九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

亜熱帯前線域の中規模渦活動量の経年変動および黒潮大蛇行発生への影響

鹿島, 基彦
神戸学院大学人文学部

市川, 香
九州大学応用力学研究所 | 海洋研究開発機構地球環境観測研究センター

佐竹, 誠
情報通信研究機構沖縄亜熱帯計測技術センター

https://doi.org/10.15017/14185

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 135, pp.61-67, 2008-09. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

亜熱帯前線域の中規模渦活動量の経年変動および黒潮大蛇行発生への影響

鹿島 基彦*1、市川 香*2、3、佐竹 誠*4

(2008年7月31日受理)

Interannual variability of mesoscale eddy activity at the subtropical fronts region and its influence on the generation of Kuroshio large meander

Motohiko KASHIMA*1, Kaoru ICHIKAWA*2,3 and Makoto SATAKE*4

E-mail of corresponding author: *kashima@human.kobegakuin.ac.jp*

Abstract

The Kuroshio off Enshunada, south of Japan Main Island, is well known to take two major paths, the nearshore path and the large meander path. The Kuroshio changed its path from the nearshore to the large meander during July 2004 (KLM04). The 9.25 MHz high frequency ocean radar developed by the National Institute of Communication and Technology observed a significant increase of the Kuroshio surface transport northeast of Taiwan, which is considered to induce KLM04, after the anticyclonic eddies from the subtropical fronts region collided with the Kuroshio east of Taiwan during August-September 2003. Interannual variability of mesoscale eddy activity at the subtropical fronts region was detected from altimeter data and the anticyclonic eddies which induced the Kuroshio increase were generated during the high eddy activity period, inevitably.

Keywords: *Kuroshio large meander, Subtropical fronts, Anticyclonic mesoscale eddy*

1. 緒 言

黒潮は遠州灘沖を直進する場合と、大きく迂回する大蛇行の場合の二つの代表的なモードを取ることが知られている (e.g., Kawabe, 1995)。1992年から始まった、広大な大洋を短時間で観測できる TOPEX/POSEIDON 衛星による海面高度偏差 (Sea surface height anomaly: SSHA) 観測開始以来、黒潮は大蛇行と考えられうる流路を、1999 年発生の非定常大蛇行と、2004 年発生の定常大蛇行の二回とっている。高度計観測期間中にこれらの大蛇行が発生終息したことにより、大蛇行のメカニズム解明に一歩近づくことが期待されている。

大蛇行の発生にはいくつかの要因が指摘されている。30°N 帯を東方から伝搬する中規模渦、および、亜熱帯前線帯の中規模渦 (e.g., Usui et al., 2008)、親潮の南下に伴う親潮系水の遠州灘への流入、海山の影響 (e.g., Endo and Hibiya, 2001) などがあげられる。前者3つは偏西風の強弱に伴い亜熱帯循環と亜寒帯循環の双方が同時に強弱する経年変動 (Yasuda and Sakurai, 2006) などの総観スケールの一つの現象が、それぞれの緯度帯にもたらした個々の結果とも考えられる。

大蛇行の発生前には、その引き金となる引き金小蛇行がトカラ海峡域で発生し、それが下流伝搬して遠州灘沖で大蛇行に成長することが知られている (e.g., Solomon, 1978; Endoh and Hibiya, 2000; 2001)。小蛇行の発生原因としては、30°N 帯を東方から伝搬する中規模渦 (e.g., Ebuchi and Hanawa, 2003) や、亜熱帯前線域に起源を持つ中規模渦の影響が東シナ海を通ってトカラ海峡域で小蛇行発生に影響することが指摘されている (Ichikawa, 2001)。

*1 神戸学院大学人文学部
*2 九州大学応用力学研究所
*3 海洋研究開発機構地球環境観測研究センター
*4 情報通信研究機構沖縄亜熱帯計測技術センター

本研究は、亜熱帯前線域起源の中規模渦が、その西方にある台湾東沖黒潮へ合流し黒潮を強化する現象を、短波海洋レーダによって詳細に実測観測した結果を基に、2004 年の定常大蛇行発生前を含む亜熱帯前線域の中規模渦活動の経年変動と、その黒潮大蛇行との因果関係について考察する。

2. データ と 方法

2.1 短波海洋レーダ

情報通信研究機構 (NICT) 沖縄亜熱帯計測技術センターの開発した最大探知距離 200 km 以上を誇る 9.25 MHz 短波海洋レーダ (HF レーダ) による台湾北東沖の黒潮表層流データを用いた (Table 1)。石垣島と与那国島に設置された1組の HF レーダ局から、30 分毎に視線方向 7 km 間隔で、前方 120°範囲を観測する (Matsuoka et al., 2003)。本研究では、主要 8 分潮成分を除去した日平均データを作成し、それに 3 日移動平均を施すことで大気起源の非地衡流成分を除去した (Tokeshi et al., 2007)。7 km 格子の日平均データを用いた。

