

10-19 东海黑潮锋面涡、暖丝和暖环

郭炳火

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛)

P731.27

摘要

本文根据1989年4月10~21日在东海东北部的海洋调查资料以及1989年4月10日和16日的卫星红外影象分析了黑潮锋面涡、暖丝和暖环的特征。结果表明,出现在这里的锋面涡约以30 cm/s的速度随黑潮主干移动,在锋面涡的冷中心区陆架混合水插入同时,下层的高营养水上升,从而造成高生产力区。黑潮暖丝携带约 $4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}$ 的输运量以50 cm/s的速度逆黑潮西行,然后暖丝可能沿陆架坡转向北,或可能顺时针旋转形成暖环。

关键词: 东海, 黑潮锋面涡, 暖丝, 暖环

一、引言

70年代以来,随着卫星遥感技术在海洋观测中的应用,人们从卫星图片上看到的黑潮这样强大的洋流并不是平滑管道状的流动,除了它的路径弯曲外,在其边缘区呈现一派十分活跃复杂的图象,黑潮水与陆架水块相互穿插,黑潮锋面涡、暖丝、暖环等现象几乎在每张较为清晰的遥感图片中都可见到。可以说锋面涡等中尺度过程是东海陆架边缘区最活跃的海洋动力现象之一,它们在陆架水和黑潮水相互作用过程中是最重要的因素,因而海洋学家对此给予高度的注视。Huh(1982)根据卫星影象分析了春季对马暖流和它从黑潮分离的情况^[5];Muneyama等(1984)^[6]、山形俊男(1989)研究了九州西侧海域的暖水涡^[4];郑全安和袁业立(1988)研究了黑潮切变波和涡旋现象的动力问题^[1];柴田彰(1981)^[3]和 Sugimoto等(1988)研究了东海黑潮锋面的蛇形^[7];杉村俊男等(1988)利用NOAA-10卫星信息分析了日本周围海域的流动。所有这些研究在不同程度上涉及东海黑潮锋面涡旋以及有关现象,获得不少有益的成果。然而,这些研究都是根据卫星影象来分析的,因此仅局限于海表面的状况。郭炳火等(1991)利用卫星图片和海洋调查资料研究了黑潮暖丝与对马暖流的关系^[2],但不足之处是所用的两种资料并不同步。1989年春季我们在东海东北部海区进行一次锋面涡的专题调查,同时也获得同期的卫星红外影象的图片,它们为本研究工作提供了较为满意的资料。

二、卫星影象分析

在执行东海东北部海域的调查期间,我们获得三张NOAA-J1Ch4的红外遥感影象

本文于1992年1月22日收到,修改稿于1992年6月3日收到。

图片(1989年4月10日、16日和17日),在本文中给出其中的两张。1989年4月16日的图片(图1b),整个东海区无云覆盖,海面温度图象十分清晰,黑潮暖水倒卷尤其显著。如在 $27^{\circ}\sim 28^{\circ}\text{N}$, $125^{\circ}\sim 126^{\circ}\text{E}$ 范围内出现一个典型的折叠波结构(图1b中“3”),与湾流锋面涡的图象完全相似,可以认为它就是黑潮锋面涡。其中,倒卷的暖水舌也被称为锋面涡舌,或“折叠波”,或“shingles”。近几年来,许多学者称之为暖丝(warm filament)。在本文中我们取暖丝一词。特别引人注意的是在海区的东北部,出现一个尺度较大的锋面涡(图1b中“4”),它的暖丝结构显得较复杂,它的一部分向西南回卷(图1b中“5”),但势力甚弱;另一部分向北(图1b中“6”)。从4月10日的卫星影像(图1a),我们可以看到在 $30^{\circ}\sim 30^{\circ}40'\text{N}$, $128^{\circ}\sim 129^{\circ}\text{E}$ 的区域出现黑潮高温水向北隆起,在隆起块的左侧出现两支暖丝,一支向南(图中“7”);另一支向北(图中“8”)。其中向南的这支暖丝与黑潮一起包围了一个冷水块(图中“9”),它们共同构成锋面涡旋。其冷水块呈随圆状,南北长约50km,东西宽约10km,南端不封闭。此外在其左侧不远处,紧挨着一个呈椭圆状的暖水块,其中心部分水温稍低(图中“10”),它的长轴约100km,短轴约60km,这可能是锋面涡舌从黑潮脱落下来而演变成暖涡。在图1a中我们还可以看到九州近岸存在一支北上的黑潮暖丝流。由此可见,在冲绳海槽北部的两侧斜坡上并存两支直接北上的黑潮暖丝流,但海槽中部却为南向低温的沿岸流。这种现象郭炳火等(1991)已提到,这里它再次被发现,可见这并非是偶然的发现,在研究九州西侧海域的环流变化时必须给予足够的注意。

