

沿岸噴流の観測と数値計算

古 川 恵 太*・Mal Heron**

1. はじめに

流れのある沿岸において、群島や珊瑚礁などにより海峡が形成されていると、噴流が発生することがある。このような沿岸噴流は、中心部での強い流れによる移流効果や、噴流頭部での循環流による集積効果、そして乱れによる拡散効果により、沿岸部での物質循環過程に多大な影響を与えていると言われている(例えば、Thompson & Golding, 1981; Wolanski *et al.*, 1988)。しかし、噴流の局所性、非定常性等により、それぞれの効果を現地で定量的に把握することは大変難しい。そこで、それぞれの効果を定量的に評価するための方法として、数値モデルを開発し、数値計算により詳細な噴流の形成過程を再現する試みを行った。VHF 海洋表層レーダーを用いた現地観測を行い、流速の空間分布を測定して、数値モデルの評価のためのデータとした。

2. 数値モデルの概要

Furukawa & Wolanski (1996) は、島の背後にできる後流渦列の詳細な検討から、浅場上での渦の減衰や、浅場と深場の境界での渦の生成等が流れの場に与える影響が大きいことを指摘している。したがって、沿岸噴流を再現するための数値モデルにも、島や州の形、浅場の存在といった微細な地形条件を正確に表現できることが求められる。また、数分で移り変わる噴流の様相を、数潮汐の間追跡するためには、多くの計算ステップを効率良く解くことのできる数値モデルであることが望ましい。今回は、以上のような要件を満たす計算モデルとして、離散渦法を採用し、水深効果を考慮するための工夫を施した。

(1) 基礎方程式

離散渦法を純粋な 3 次元場での計算に適用した例もあるが (Leonard, 1980; 中西ら, 1992)、多くの計算事例は 2 次元場での理論展開が行われている (Chorin, 1973; Kuwahara, 1978)。そこで、2 次元場での計算法の拡張として、水深方向に平均化された Navier-Stokes 方程式の

Rotation をとることによって得られる基礎式、

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \omega - \frac{\omega}{H} \left(\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla H \right) = -\gamma_b \nabla \times \left(\frac{\mathbf{u} \mathbf{u}}{H} \right) + K_h \nabla^2 \omega \dots \dots \dots (1)$$

を用いて、水深効果を考慮した渦法を構成した。ここに、 ω は渦度、 $\mathbf{u}$ は局所流速、 H は水深、 ζ は水位、 γ_b は底面摩擦係数、 K_h は水平拡散係数である。ある有限体積 dA について渦度 ω を積分し、離散渦の循環 Γ についての運動方程式に直し、離散渦の移動に追随した移動座標系から見ると、式 (1) は、

$$\frac{d\Gamma}{dt} = -\gamma_b \nabla \times \left(\frac{\mathbf{u} \mathbf{u}}{H} \right) dA + K_h \nabla^2 \Gamma \dots \dots \dots (2)$$

となり、これが本離散渦法の基礎方程式となる。左辺は渦の移流を表わしており、右辺第 1 項は底面摩擦の影響(水深効果)、第 2 項が拡散の影響を表わしている。ここで示される離散渦は、境界層のはく離をモデル化し、島の端部や、州の先端等から境界層厚さを考慮して流れの場に導入した (Furukawa & Wolanski, 1996)。

(2) 粘性の影響

粘性の影響は、離散渦に核の構造を仮定することで考慮することができる (Leonard, 1980; 細川・古川, 1991)。渦核での渦度の分布を正規分布とし、渦核の代表長さ ϵ が水平拡散係数 K_h と渦発生後の経過時間 t の積の平方根に比例して拡大すると仮定すると、その離散渦の誘起する流れの周速度 u_r は、渦の中心からの距離 r を用いて

$$u_r = \frac{\Gamma}{2\pi r} \left(1 - \exp\left(-\frac{r^2}{4K_h t}\right) \right) \dots \dots \dots (3)$$