台湾東沖は、中規模渦が黒潮に合流する最も盛んな海域の一つである (e.g., Yang et al., 1999)。HF レーダ観測域は、そのすぐ下流域にある。同時に、黒潮が北太平洋から東シナ海に侵入した直後の海域であり、そこは東西に走る大陸斜面の影響によって、黒潮本流が北向きから東向きに向きを変え、黒潮から一部が北向き黒潮分岐流として枝分かれする海域でもある。本研究では、比較的黒潮が枝分かれする前の与那国島の北に延びる測線 Line-Y (123.0°E) を設け、測線を東向に通過する流速絶対値の測線沿い積分値を表層流量 (Surface transport per unit depth: STUD)として用いた (Fig. 1)。

2.2 海面渦度偏差

TOPEX/POSEIDON、JASON-1、ERS-1、2 衛星海面高度計を用いた J-OFURO の 0.25 格子の 9.915 日間隔の海面高度偏差 (SSHA) データを使用した。季節変動成分などの大規模現象と小規模な渦現象を取り除いて、中規模渦現象のみを観測するために、SSHA から地衡流平衡を仮定した海面渦度偏差 (Sea Surface Vorticity Anomaly: SSVA) に南北 1.5°、東西 2.0°の移動平均を施したもの (以後 SSVA) を本研究に用いた。

Table 1 Specifications of the HF radar.

Station	Ishigaki and Yonaguni islands
Data period	July 14, 2001 – Mar. 31, 2006
Detectable range	~200 km
Radar type	Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave (FMICW)
Center frequency	9.25 MHz
Sweep bandwidth	22 KHz
Sweep interval	0.7 s
Transmit power	1000 W (peak), 500 W (average)
Beam width	8°
Azimuth coverage	±60° (8° step)
Antenna type	3 element Yagi antenna (transmitter) 16 element phased array (receiver) DBF (Digital Beam Forming)
Temporal resolution	30 minutes
Spatial resolution	7 km (radial)
Speed resolution	2.5 cm/s
Representative depth	1.3 m (Stewart and Joy, 1974)

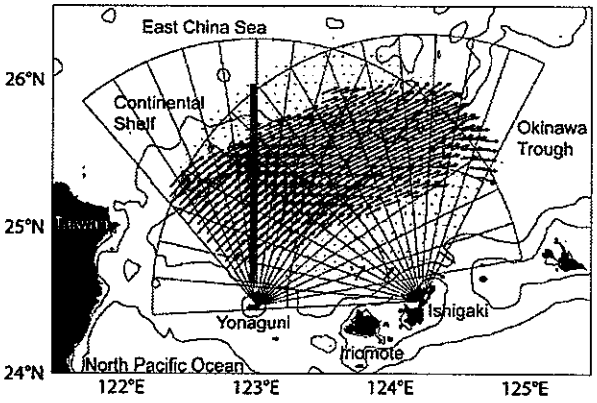

Fig. 1 Surface currents observed by the HF radar on September 14, 2003, when the current increased the most. Black (Gray) vectors indicate over 100 cm/s (100 cm/s and under). The arcs indicate 100- and 200-km ranges from each station. The gray line off Yonaguni Island indicates Line-Y. 200-m and 1000-m isobaths are superimposed.

3. 結 果

3.1 HF レーダによって観測された 2003 年 9 月の黒潮表層流量大増加

2003 年 9 月の台湾北東沖黒潮の表層流量大増加を HF レーダは観測した。9 月 14 日には観測開始以来の最大値を示し (Fig. 1、2a)、9 月 7-17 日の約 10 日間にかけて極大状態は続いた。この大増加は 2 つ以上の高気圧性中規模渦が引き起こしていた。約 23°N と約 20°N 沿いを西方伝搬してきた 2 つの高気圧性渦が (Fig. 3a)、台湾東沖で合体して一つの強い高気圧性渦になり (Fig. 3c)、黒潮に合流して共