郭炳火等(1991)曾根据1986年3月5~7日的卫星红外影像的分析指出²⁾,发生在这里的黑潮锋面涡是随黑潮主流向东移动,并估计其相速为30 cm/s。同样地,我们认为1989年4月16日出现在九州西侧海域的这个锋面涡是4月10日那个涡发展而来的。按黑潮暖水隆起块或锋面涡中心冷水块前沿的东移情况估计,它们在137h内移动了120km。那么,其相速为24 cm/s,与过去的估计基本一致。

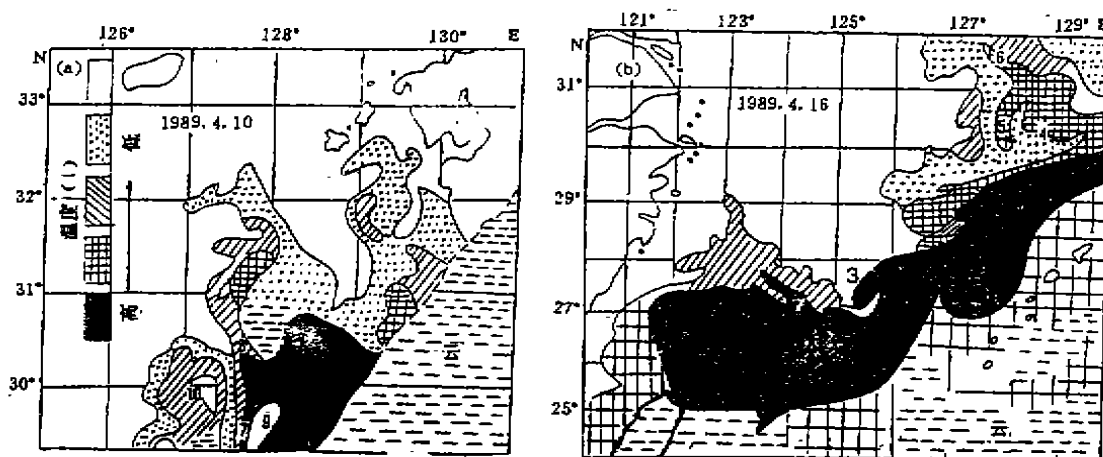


图1 NOAA-11 卫星红外影像

a 为 1989 年 4 月 10 日; b 为 1989 年 4 月 16 日

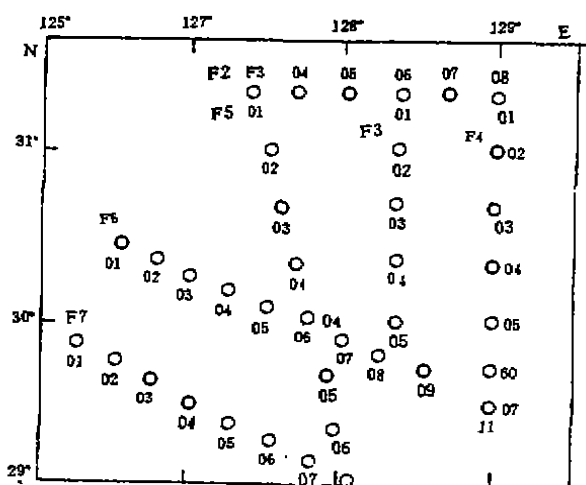


图2 调查站位(1989年4月10~21日)