となる。この流速分布を用いることによって、渦核外周で極値をもち、渦核内部では中心で速度 0 となる渦度一定の流れ、渦核外部では無限遠で速度 0 となる渦なし流れに漸近するような核を持った離散渦がモデル化され、粘性の影響はその核の拡大として表される (図-1)。

(3) 浅海域の影響

浅海域での底面摩擦の影響は、式 (2) の右辺第 1 項を検討することにより、モデル化することができる。該当の項を分解すると、

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 海洋環境部

** Ph.D., Physics Dept., James Cook Univ., Australia

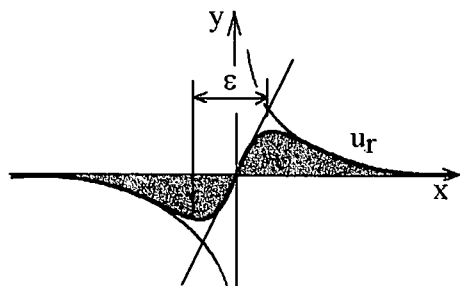


図-1 離散渦の誘起する流れ

$$\begin{aligned} \text{RHS}_1 = & -\gamma_0 \frac{|u|}{H} \Gamma + \gamma_0 \frac{u}{H} \times \nabla |u| \cdot dA \\ & - \gamma_0 \frac{|u|}{H^2} u \times \nabla H \cdot dA \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

となる。第1項は、底面摩擦による減衰項であり、第2項は、せん断流が引き起こす渦度の減衰項、第3項は、底面勾配が引き起こす渦度の発生項である。第2項は、特に境界層がはく離する点で顕著となる項であるので、渦のはく離の計算時に考慮し、第1項と第3項のみを明示的にモデルに組み込んだ。

3. VHF 海洋表層レーダーの概要

レーダーによる海洋表層探査の試みは、HF レーダーを用いて表層流れを観測した Crombie (1955) 以降、機器の開発、解析法の開発が精力的に行われてきた (Wait, 1996; Barrick, 1972 等)。VHF レーダーによる観測は、主に高分解能、多機能を目指して行われ、流れの他に海象 (波高、波向き等) を数 km の範囲にわたって 100 m オーダーの分解能で観測する試みが行われている (McLaren, 1995)。今回用いたのは、ジェームスック大学で開発された VHF 海洋表層レーダーである。

(1) 動作原理

海表面に向かってパルス状の信号を照射すると、波等により散乱波が生じる。この散乱波のドップラーシフトを計測することによって海表面の流速を計測するのが VHF 海洋表層レーダーである (図-2)。

(2) システム構成

VHF 海洋表層レーダーのシステム構成は、アンテナ、レーダー本体、コントロールコンピューター (A/D 変換機内蔵) とアンテナコントロールからなる (図-3)。

測定対象である散乱領域は、アンテナの指向性、パルス波の継続時間等に左右され、本システムでは、最大到達距離 2 km、空間分解能が発信軸方向に 100 m、円周方向に 12° となっている。