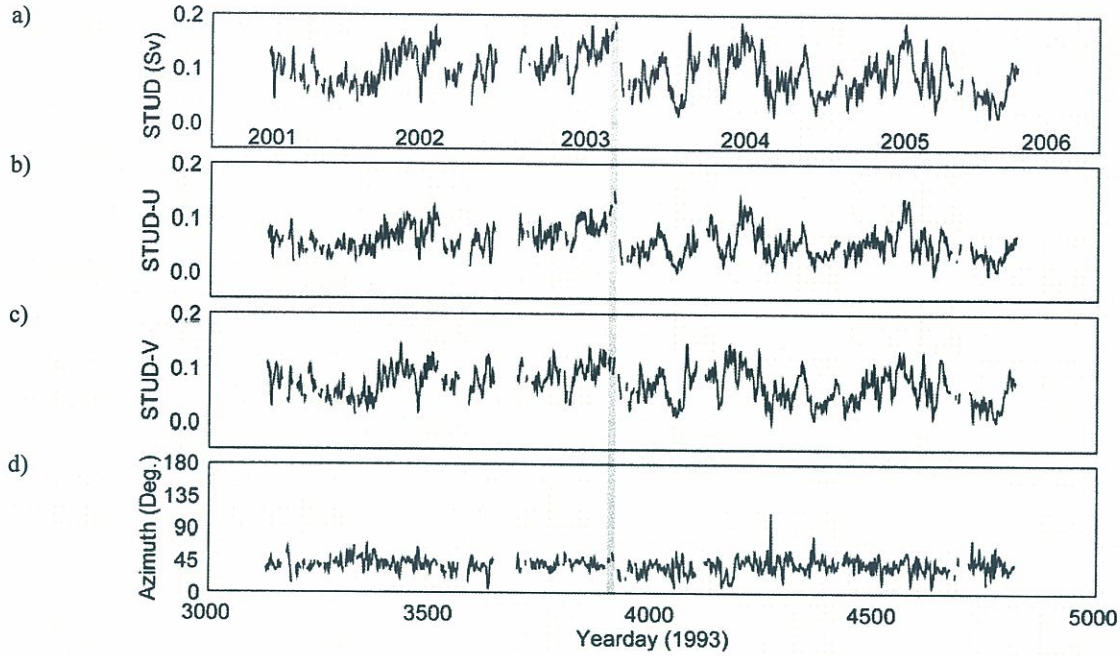

Fig. 2 (a) Surface transports per unit depth (STUD), (b) U(eastward)- and (c) V(northward)-component of STUD, and (d) vector averages of the current directions (azimuth) along Line-Y. The period during the increase in September 2003 is shaded.