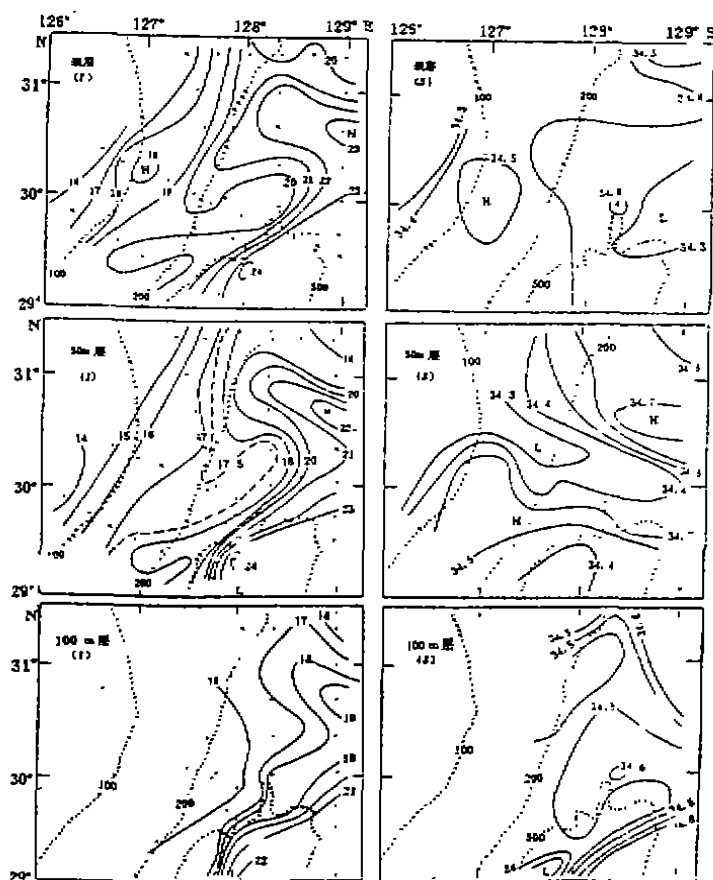


图3 表层、50m 和 100m 层的温度与盐度分布
(1989 年 4 月 10~15 日)

三、海洋观测结果

1989年4月10~21日“向阳红九号”船在九州西南侧海区进行水文、化学和生物的综合观测(站位见图2)。各断面的CTD测站进行两次重复测量,第一次观测为4月10~16日,断面顺序为, F_7 (0605~2150/10), F_6 (1225/13~2352/14), F_4 (0135~1355/15), F_2 (1640/15~0030/16), F_3 (0240/16~1317/16), F_3 (1720/16~0200/17);第二次观测为4月17~21日),其中断面 F_3 因遇大风而缺测。本节将利用这些观测资料分析九州西侧海域黑潮锋面涡的特征。

(一) 锋面涡的平面图特征

图 3~4 分别为两次调查的温度和盐度平面分布图。由图可以看到表层温度分布的基本面貌与 4 月 16 日卫星影象大体一致。需要说明的是在图 3 的温度分布我们看到两个倒卷的暖水舌,这与卫星图象不一致,分析其原因应是海洋调查无法做到同步造成的。 F_1 断面观测时间为 4 月 10 日,而 F_2 断面是 13~14 日观测的,可以认为 F_2 断面以北的锋面涡旋应为 F_1 断面那个涡旋北移的结果。现在分析第一次观测到的锋面涡形态。在图 3 中测区的东北部一支高温水舌从黑潮逐出,然后向西伸长,表层水温最高 23.0°C ,向西水温略有降低,等温线明显地向西南

弯曲。在 50m 层西伸的暖水舌温度最高为 22.2°C , 其主体向西偏北伸长, 等温线向西南弯曲较表层明显减弱, 100m 层暖水舌温度最高 19.8°C , 呈向西北伸长, 不出现等温线向西南弯曲, 暖水舌与黑潮之间的夹角从表层向下逐渐变大, 这种特征与湾流锋面涡相似。

至于盐度分布状况, 除表层看不出有明显的规律性之外, 50m 层和 100m 层相对应存在由东向西伸长的低盐水舌, 可见西伸的暖水舌同时具有低盐的性质。

介于暖水舌与黑潮之间, 可以看到一支低温水自西向东插入, 它的表层水温为 $19\sim 20^{\circ}\text{C}$, 50m 层为 $17\sim 18^{\circ}\text{C}$, 100m 层为 $16\sim 17^{\circ}\text{C}$ 。低温水块的前锋达到 $128^{\circ}25'\text{E}$ 附近。在 50m 和 100m 层的盐度图中同样可以看到低盐水自西向东插入, 呈现低温、低盐特性的这一水域称为锋面涡的冷中心区。