散乱波の受信信号は Quadrature Demodulator を用いて、In-phase と Quadrature 信号に分けたのちにコント

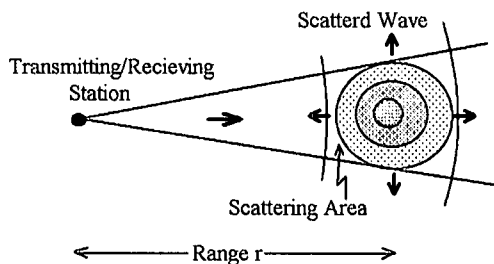


図-2 流速計測の原理

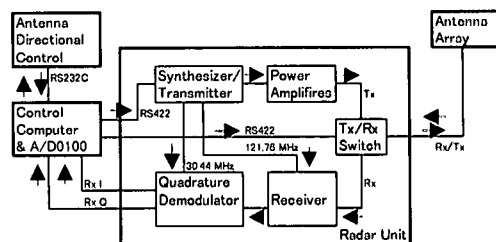


図-3 システム構成図

ロールコンピュータ内の高速 A/D コンバータを用いて収録されており、高い周波数分解能と、後処理の効率化が図られている。

4. 現地観測結果

(1) 観測地点および機器の設置

オーストラリア、グレートバリアリーフにあるバーム群島のオルフェウス島とファントム島の間の海峡部で 1995 年 11 月 19 日から 23 日にかけて現地観測を行った (図-4)。観測点近傍では M_2 潮が卓越し、潮流は上げ潮時に西に向い、下げ潮時に東に向う往復流となっている (Andrews & Bode, 1988)。

両島の間は、北西岸が深く南東岸が浅い 400 m 幅の海峡となっており、下げ潮時に北東方向に噴流が発生する。

その海峡部、水深約 3 m の地点に海底面から 1 m 上方に電磁流速計を設置し、海峡を通過する平均的な流れを連続観測した。VHF 海洋表層レーダーは、海峡を挟んで各島の沿岸部にそれぞれ 1 点、計 2 点設置した。各レーダーは、照射方向に 100 m 刻みで 2 km まで、円周方向に 12° 刻みで 180° の範囲のデータを測定した。1 回の測定に約 30 分かかるので、流速分布はおおよそ 1 時間に 1 ないし 2 回の測定を、下げ潮から上げ潮にかけて、6 時間の連続観測を行った。

(1) 狭く部流速データ

図-5 は、電磁流速計によって測定された海峡部での水位と流速の時間変化である。電磁流速計では、平面 2 次元の流れを測定したが、流れは、ほぼ直線状の往復流

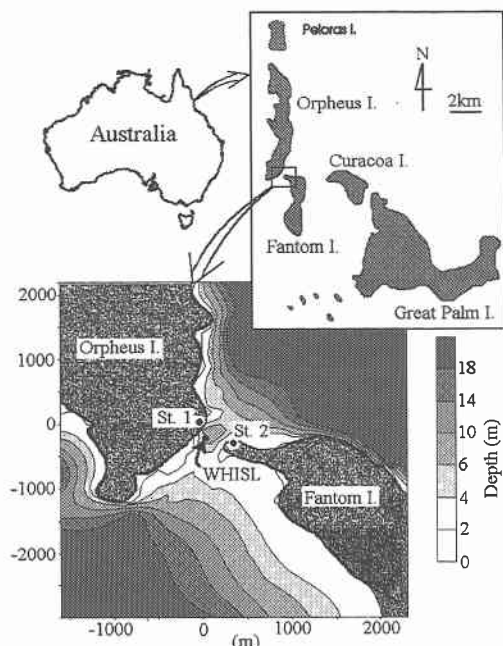


図-4 観測地点および計測機器設置場所 (St. 1, 2 に VHF 海洋表層レーダーを設置し, WHISL で示される点に電磁流速計を設置した. なお, St. 1 は, 東経 146 度 30 分, 南緯 18 度 39 分にある.)

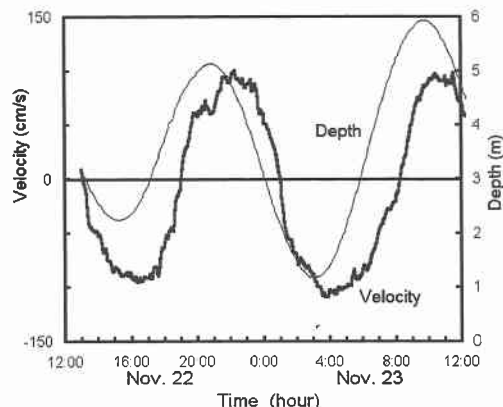


図-5 電磁流速計の記録 (細線: 水位, 太線: 流速)

となっており, 図面中の流速は, 北東流成分を正, 南西流成分が負で表示されている。流速の変動は, およそ ± 1 m/s であり, 水位変動の位相が 1.5-2 時間程遅れていることが, 流速の位相との比較により確認できる。