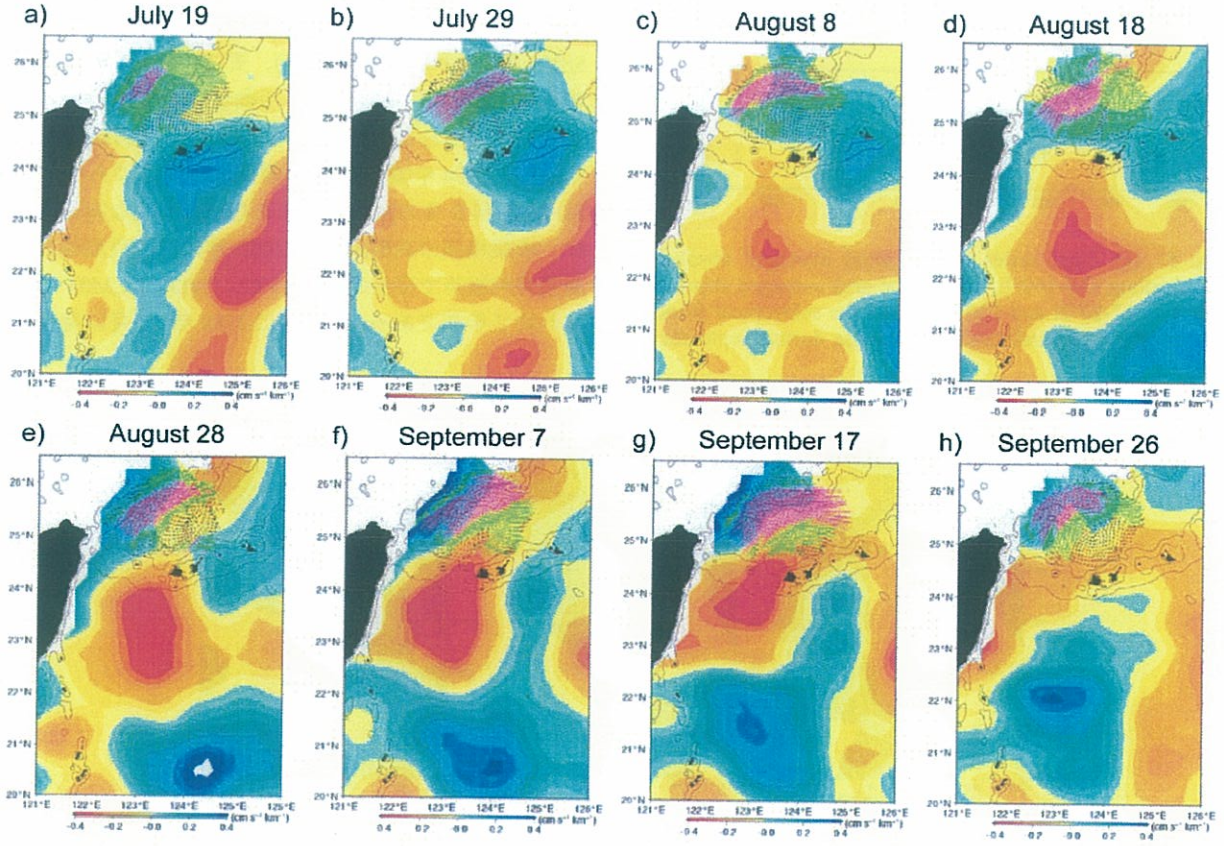

Fig. 3 Time sequences of surface current vectors as recorded by the HF radar with SSVA field during the significant Kuroshio currents increase of September 2003. Pink (Green) vectors indicate over 100 cm/s (50-100 cm/s).

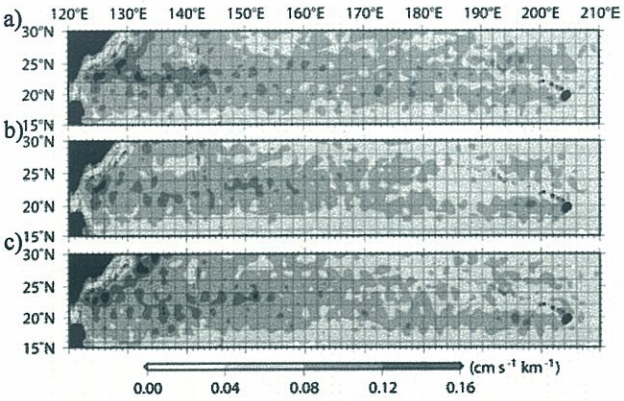

Fig. 4　Temporal average of absolute SSVA during (a) 1995-1997, (b) 1998-2001, and (c) 2002-2004.

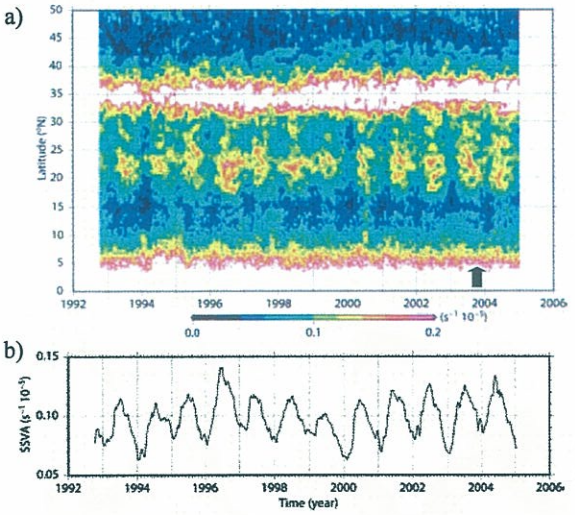

Fig. 5　(a) Time series of the zonal averaged absolute SSVA along 130-160°E, and (b) the area averaged absolute SSVA in 17-27°N and 130-160°E, at the subtropical fronts region. The arrow indicates the increase during September 2003.

に北上し (Fig. 3e)、渦の北部が東シナ海に進入したときに最大流量になった。このとき流路が通常より真っすぐで東向きになっていた (Fig. 1、3g)。また、大増加直後に急減したことも特徴的であった (Fig. 2a、3h)。

Usui et al. (2008) は SSHA データ同化モデル (Usui et al., 2006) の結果から、2003 年 8-9 月に台湾東沖に強い高気圧性渦が到来した後に、台湾北東沖黒潮の流速が増加し、沖縄本島南西沖の沖縄トラフ域に強い低気圧性擾乱 (黒潮前線波動) が発生し、それが下流伝搬してトカラ海峡域で引き金小蛇行を発生させ、2004 年 7 月に遠州灘沖の大蛇行 (2004 年 7 月～2005 年 7 月) を発生させたことを示した。渦の到来した台湾東沖と、擾乱の発生した沖縄本島南西沖の間に位置する HF レーダは、擾乱発生の直接の原因と考えられる台湾北東沖の黒潮表層流量の大増加が複数の高気圧性中規模渦の到来によって発生していたことを詳細に観測していた。

