

黒潮フロントに対する水平シア一流の効果

中村 重久

EFFECT OF HORIZONTAL SHEAR FLOW TO KUROSHIO FRONT

By Shigehisa NAKAMURA

Synopsis

In order to realize the Kuroshio front in relation to the hazardous storm surge, an evolution of a vorticity front is studied theoretically. A satellite thermal picture is also introduced to identify a possible evolution of the existing Kuroshio front as a vorticity front in terms of an undulation of the Kuroshio flow around the shelf off the coast in the ocean of the rotating Earth. This could be a trigger to reveal mechanism of storm surges around the Kuroshio front in the Northwestern Pacific.

1. 緒言

海岸域における自然災害の主要因の一つとして、高潮災害がある。とくに、わが国は太平洋北西部に位置し、沿岸域の高度利用がすすんでいるだけに、台風による高潮災害は社会的にも影響が大きい（たとえば Nakamura, 1981¹⁾ ; 1988²⁾ ; 1992³⁾）。このような台風高潮による災害の防止軽減策の検討にあたっては、その的確な予測が必要である。海面を通しての大気と海洋との間のエネルギー相互交換の力学的機構も不明の点は究明する必要がある。海岸線や海底地形の複雑さも考慮しなくてはならない。

本文では、これまでの研究経過をふまえて、特に、黒潮フロントに着目し、その力学的特性を論じることとした。その成果は、黒潮と高潮との相互関係を力学的に究明する手掛かりを与えるものと考えられ、今後の研究の進展の礎石となるものとみられる。

2. 黒潮フロント

黒潮フロントは、一体何であろうか。海のなかにみられるフロントには、いろいろの種類がある（たとえば, Fedorov, 1986⁴⁾）。

力学的にみて、フロントには、海洋大循環のような惑星力学のスケールのものがあり、また、その複雑さは、気候学的スケールとしてとらえられる例もある。黒潮に影響を受けるフロントは、このスケールであるとしてよい。

また、局所的な流れの相互作用も、そのスケールにつながりがあると考えられる。さらに、巨視的地形との相互作用もみとめられる。一方、海底境界層付近の現象も無視できない。総観的には、外洋で認められるものと、沿岸域や湧昇域で認められるものとに分類できる。

さらに、地衡流としてみることができるかどうかを考えると、海域によっては、フロントが内部境界面の一部となっていることもある。河川流出の例は地衡流を考える必要のない例であるが、黒潮流域までのひろがりがあり黒潮の影響を受けているような場合には、海水の塩分が重要な働きをする（Nakamura,

1940)⁵⁾。とくに、日本列島の南沖をながれる黒潮の場合、海陸相互作用として、水平シアー流があらわれることを忘れないようにする必要がある (Nakamura, 1992)⁶⁾。

上述の水平シアー流の問題を、地球規模のスケールの問題として検討するには、渦度ポテンシャルの概念を導入すると便利である。

ところで、渦度ポテンシャル(以下、渦度と記す)のフロントは、これまでも、いろいろ研究されてきている。例えば、2次元非粘性の問題としては Dritschel (1989)⁷⁾, Grimshaw, Yi (1991)⁸⁾ の例がある。準地衡流の問題として渦度フロントを検討している例としては、準地衡流に海底地形をあわせて考慮にいたれた研究がある。

本文では、渦度フロントの形成過程の力学的機構を明らかにすることに焦点をおく。

3. 基礎方程式

海の流れの記述のために、無次元量を導入し、これによって、基礎方程式を表現することを考える。ここでは、水平スケールとして黒潮フロントの波長 L_1 をえらぶ。時間スケールは f_1 の逆数 (f_1 はコリオリのパラメータ)、鉛直スケールは h_1 とする (cf. Fig. 1)。

このとき、問題を簡単にするために、近似的に非発散性順圧の現象としてみることにすると、運動方程式は次のようになる：

$$du/dt - fv = -\partial z / \partial x \quad \cdots \cdots (1)$$

$$dv/dt + fu = -\partial z / \partial y \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、流速の x および y 成分を u および v とし、海面の水位を z とする。ただし、

$$d/dt = \partial/\partial t + u \partial/\partial x + v \partial/\partial y \quad \cdots \cdots (3)$$