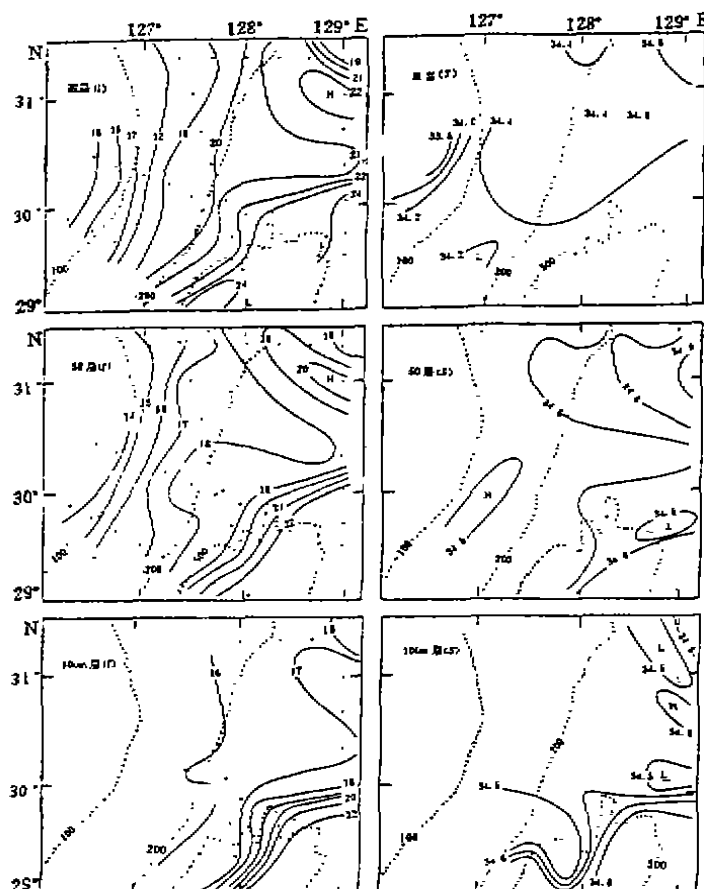


图 4 表层、50m 和 100m 层的温度与盐度分布
(1989 年 4 月 17~21 日)

第二次观测结果(图 4)表明, 暖水舌大致向西北伸长, 等温线似乎无向西南弯曲的趋势。不过因缺测 F_3 断面, 这一细节尚难断定。自西向东插入的冷中心区各层水温为: 表层 $20\sim 21^{\circ}\text{C}$, 比第一次高 1°C ; 50m 和 100m 层与第一次观测相同。这似乎表明插入的冷水块在向东移动的过程中, 表层水与黑潮暖水的混合是强烈的, 冷水块前锋此时已移到 129°E 附近。若按冷中心前锋从 F_{304} 附近(4 月 16 日 17:20 时观测)向东推进到 F_{404} 站(19 日 02:35 时观测)约 57h 内移动 33 n mile, 那么它的移动速度为 30 cm/s , 结果与从卫星图片得到的估计值一致。

(二) 锋面涡在垂直剖面上的特征

这里我们首先选择最有代表性的 F_3 断面来分析, 因为此断面自北向南横切锋面涡的暖水舌和冷中心区。但该断面未及黑潮区, 为此在绘制 F_3 断面图时加上了可表征黑潮水文特性的附近站 F_{305} 。虽然该观测时间比 F_{305} 站第一次早 62h, 第二次晚 45h, 但比较

两次观测结果来看,各海洋要素无明显变化,是较稳定的,所以笔者借用它来加长 F_3 断面。纵观图 5 各要素的分布状况可以知道 F_{304} 站是冷中心,此处温度、盐度溶解氧和硝酸盐等值线显著上拱。但是 0~40m 层略有差别,冷中心南移到 F_{305} 站,中心水温比暖舌区 (F_{302} 站) 低 2~3 °C,溶解氧与 40m 以下的水层趋势相反,为高值区,比暖舌区高 0.4 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ 。这些特征表明,由于暖舌回卷,海水形成气旋式运动,但又不完全封闭,结果造成两种效应:(1)上层低温、低盐、高溶解氧的陆架混合水被卷入冷中心区;(2)下层海水被抽吸上升,而当上升海水到达跃层附近后,向周围辐散,致使冷中心边缘区 (F_{303} 和 F_{305} 站) 的跃层处出现盐度逆转层,亦即低盐水向高盐水域插入,从而促进暖丝水混合变性。上述这两种过程对锋面涡区的初级生产力(叶绿素 a) 产生重大的影响。图 5 中的 chl- a 分布表明在冷中心的 F_{304} 站出现极小值,而在冷中心区的边缘 (F_{303} 和 F_{305} 站) 却出现最大值。chl- a 的这种特殊分布与锋面涡的海水运动是相符的。也就是说,由于锋面涡气旋式运动,使上层海水中的 chl- a 向周围辐散之后集聚在冷中心区边缘一锋面带,形成高生产力区。