3.2　亜熱帯前線域の中規模渦活動の経年変動

台湾と同緯度帯における西部北太平洋域には、北亜熱帯前線と南亜熱帯前線の二つの亜熱帯前線がある (Kobashi et al., 2006)。この亜熱帯前線域 (17-27°N、130-160°E) において中規模渦の活動量が高いことが SSVA 場からわかった (Fig. 4)。更に、SSVA の東西平均時系列において、中規模渦の活動量の 10 年スケールの経年変動がみられた。1996 年頃と 2003 年頃は活動量が高く、逆に、1994 年頃と 1999 年頃は低い傾向にあった (Fig. 5)。2003 年 9 月の流量大増加を起こした主な高気圧性渦は、中規模渦の高活動期の 2002 年には伊豆海嶺以東の亜熱帯前線帯で発生成長していた。これは KLM04 の発生した約 2 年前であった。同様に 1999 年 11 月に発生した

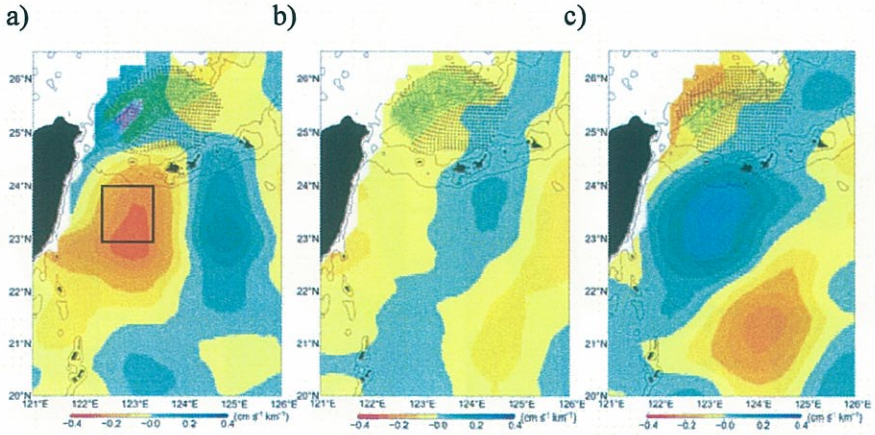

Fig. 6　Composites of Kuroshio current vectors northeast of Taiwan observed by the HF radar, and composites of the surrounding SSVA field during July 2001–March 2006. The composites are classified according to the area averaged SSVA in the 23-24°N and 122.5-123.5°E (shown by square) for (a) the negative-SSVA, (b) regular-SSVA, and (c) positive-SSVA phase. Pink (Green) vectors indicate over 100 cm/s (50-100 cm/s). Data used only when both the HF radar and the SSVA data were available (The HF radar daily data has missing periods, and the arrival interval of T/P is ~10 days).

非定常黒潮大蛇行 (ULM99) の数年前の 1996-1998 年頃も中規模渦の高活動期であった。

また、SSVA にはステリックハイトによる季節変動は含まれていないはずであるが、亜熱帯前線域の中規模渦の活動量に、春期に高い顕著な季節変動がみられた (Fig. 5)。風の場の季節変動など他の要因が関係していることが考えられる。

4. 考 察

4.1 台湾北東沖黒潮表層流量の渦種依存性

2003 年 9 月の黒潮表層流量大増加を引き起こした一つの大きな原因は、強い高気圧性渦の台湾東沖への到来であった (3.1 節)。黒潮表層流量と中規模渦の種類 (高気圧・低気圧) の関係は、この 2003 年の場合に限らず、一般的にあると考えられる。23-24°N、122.5-123.5°E の領域平均 SSVA の標準偏差 (SD) により、台湾東沖に到来した中規模渦の種類を判別し、HF レーダ観測黒潮表層流速ベクトルと周辺 SSVA 場のコンポジット (場合毎の平均値) を Fig. 6 に示す。(Negative-SSVA) 領域平均の SSVA が負で SD より大きい場合は強い高気圧性渦が到来した場合 (Fig. 6a)、(Regular-SSVA) SSVA が SD 内の場合は顕著な渦が到来していない場合 (Fig. 6b)、(Positive-SSVA) SSVA が正で SD より大きい場合は強い低気圧性渦が到来した場合 (Fig. 6c) にそれぞれ相当する。表層流量はそれぞれ 0.118、0.092、0.071 Sv であった。Ichikawa et al. (2008) が指摘したように、高気圧性渦到来時は流量増加傾向を示した (Fig. 6a) 。また、逆の低気圧性渦到来時は流量減少傾向を示した (Fig. 6c)。