(2) 目視による噴流形成の様相の観察

非定常かつ局所的な噴流の様相を目視観測した結果を示す。観測日は, 1995 年 11 月 22 日であり, 8:00 に下げに転潮した直後, 筋状のフロントが海峡部を北東の方向に走り, 8:30 を過ぎた頃から先端が左右に巻きあが

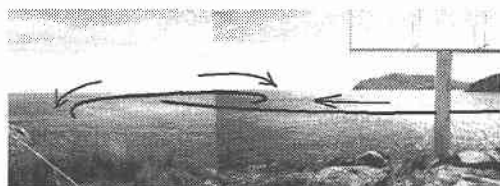


図-6 下げ潮時に St. 1 より北東方向に観測されたマッシュルーム型噴流(太線がフロントを, 矢印がその動きを示す, 8:47, 22 Nov., 1995)。



図-7 下げ潮止まりから, 上げ潮に転流した時のフロントの状況 (太線がフロントを, 矢印が動きを示す, 11:37, 22 Nov., 1995)。

り, マッシュルーム状の噴流が形成された (図-6)。その後, 9:30 には, 噴流先端の渦が分裂を始め, 2 つの渦が縦に並び, やがて境界のはっきりしなくなった。その後, 11:00 に転流し, 海峡部 St. 1 から St. 2 にかけて, 明確なフロントが形成され, 転流が海峡の両脇から南西方向に進入しながら, 中央では依然として北東流が残っている様子が観測された (図-7)。残っていた北東流は, やがて幅が狭くなり, 12:00 には消滅し, 海峡の南東側に新たな噴流の形成が見られた。

(3) VHF 海洋表層レーダーによる表層流速分布

上記の目視観測に対応する時間のレーダーによる観測結果を図-8, 9 に示す。

上げ潮時, 転流時とも, 海峡における流速がおおよそ 1 m/s であり, 電磁流速計による計測と一致する。上げ潮時には, 噴流の軸が北西岸に寄っていることや, 噴流頭部に非対称な循環流が発生していることが読み取れる。また, 転流時には, 海峡部で両端から進入する逆流と, 海峡部中央に残る北進流が捕らえられており, 目視観測で得られた噴流の形成過程を裏付ける結果が得られた。

図-8 の北東端に過大な流速ベクトルが現れている原因は, 2 つの観測点からの距離が離れており, 2 つの流速成分のベクトル和をとるときの交差角度が小さいことである。そのため, 僅かな流速誤差が拡大されて表示されており, 個々の流速測定値が過大に測定されているわけではない。

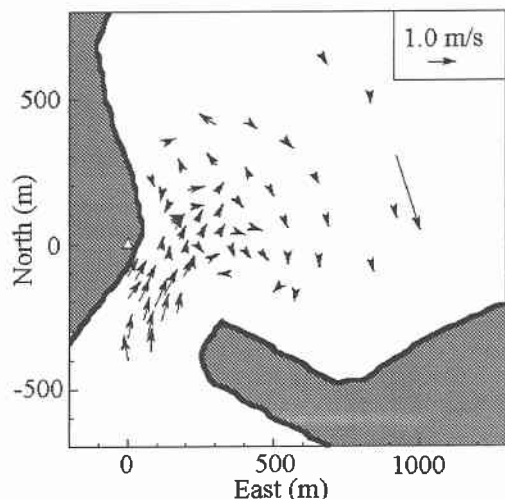


図-8 VHF 海洋表層レーダーによる観測例 (下げ潮時, 8:05, 22 Nov., 1995)

