and continents, *Mon. Weather Rev.*, 105, pp. 915-929, 1977.
- 10) Smith, S. D.: Sea surface wind stress and drag coefficients, the HEXOS results, *Boundary-Layer Meteorology* 60, pp.109-142, 1992.
- 11) Geernaert, G. L., S. E. Larssen, J. Hansen: Measurements of the wind-stress, Heat flux, and turbulence intensity during storm conditions over the North Sea, *J. Geophys. Res.*, 98, pp. 16571-16582, 1987.
- 12) Yelland, M. J. et al.: The use of the inertial dissipation technique for shipboard wind stress determination. *J. Atmos. Oceanic Technology*, 11, pp. 1093-1108, 1994.
- 13) 馬場康之・山下隆男：広域海浜流（沿岸方向流速）の岸沖分布に関する考察，京都大学防災研究所年報，第47号B，2004.