高気圧性渦到来時には、黒潮の流向は通常の右曲がりの流路 (Fig. 6b) に比べてより真っ直ぐに、また、より東向きになる傾向を示した (Fig. 6a)。流向が通常よりも東方面 (黒潮本流方面) を向くことは、中規模渦の流量自体が黒潮本流に加わることとは別に、流向の変化によって北向黒潮分岐流よりも東向黒潮本流の流量割合が増加する効果が考えられる。

4.2 中規模渦到来に伴う黒潮流量の変動周期

台湾東沖の SSHA 場には中規模渦の準周期的な到来による 100 日程度の変動が顕著である (Yang et al., 1999; Ichikawa, 2001; Lee et al., 2001)。同じ変動は本研究の SSVA 場からも見られた (Fig. 7)。この 100 日周期の変動は 2000 年頃にはほとんど見られなかった。その時期に到来した渦は強くなかったことなどが考えられる。それは亜熱帯前線域において中規模渦の活動量が弱かった 1999 年頃の 1-2 年後にあたる (Fig. 5)。これは 23°N 帯を 150-160°E にある中規模渦が台湾沖に到達するのにかかる時間と矛盾しない(約 5.5 km/day (Killworth and Blundell, 2003))。また、2003 年 9 月の大増加をもたらした主要な高気圧性渦は 2002 年 7 月には 155-160°E、23°E 付近にあった。1-2 年のラグを持って亜熱帯前線域の中規模渦活動の経年変動が、台湾の緯度における中規模渦による変動周期である約 100 日周期の変動の強弱として現れていたと考えられる。

東シナ海に黒潮が入った後の台湾北東沖の黒潮表層流量にも約 100 日周期の変動がみられた。また、約 60 日周期の変動もより多く見られた (Fig. 8)。Line-Y の表層流量とその 19 日前の台湾東沖 SSVA の間の相関係数は-0.57 (95% 信頼限界-0.61～-0.53) であった。台湾東沖に到来する中規模渦の種類による影響が、台湾北東沖黒潮表層流量に約 100 日周期の変動として現れていたと考えられる。

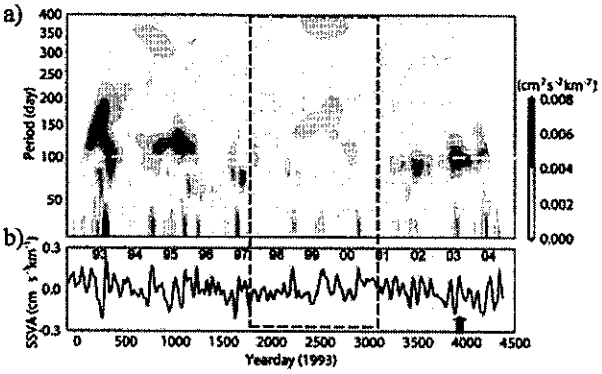

Fig. 7 (b) Time series of SSVA east of Taiwan in 21-24°N and 122-124°E, and (a) its wavelet power. The ~100-day variation was weaker especially during 1998-2001. The arrow indicates the Kuroshio increase during September 2003. Note, annual variation was removed from SSVA, but mesoscale phenomena were well remained (Section 2.2).

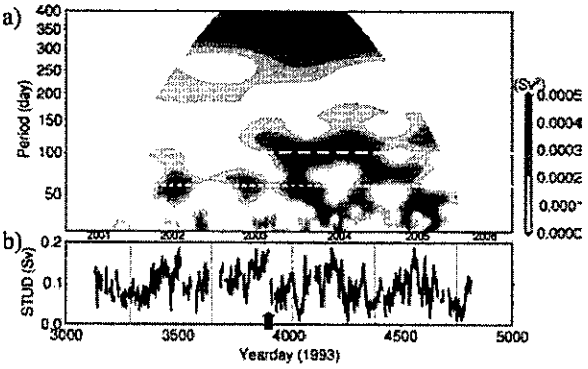

Fig. 8 (b) Time series of the surface transport per unit depth (STUD) across Line-Y, and (a) its wavelet power. The arrow indicates the increase during September 2003.

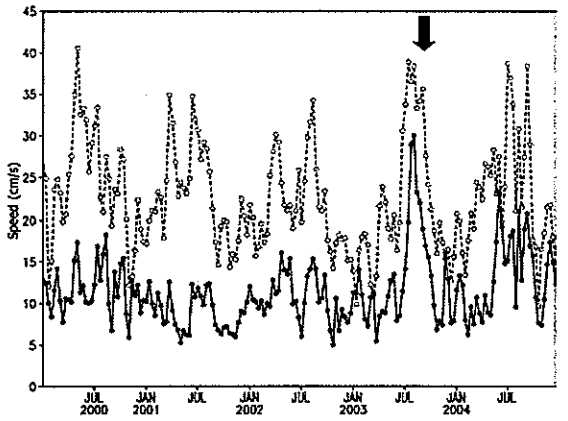

Fig. 9 Area averaged current speed in 24.5-26.5°N and 122.5-124.5°E at the surface (dashed) and 100-m depth (solid) (N. Usui personal communication). The arrow indicates the increase during September 2003.