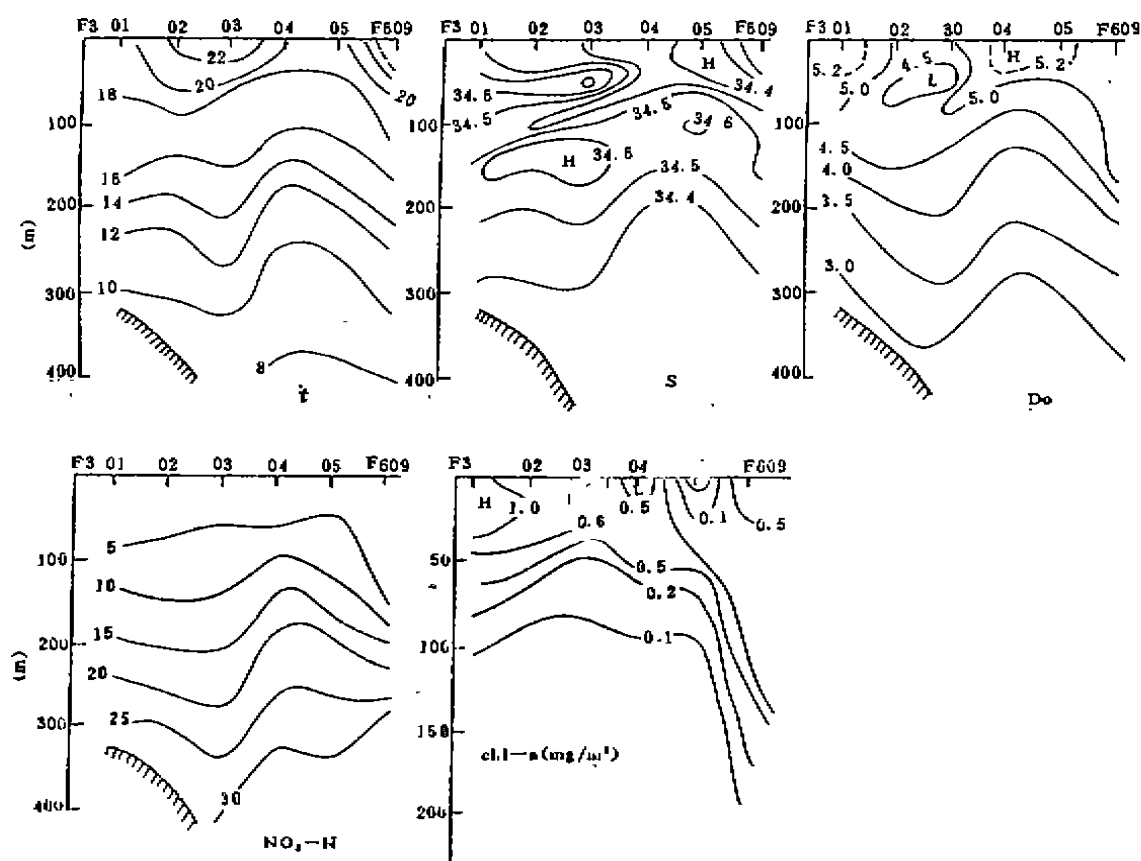


图 5 F_3 断面的温度、盐度、溶解氧、硝酸盐和叶绿素 a 的分布
(1989 年 4 月 16 日)

图 6a 和图 6b 分别为 F_4 断面的两次观测结果。第一次观测(4 月 15 日),从黑潮逐出

的暖丝前头,刚到达该断面。第二次观测(4月19日)暖丝头部已通过F₄断面。比较两次观测结果可以发现。两者有明显差异。19日F₄断面与F₃断面的基本状态相似。在F₄₀₄站上温度、盐度、溶解氧、硝酸盐等值线均向上拱起,而15日的F₄断面,除盐度外,这种上拱的趋势甚弱。这一事实表明,当锋面涡通过时,动力场发生明显的改变,相应地引起海洋环境场的激烈调整。比较两次观测的硝酸盐等值线,10 μmol/dm³线第二次比第一次上升了50~60m,5 μmol/dm³线可以从90m层上升到40m深度的真光层。

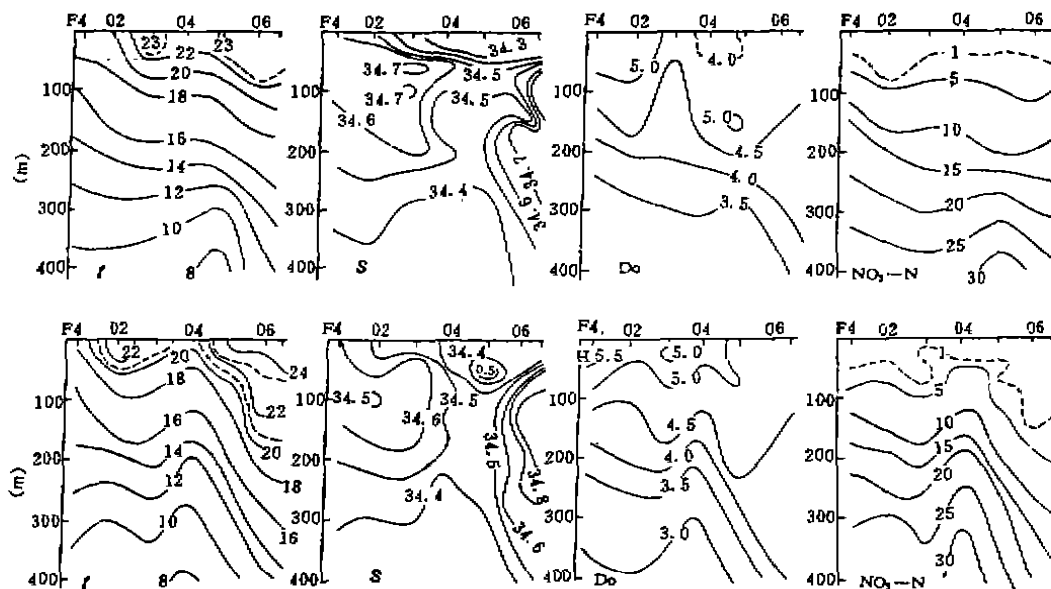


图6 F₄断面的温度、盐度、溶解氧、硝酸盐的分布

a为1989年4月15日;b为1989年4月19日

(三)暖丝流及其演变

在这里各断面的地转流速度按 Csanada(1979)的方法计算^[9]即
动力高度

$$\zeta = \zeta_e + \zeta_s$$

$$\zeta_e = - \int_H^0 \epsilon dz \quad \zeta_s = - \int_H^{H_m} \epsilon_s dH$$