なお、海面の時間的変動はゆるやかであって、近似的に、

$$\partial z / \partial t = 0 \quad \cdots \cdots (4)$$

とみなせるものとする。このとき、連続の条件としては、

$$\partial(hu)/\partial x + \partial(hv)/\partial y = 0 \quad \cdots \cdots (5)$$

また、海岸線を $x=0$ とし、水深 $h(x)$ は単調増加関数とし、 x が無限大のとき $h=h_0$ とする。ここで、式(1)および(2)から z を消去すると、渦度方程式がえられる。すなわち、

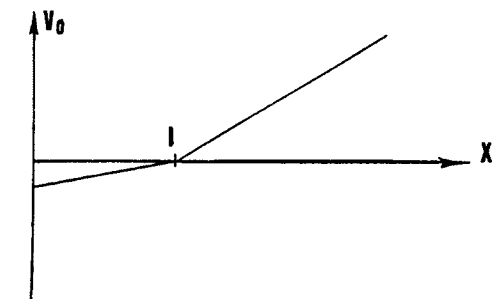
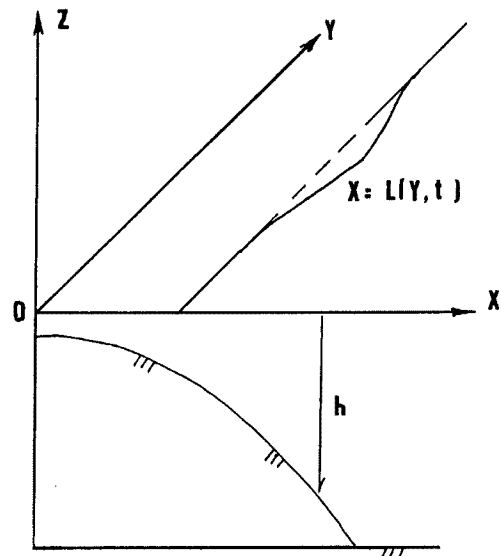


Fig. 1 Schematic model of a vorticity front as the Kuroshio front on a shelf off the coast.

$$d/dt[(f+s)/h] = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし,

$$s = \partial v / \partial x = \partial u / \partial y \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで, 流線関数を導入すると, このあとの解析に都合がよい。

海岸線および沖合では流れがないという境界条件をあたえる。また, 渦度場としての海 (半無限海) は, フロントに相当する境界

$$x = L(y, t) \quad \dots\dots\dots (8)$$

で, 沿岸側と沖合側との2つの領域に分けられているものとする。このとき, 境界面での運動学的条件は, 流れに対する連続の条件を満たしている。上に示した境界 L の条件を等価なラグランジュの条件におきかえると, さらに, 解析をすすめることができる。

ここで, 長波近似としての Grimshaw & Yi (1991)⁹⁾ の理論を再構成すると, Grimshaw & Yi (1991)⁸⁾ を考慮にいれて, グリーン関数の近似による解法を利用できる。

この段階で, 次のことがわかる。すなはち, 長波が小振幅であれば, 境界 L の両側の流量の差の正 (あるいは負) に対応して, フロントの変動は y 軸沿いに正 (あるいは負) の方向に, 水深に対応した速さで伝わっていくことを知ることができる。

とくに, 水深 h が指数関数的に変化しているものとする (cf. Fig. 1)。

ここで, フロントとしての境界 L が $x = l$ にあって, そこでの深さは h_1 であるとする。そこでのフロントの変動にたいして, 境界 L での深さの変動は小さなもので, 海底が比較的平坦なときには (cf. Send, 1989¹⁰⁾; Grimshaw & Yi, 1991⁸⁾), フロントの変動に対する深さの影響は小さいとみてよい。