4.3 2003 年 9 月の黒潮流量大増加の特異性

台湾北東沖の黒潮表層流量には夏季に多い季節変動が見られる (Tang et al., 2000; Ichikawa et al., 2008; Fig. 2、8)。これに渦の到来による約 100 日周期の変動のピーク(高気圧性渦の到来)が重なったときに 2003 年 9 月の大増加は起きていた。しかし、これは他の 2002、2004、2005 年夏季の増加時においても同様であり、表層流量で見る限りでは 2003 年 9 月の大増加には、他の年と比べて顕著な特異性はみられなかった (Fig. 2)。しかし、SSHA データ同化モデル (Usui et al., 2006) では、表層では HF レーダの観測結果と同じく、2003 年 9 月に他の年に比べて顕著な特異性は見られなかったものの、100 m 深では顕著に大きい流速を示した (碓氷私信; Fig. 9)。この結果は、2003 年 9 月に台湾北東沖黒潮の鉛直構造が深かったことを示唆している。このとき台湾東沖で黒潮に合流した中規模渦群 (3.1 節) の鉛直構造は深かったことも考えられる。そして、これらの中規模渦群は、亜熱帯前線域の中規模渦活動が活発な時期に発生・成長していた (3.2、4.2 節)。いずれにしても、2003 年 9 月の黒潮流量大増加は、約 100 日周期、年周期、数年～10 年スケールの経年周期の三つの変動のピークがそろったときに発生していた。

5. 結 言

情報通信研究機構 (NICT) 沖縄亜熱帯計測技術センターの開発した 9.25 MHz 短波海洋レーダ (HF レーダ)が、2003 年 9 月に台湾北東沖において急激な黒潮表層流量の大増加を観測した。これは 2001 年 7 月の観測開始以来最大の表層流量を示した。これは台湾東沖への高気圧性渦の到来直後に起きていた。強い高気圧性渦が台湾沖への到来した後に、台湾北東沖の黒潮の流速が増加し、沖縄本島南西に強い低気圧性擾乱を発生させ、それが下流伝搬して引き金小蛇行を生んだことが、2004 年の大蛇行発生の一因となったと考えられる (Usui et al., 2008)。HF レーダは 2003 年 9 月にこの流速増加を詳細に観測していた。

台湾東沖で中規模渦による約 100 日周期の変動が SSVA 場から観測された。高気圧性渦の到来時は黒潮の表層流量は増加し、逆に、低気圧性渦では減少していた。また、夏季に増える流量の季節変動も顕著にみられた。この二つの変動のピークが重なるときに黒潮表層流量は増加していたが、特に、この 2003 年 9 月の場合は、亜熱帯前線域における中規模渦活動の 10 年スケールの経年変動の高活動期の影響を受けていた。それが特異性を生み出す一因となっていたと考えられる。

大蛇行の直接の発生原因には、まず 30°N 帯の中規模渦が考えられるが、本研究対象である東シナ海からの擾乱も大きいと考えられる。しかし、その擾乱がどのように下流伝搬したのか、本当に関係していたのか不確かなところが多い。また、亜熱帯前線域における中規模渦活動の経年変動は黒潮続流の拡張・収縮 (Qiu, 2003) より数年遅れで対応する関係にあった。この関係は黒潮続流の拡張期に黒潮再循環流が増大することによって、亜熱帯前線の勾配が大きくなり中規模渦の生成が活発化されるストーリーと整合性がある。ARGO フロートデータなどを用いた亜熱帯前線域の海洋内部での経年変動の検証など、さらなる解析が望まれる。

謝辞

気象研究所の碓氷典久博士には、貴重な御助言と Fig. 9 を提供して頂きました。9.25 MHz 短波海洋レーダの開発運営に関った NICT の佐藤健治博士、松岡建志博士、児島正一郎博士、琉球大学の藤井智史教授に感謝致します。J-OFURO (http://dtsv.scc.u-tokai.ac.jp/j-ofuro/; Kubota et al., 2002) の SSHA データを使用しました。また、貴重な御意見を頂きました鹿児島大学の中村啓彦准教授に感謝致します。そして、黒潮の実測観測と衛星観測の融合研究の先駆者である今脇資郎元九州大学応用力学研究所教授には様々なご指導を頂きました。ここに改めて感謝致します。

参考文献

1) Endo, T. and T. Hibiya (2000): Numerical Study of the Generation and Propagation of Trigger Meanders of the Kuroshio South of Japan. *J. Oceanogr.*, 56, 409–418.