式中 $\epsilon = \rho(x, z) - \rho_0$, ϵ_s 为海底处之值, H_m 取该计算断面的最大深度值。

首先我们分析F₃和F₄断面的地转流结构(图7);在F₃断面上的F₃₀₅~F₃₀₈站是部分黑潮通过之处,但F₃₀₅~F₃₀₈站存在一支较强的西向逆流,表层流速达53 cm/s,350m层的速度也达到10 cm/s。根据分析可以判定这支逆流就是从黑潮逐出的暖丝流,其流量为 $4.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ (0~400m)和 $3.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ (0~200m),约为黑潮流量的15%,与对马暖流的流量相当。通过F₃₀₁~F₃₀₂站约为16 cm/s的东向流,这表明部分暖丝流向东回转。再比较F₄断面两个不同时刻的地转流,两者存在明显的差异。4月15日情况是:黑潮流轴在F₄₀₇站以南,西向逆流小于10 cm/s。但从图8我们看到,此时这里的暖丝流主要表现

于北向流。4月19日的情况明显不同,黑潮流轴移到 $F_{405} \sim F_{406}$ 站之间,流速达 98 cm/s 。 $F_{403} \sim F_{404}$ 站之间出现强西向逆流,其速度 40 cm/s ,大于 10 cm/s 的速度层达 250 m 深。 $F_{401} \sim F_{402}$ 站的东向流,15日表层为 32 cm/s ,大于 10 cm/s 的水层为 $0 \sim 180 \text{ m}$ 。19日的表层流速为 45 cm/s 。但大于 10 cm/s 流速仅限于 $0 \sim 120 \text{ m}$ 层。

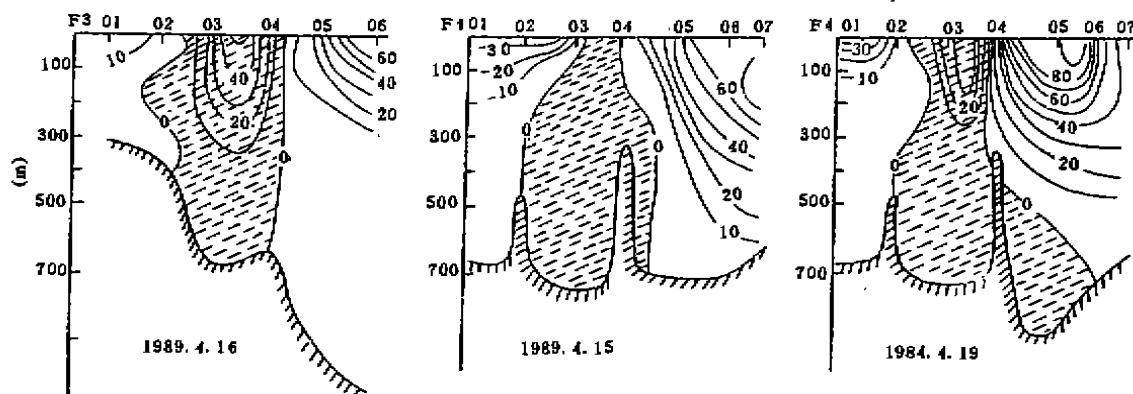


图 7 F_3 和 F_4 断面的地转流

图 8 是根据第一次观测资料所计算的地转流。黑潮流最大为 149 cm/s ,出现在 $F_{708} \sim F_{709}$ 站,黑潮主轴在 30°N 以南转向东

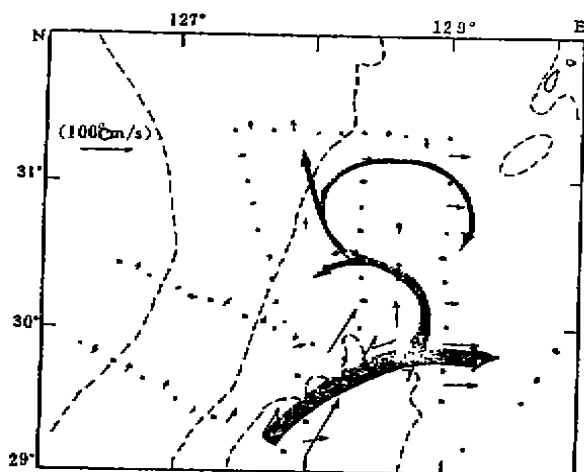


图 8 表层地转流(1989年4月10日)