ここで, 結果をみると, 陸棚の存在は, 線形長波の速さに影響を与えることになる。

4. 渦度フロントの例

渦度フロントは, 弱い非線形性の場合では, いろいろのパラメータの組合わせによって, その時間的変化の過程が大きく異なる。ここでは, 便宜的に, **Table 1** のような例を対象として考え, それぞれの特徴を示すことにした。この表に対応した条件下での数値的検討例は, 例えば, **Fig. 2** のようになる。このような渦度フロントの時間的変化について Grimshaw & Yi (1991)⁸⁾ も示している。

この **Table 1** において, パラメータとして次のようなものをえらんで検討をすることにした。すなはち, f/q_h をポテンシャル渦度としてとる。ここに, q_h は, 水深 h_1 とフロントとしての境界 L の両側の流量の差との積である。フロント L のパターンは双曲線関数であらわされるものとして, その振幅を a_0 とする。また, $h_r (= h_1/h_0)$ は, フロントでの水深と海岸線での水深との比である。そして, 海岸線から沖へ向かい静止海面に沿って水平方向に x 軸をとり, 初期条件は

$$L(y, 0) = 1 + a_0 \operatorname{sech}^2 by \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに, b は, 境界 L の両側の流量の差を水深の平方根で割ったものである。前節での結果を利用すると, これらのパラメータの組み合わせがいろいろの非線形的変動の特徴を知るためには都合がよい。

このような渦度フロントは, 海岸線と陸棚との相互作用によって時々刻々と非線形的に変形して行くもの

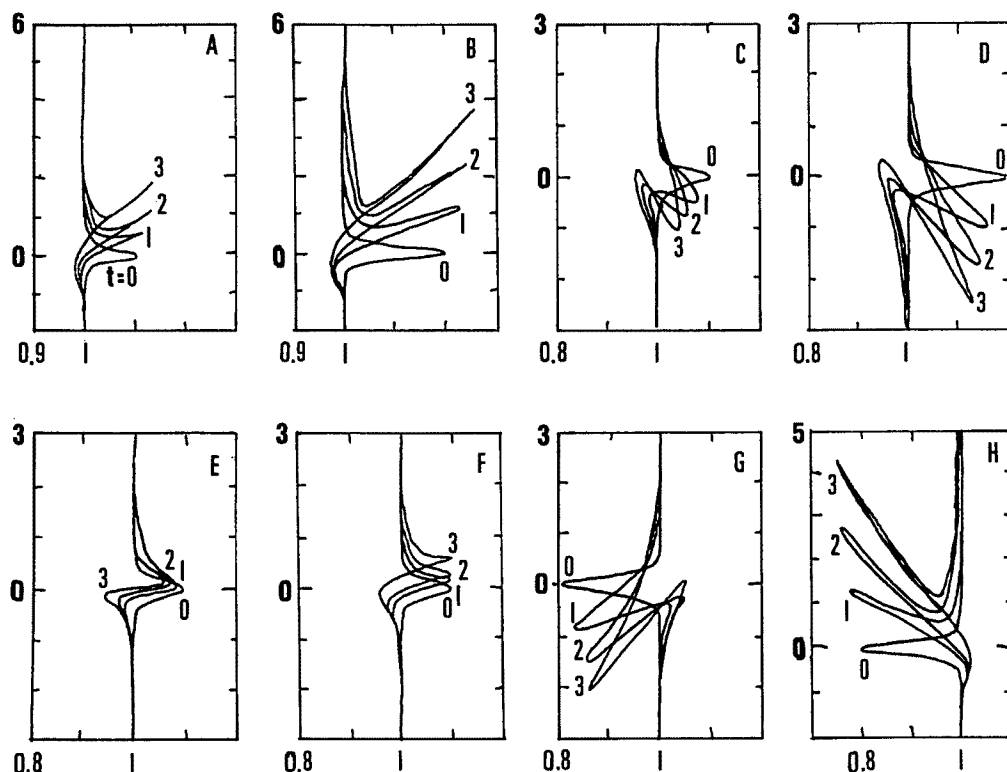


Fig. 2 Evolution of vorticity front. (Arbitrary scaling for time stepping.)

1) Refer to the parameters introduced in Table 1.