2) Endo, T. and T. Hibiya (2001): Numerical simulation of the transient response of the Kuroshio leading to the large meander formation south of Japan. *J. Geophys. Res.*, **106**, 26833-26850, doi: 10.1029/2000JC000776.

3) Ichikawa, K. (2001): Variation of the Kuroshio in the Tokara Strait Induced by Meso-Scale Eddies. *J. Oceanogr.*, **57**, 55–68.

4) Ichikawa, K., R. Tokeshi, M. Kashima, K. Sato, T. Matsuoka, S. Kojima and S. Fujii (2008): Kuroshio variations in the upstream region as seen by HF radar and satellite altimetry data. *Int. J. Rem. Sen.* (in press).

5) Kashima, M., S. Ito, K. Ichikawa, S. Imawaki, S. Umatani, H. Uchida, and T. Setou (2008): Quasiperiodic small meanders of the Kuroshio off Cape Ashizuri and their inter-annual modulation caused by quasiperiodic arrivals of mesoscale eddies. *J. Oceanogr.* (accept)

6) Kawabe, M. (1995): Variations of Current Path, Velocity, and Volume Transport of the Kuroshio in Relation with the Larger Meander. *J. Phys. Oceanogr.*, **25**, 3103–3117.

7) Kawabe, M. (2003): Study on variations of current path and transport of the Kuroshio. *Umi no kenkyu (Oceanogr. in Japan)* , **12**, 247–267.

8) Killworth, P. D. and J. R. Blundell (2003): Long Extratropical Planetary Wave Propagation in the Presence of Slowly Varying Mean Flow and Bottom Topography. Part I: The Local Problem. *J. Phys. Oceanogr.*, **33**, 784–801.

9) Kubota, M., N. Iwasaka, S. Kizu, M. Konda, and K. Kutsuwada (2002): Japanese ocean flux data sets with use of remote sensing observations (J-OFURO). *J. Oceanogr.*, **58**, 213–225.

10) Lee, T.N., W.E. Johns, C.-T. Liu, D.X. Zhang, R. Zantopp and Y. Yang (2001): Mean transport and seasonal cycle of the Kuroshio east of Taiwan with comparison to the Florida Current. *J. Geophys. Res.*, **106**, 22143–22158.

11) Matsuoka, T., S. Kenji, S. Kojima and S. Fujii (2003): HF Ocean Radar Observation of Surface Currents Induced by a Typhoon in the East China Sea. *IEEE Proc. Int. Geosci. and Rem. Sen. Symp. 2003*, IF05-03.

12) Solomon, H. (1978): Occurrence of small "trigger" meanders in the Kuroshio off southern Kyusyu. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **34**, 81–84.

13) Stewart, R.H. and J.W. Joy (1974): HF radio measurements of surface currents. *Deep-Sea Res.*, **21**, 1039–1049.

14) Tang, T. Y., J. H. Tai and Y. J. Yang (2000): The flow pattern north of Taiwan and the migration of the Kuroshio. *Cont. Shelf. Res.*, **20**, 349–371.

15) Tokeshi, R., Ichikawa, K., S. Fujii, K. Sato and S. Kojima (2007): Estimating the geostrophic velocity obtained by HF radar observations upstream of the Kuroshio. *J. Oceanogr.*, **63**, 711–720.

16) Qiu, B. (2003): Kuroshio Extension Variability and Forcing of the Pacific Decadal Oscillations: Responses and Potential Feedback. *J. Phys. Oceanogr.*, **33**, 2465–2482.

17) Usui, N., S. Ishizaki, Y. Fujii, H. Tsujino, T. Yasuda and M. Kamachi (2006): Meteorological Research Institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system: Some early results. *Adv. in Space Res.*, **37**, 806–822.

18) Usui, N., H. Tsujino, Y. Fujii and M. Kamachi (2008): Formation process of the Kuroshio large meander in 2004: generation of a trigger meander. *J. Geophys. Res.*, **113**, C01012, doi:10.1029/2007JC004266.

19) Yang, Y., C. Liu, J. Hu and M. Koga (1999): Taiwan Current (Kuroshio) and Impinging Eddies. *J. Oceanogr.*, **55**, 609–617.

20) Yasuda, T., and K. Sakurai (2006): Interdecadal variability of the sea surface height around Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L01605, doi:10.1029/2005GL024920.