图中粗线表示黑潮及其暖丝

流。根据地转流大小,我们粗略地勾划出黑潮暖丝的运动趋势。黑潮暖丝大致在 30°N , $128^\circ 30' \sim 129^\circ \text{E}$ 从黑潮主流逐出,首先向北,流速 50 cm/s ,然后在 $30^\circ 30' \text{N}$ 附近转向西流,速度为 54 cm/s 。尔后暖丝出现往西南回卷的小羽,但其主要部分转向北流,到达 31°N 附近,它的一部分继续北上,速度为 17 cm/s ,另一部分以 16 cm/s 的速度转向东流,当它到达 F_4 断面时,可能加入南向的九州沿岸水使之流速增至 32 cm/s 。这一部分顺时针旋转形成暖环,其水平尺度约 120 km 。暖丝的这样演变过程在大量的卫星图片中常可看到。

现在我们回头再分析上节给出的两幅卫星图片。4月10日的图象表明暖丝约在 $127^\circ 30' \text{E}$ 附近,水深 $100 \sim 150 \text{ m}$ 的范围内沿等线北上。然而在4月16日的图象中,暖丝除一部分仍然北上外,另一部分却做顺时针旋转,从而形成暖环,本人(1990)在研究一类暖环的形成过程一文中已给出暖丝急流在强非线性力的作用下可形成顺时针旋转的暖环的理论解析。据前面分析已知道,黑潮暖丝厚度一般不超过 400 m ,而这里海槽深度大于 600 m ,如果暖丝流在未冲至陆架坡时就完成回转,则海底地形将不可能对暖丝运

动施加影响,但如果暖丝冲至陆架,那么它将在海底地形的约束下沿等深线运动。因此,九州西侧海域黑潮暖丝的演变除了与暖丝本身的动力状态有关外,还与这里的特殊海底地形密切相关。前面的分析已知道,锋面涡随黑潮向东移动,而暖丝逆黑潮西行,因此,当锋面涡位于陆架斜坡附近时,暖丝流容易达到陆架上,在地形约束下转向北流。随着锋面涡东移,暖丝在未到达陆架前就完成顺时针旋转,形成暖环。当锋面涡移至九州西南近海,则又受这里的地形约束,顺九州沿岸北上。

几年来,我们搜集了大量的卫星遥感图片,证明九州西南海域是黑潮锋面涡十分发达的区域。锋面涡的形状有明显的差异。1989年4月17日出现的锋面涡呈长方形。作为另一个例子,我们再给出1988年6月4日的卫星红外图片和1988年5月24日~6月5日的船舶调查结果(图9)。图中显示的锋面涡更为典型美观。黑潮暖丝螺旋式地反时针回转,随后沿陆架斜坡北上。