とかんがえられる。

現実には、太平洋北西部に位置する日本列島南沖の黒潮フロント周辺は渦度場であって、本文で考えた理論的モデルのある条件下での状況に対応するとみても差し支えないであろう。

人工衛星 NOAA の APT (自動画像変換) による赤外画像からみた黒潮フロントは、海面での等温度線の密なところとして認識できるものとする、本文のモデルに対応したフロントの特徴が衛星画像によってとらえることが可能なはずである。

ここでは、その典型例を、Table 1 のパラメータの組み合わせの例に対応して、**Fig. 3** に示した。ただし、パラメータの組み合わせの定量的評価は、巨視的に考えることができるが、ここに例示した画像ではむしろかしい。

ここで、Fig. 3 の例は、1993 年 2 月 12 日の 15 時 02 分および 1993 年 2 月 13 日の 19 時 10 分の 19 度 C 等温度線を、人工衛星 NOAA の APT 赤外画像からもとめて図に示したものである。この図では、19 度 C 等温度線がフロントの位置に対応するものとしてしめされている。図中、記号 R, S, T は、この等温度線の位置の変動が、本文の渦度フロントの時間的変動によく対応しているとみられる例である。この場合、記号 R のパターンは、Table 1 の case A (北半球中緯度の例) に相当するものとみてよいと言ってよいだろう。記号 S のパターンは、規模は小さいが、case A の変動が減衰に入る段階を示すものとみられるが、本文のモデルでは、減衰にかかわる要因を考慮していないので、十分な検討は、今後にまたなくてはならない。さらに、記号 T の例は、減衰から消滅の段階にあるものとかんがえられるが、これについての詳細は、やはり、今後にまつ必要がある。

Table 1 Nonlinear Parameters of Kuroshio Front

Case	f/q_h	a_0	q_h	h_r	p	b
A	5	0.1	-1	0	1	5
B	5	0.2	-1	0	1	5
C	-5	0.1	-1	0	1	5
D	-5	0.2	-1	0	1	5
E	0.2	0.1	-1	0	1	5
F	1.7	0.1	-1	0	1	5
G	5	-0.1	-1	0	1	5
H	5	-0.2	-1	0	1	5

- Ram : (1) Potential vorticity $q_h = dQh_1$,
 (2) Initial condition $L(y, 0) = 1 + a_0 \operatorname{sech}^2 by$,
 (3) Depth profile $h = h_1 \exp[p(x-1)]$, $h_r = h_1/h_0$,
 (4) $b = dQ[h(x)]^{1/2}$.

- Note : A Northern hemisphere (as reference), in a mid latitude,
 B Northern hemisphere with a large amplitude a_0 ,
 C Southern hemisphere (compare to the case A),
 D Southern hemisphere with a large amplitude a_0 ,
 E Northern hemisphere-in a lower latitudere,
 F Northern hemisphere-in higher latitudere,
 G Northern hemisphere with a negative amplitude,
 H Southern hemisphere with a negative amplitude.

5. 結 言

ここでは、黒潮フロントを、渦度フロントとしてとらえることを試みた。単純化した、陸棚のある半無限海を考え、海岸線付近における渦度フロントの時間的変形過程を、理論的モデルによって検討した結果をもとにして、調べ、その特徴をとらえるように努めた。この変形過程には、フロント周辺のポテンシャル渦度、初期条件としてのフロントの位置の変動、水深、陸棚の形状、地球自転の効果などが関係している。

このような変形過程を、人工衛星の赤外画像にみとめられた黒潮フロントの例について、定性的に検討した。

こんごは、黒潮フロントの変形過程と、台風高潮などの海岸災害にかかわる異常潮位との相互関係を明らかにし、このような災害の予測と防止軽減の道を示す努力を続けることが必要である。このためには沖合固定点としての観測塔による海象の長期にわたり観測を継続することである。また、このような災害の予測や対策には、地球規模のスケールの視点に立脚して、広い視野をもった研究の推進がもとめられることになる。

参 考 文 献

- 1) Nakamura, S.: On factors magnifying a storm surge, Proc. 19th Congr. IAHR, New Delhi, B (a), paper No. 5, 1981, pp.47-54.
- 2) 中村重久：近畿圏沿岸の高潮災害の要因としての黒潮について，京大防災研年報，第31号，B-2，1988，pp.753-773.
- 3) 中村重久：陸棚沿岸域における台風高潮について，京大防災研年報第35号，B-2，1992，pp.215-230.