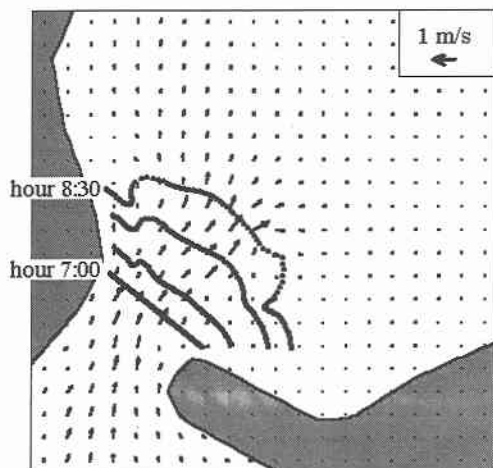


図-10 離散渦法による上げ潮時の流れの再現 (8:30, 22 Nov., 1995). トレーサーは 7:00 に海峡部に投入されたものを, 30 分毎に示した。

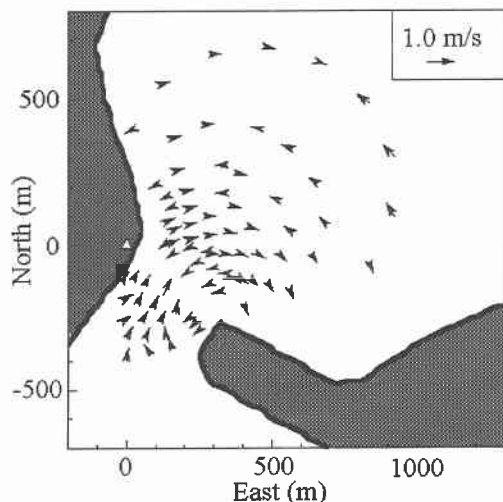


図-9 VHF 海洋表層レーダーによる観測例 (転流時 11:06, 22 Nov., 1995)

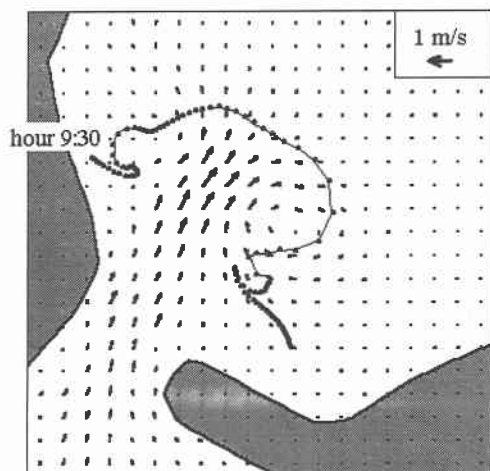


図-11 離散渦法による上げ潮時の流れの再現 (9:30, 22 Nov., 1995). トレーサーは 7:00 に海峡部に投入されたものである (図-10 からの継続)。

5. 数値計算による再現

以上のように観測された噴流を, 離散渦法で再現した。校正を必要とする計算のパラメータは, 水平拡散係数, 境界層厚さ, 底面抵抗係数等である。本報告では, 各パラメータの詳細な校正過程を省略し, 最適解が得られた計算ケースについて, その結果を示す。

なお, 流れの境界条件は, 海峡中央部で測定された電磁流速計の流速データを用いて設定している。

(1) 上げ潮時の再現

図-10, 11 は, 上げ潮時の流れの再現結果である。流

速のベクトル図と共に, トレーサーの移流実験の結果を併記してある。

北進する噴流が地形の影響を受けて非対称に発達し (図-10), マッシュルーム型の噴流を形成する (図-11) 様子が再現されている。また, マッシュルームの傘の部分にあたる循環流が, 東側が強く, 西側が弱いことが判る。これは, 噴流の中心軸が北西側に寄っていることや, 北西岸近傍の浅瀬による渦の減衰が原因と考えられる。