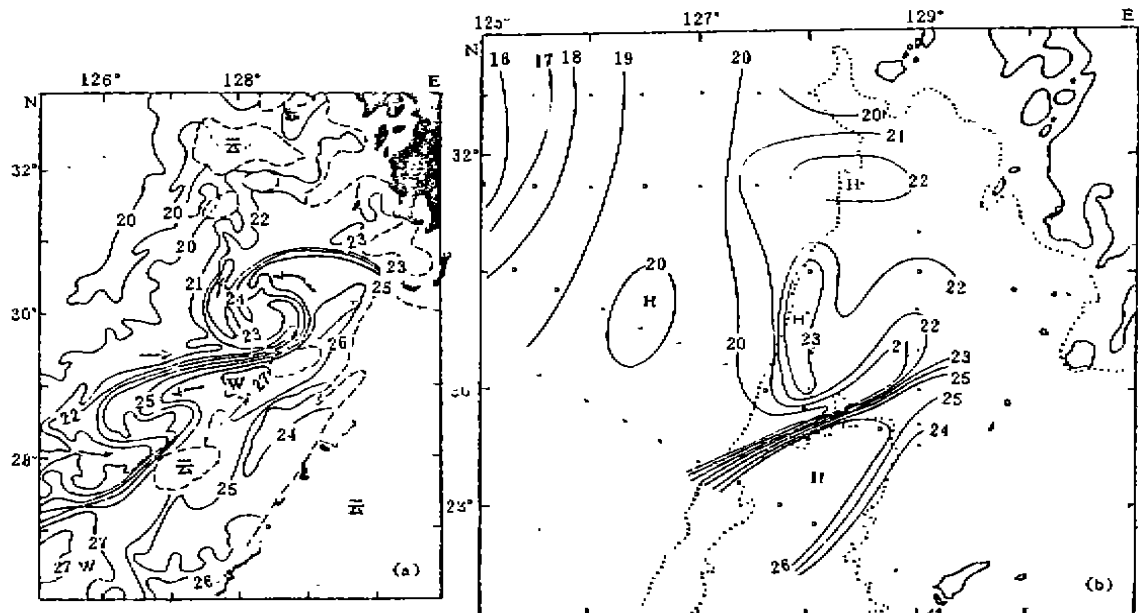


图9 典型锋面涡

a 为1988年6月4日的卫星红外影像;b 为根据1988年5月24日~6月5日船舶调查资料绘制表层温度图

四、小结

1. 大量的卫星影像和近期的海洋调查已表明,九州西南海域黑潮锋面涡在春季和初夏十分发达,它是这一区域的最重要动力现象之一。锋面涡的水平尺度几百公里长,它约以30 cm/s的相速随黑潮东移。由于锋面涡舌的倒卷,在锋面涡的冷中心区将伴随着陆架混合水插入,以及下层高营养盐水被抽吸到真光层,有利于浮游生物的生长。倒卷的锋面涡舌由表层的西向慢慢地转为100m层的西北向。

2. 锋面涡冷中心区边缘的锋面带,盐度垂直变化往往在跃层处发生倒逆现象,亦即

低盐水在跃层处插入,从而加速暖丝水的混合变性。这一锋面带也是高生产力区。

3. 黑潮暖丝逆黑潮主流西行,计算得到地转流速约 50 cm/s,大于 10 cm/s 的流速达到 350m 层深度。流量约 $4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$,约为黑潮流量的 15%。由于这里处于冲绳海槽的北部,海槽地形使暖丝的演变变得复杂。暖丝可能沿陆架斜坡北上成为对马暖流的直接水源;也可能沿九州沿岸北上;也可能转变为顺时针回转而成为暖环。这三种情况可能其中二种同时出现在九州西侧海域。尽管暖环不一定直接北移,但它造成该区暖水堆积形成高水位,这可能引起一支与之地转适应的北向流。因此,可以认为黑潮暖丝流是对马暖流直接或间接的主要驱动机制。

关于黑潮锋面涡旋的调查研究,我们的工作仅仅是一个开端。由于锋面涡旋是一个种中度过程,它随时在移动变化,然而利用船泊进行海深调查无法做到同步。因此利用现场观测资料绘制的图,难免与卫星图象有一定的差别,不能完全准确地反映海洋实际。不过本文分析结果还是可以反映黑潮涡旋的基本特性的。笔者期望今后能进一步做更精细的调查。

参 考 文 献

- [1] 郑全安、袁业立,切变波动力学研究,海洋学报,10(6)1988,659~665.
- [2] 郭炳火,一类中尺度暖环的形成过程,黑潮调查研究论文选(四),海洋出版社,1992.
- [3] 柴田彰,东シナ海大陆棚外縁に沿う黒潮蛇形,海と空,9,1981,113~120.
- [4] 山形俊男,葡地政文,九州西南海域の時計回りの暖水渦の起源について,海洋,21(11)1989,669~675.
- [5] Huk, O. K., Spring season flow of the Tsushima Currents and its separation from the Kuroshio, satellite evidence, *J. Geophys. Res.*, 87, 1982, 9687~9693.
- [6] Muneyama, K., et al., An application of NOAA AVHRR for oceanography in the East China Sea, *Elsevier Oceanography Series*, 39, 1984, 375~385.
- [7] Sugimoto, T., S. Kimura and K. Miyaji, Meander of the Kuroshio front and current variability in the East China Sea, *Journal of Oceanographic Society of Japan*, 44, 1983, 125~135.
- [8] Guo Binghuo et al., Kuroshio warm filament and the source of the warm water of the Tsushima Current, *Acta Oceanologica Sinica* 18(3)1991, 325~340.
- [9] Csanady, G. T., The pressure field along the western margin of the North Atlantic, *Journal of Geophysical Research*, 84(c8)1978, 4905~4915.

Kuroshio Frontal Eddy, Warm Filament and Warm Ring in the East China Sea

Guo Binghuo

(*First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao*)

Abstract

Characteristics of the Kuroshio frontal eddy, warm filament and warm ring are analysed according to the oceanic investigation data obtained in the northeast East China Sea during 10 to 21 April, 1989 and the satellite infrared images on 10 and 16 April, 1989. The results show that the frontal eddy occurring in the area moves at a phase speed of about 30cm/s with the Kuroshio mainstream. The intruding of the shelf mixing water and the upwelling high nutrient water of the low layer in the cold core region of the frontal eddy result in a high productivity area. The warm filament moves westward opposite to the Kuroshio at a speed of 50 cm/s and then it moves probably northward along the continental slope or rotate clockwise to form a warm ring.

Key words: East China Kuroshio frontal eddy warm filament