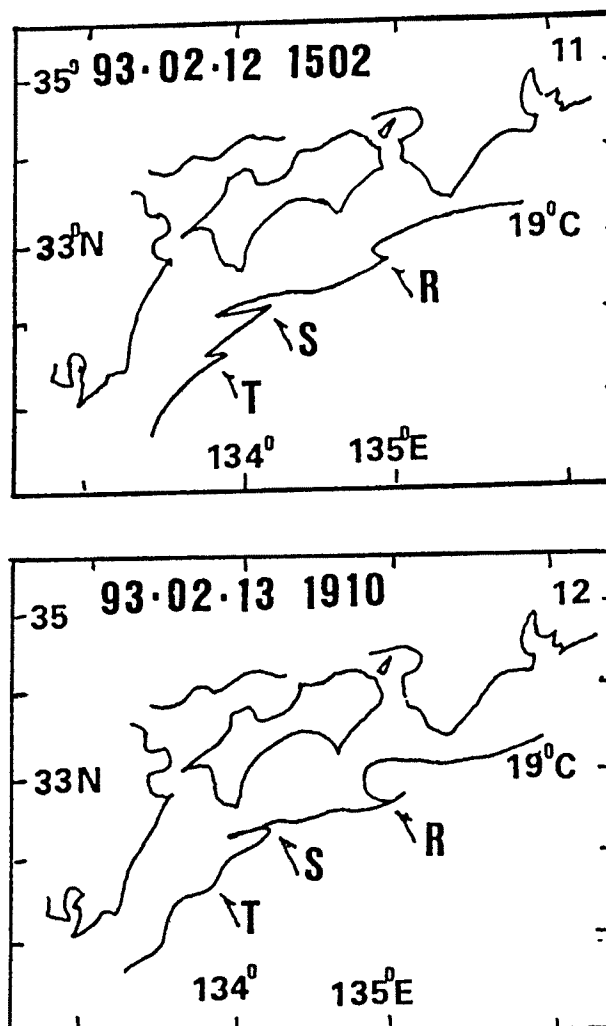


Fig. 3 One example of the thermal satellite patterns of the Kuroshio front as a vorticity front.
 1) Variations of the front (isotherm of 19 degree C) are along the marks R, S and T.
 2) Patterns of the front are for the satellite imageries at 15 h 02 m on 12 Feb. 1993 and at 19 h 10 m on 13 Feb. 1993

- 4) Fedorov, K.N.: The physical nature and structure of oceanic fronts, Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies, Springer-Verlag, N.Y., 333p. (esp. pp.24-29).
- 5) Nakamura, S.: Satellite monitoring of storm runoff, Proc. 5th Conf. on Urban Storm Drainage, Vol. 2, 1990, pp.639-645.
- 6) Nakamura, S.: Satellite thermal variations of Kuroshio in relation to storm floods, Proc. PORSEC'92 in Okonawa, Vol. 2, 1992, pp.835-840.
- 7) Dritschel, D.G.: Contour dynamics and contour surgery: numerical algorithms for extended, high resolution modeling of vortex dynamics in two-dimensional, inviscid, incompressible flows, Comput. Phys. Rep., Vol. 10, 1989, pp.77-146.

- 8) Grimshaw, R. & Z.Yi: Evolution of a potential vorticity front over a topographic slope, J.Phys. Oceanogr., Vol. 21, 1991, pp.1240-1255.
- 9) Grimshaw, R. & Z. Yi: Finite-amplitude long waves on coastal currents, J.Phys.Oceanogr., Vol. 20, 1990, pp.3-18.
- 10) Send, U.: Vorticity and instability during flow reversals on the continental shelf, J.Phys.Oceanogr., Vol. 19, 1989, pp.1620-1633.