(2) 転流時の再現

転流時の計算結果も, 前節までの観測結果をよく再現し, 中心部での北東流が残り, 海峡両端から逆流が進入

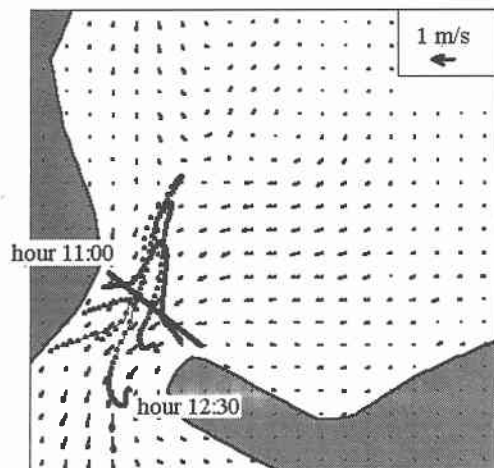


図-12 離散渦法による転流時の流れの再現 (12:30, 22 Nov., 1995)。トレーサーは11:00に海峡部に投入されたものを、30分毎に示した。

する様子が得られた(図-12)。また、下げ潮時に発生した時計周りの循環を形成していた水塊の大部分は、再び海峡を通過して南西側に運ばれるが、一部は、噴流中心の北東流によって運び去られており(図面なし)、この海域の海水交換に噴流が大きな役割を担っていることが推定された。

6. おわりに

本論文で得られた主な結論は

- ・潮汐による局所的な沿岸噴流を再現することのできる数値計算手法を開発した。
- ・VHF 海洋表層レーダーは、微細な流れを空間的に把握する上で有効な手段であり、計算値の校正に用いるような質の高いデータを得ることができた。

等である。本計算法で得られる流速場は、空間的にも、時間的にも詳細な情報を保存しており、沿岸域の物質循

環過程を解明する上で、強力なツールとなり得る一方で、はく離渦の導入点の決定や、渦の減衰項の底面摩擦係数の決定方法など、汎用化するための課題が残されている。本研究は、新技術事業団およびジェームス・クック大学の補助を受けて実施された。

参考文献

- 中西祐二, 亀本喬司, 西尾元治: 粘性効果を考慮するための渦モデルの改良, 日本機学会論文集(B編), 58巻, 552号, pp. 107-112.
- 細川恭史・古川恵太(1991): 離散渦法による構造物周りの流れシミュレーション, 港研報告, 30巻, 2号, pp. 155-209.
- Andrews, J. C. & L. Bode (1988): The tides of the central Great Barrier Reef. *Continental Shelf Res.*, Vol. 8, No. 9, pp. 1057-1085.
- Barrick, D. E. (1972): First-order theory and analysis of MF/HF/VHF scatter from the sea. *IEEE Trans. Ant. Propagat.*, Vol. 20, pp. 2-10.
- Chorin, A. J. (1973): Numerical study of slightly viscous fluid. *J. Fluid Mech.*, Vol. 57, No. 4, pp. 785-796.
- Crombie, D. D. (1955): Doppler spectrum of sea echo at 13-56 Mc/s. *Nature*, Vol. 175, p. 681.
- Furukawa, K. & E. Wolanski (1996): Shallow water frictional effects in island wakes. *Continental Shelf Res.*, submitted.
- Kuwahara, K. (1978): Study of flow past a circular cylinder by an inviscid model. *J. Physics Soc. Japan*, Vol. 45, No. 1, pp. 292-297.
- Leonard, A. (1980): Vortex methods for flow simulation. *J. Comp. Physics*, Vol. 37, pp. 289-335.
- McLaren, N. R. (1995): VHF ocean radar with applications in coastal monitoring. Ph.D. Thesis, James Cook Univ. of North Queensland, Australia, 139 p.
- Thompson, R. & T. J. Golding (1981): Tidally induced upwelling by the Great Barrier Reef. *J. Geophysical Res.*, Vol. 86, pp. 6517-6521.
- Wait, J. R. (1966): Theory of HF ground wave backscatter from sea waves. *J. Geophys. Res.*, Vol. 71, pp. 4839-4842.
- Wolanski, E., E. Drew, K. M. Abel & J. O'Brien (1988): Tidal jets, nutrient upwelling and their influence on the productivity of the alga *Halimeda* in the Ribbon Reefs, Great Barrier Reef. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 26, pp. 169-201.