

台湾与菲律宾以东海域冬季 的环流结构及其变异*

管秉贤

(中国科学院海洋研究所, 青岛)

提要 本文主要根据 CSK 水文资料及图册, 比较详细地探讨了台湾和菲律宾以东海域 1965~1968 年冬季的海流结构及其变异。指出副热带流涡的西端部分在 1965~1966 及 1967 年冬季其基本结构只含二脊一槽, 而与吉田及城所(1967)的模式更为相似。本文还引用信风场应力资料, 得出了本海域主要平均纬向海流的带状结构与海面上风应力的作用相一致的结果。这是海—气相互作用的一个好例。

台湾和菲律宾以东海域的海洋学调查研究, 最近愈来愈受到人们的重视, 这主要由于下列两个流系结构及其变异会对气候变异产生显著的影响所致: (1) 纬向的赤道流系(特别是北赤道逆流及赤道潜流)对 El Niño 发展过程的作用和影响, 西太平洋赤道区域已被公认为是引发 El Niño 的关键性区域; (2) 经向的黑潮流系对热量自较低纬区向中纬区的传输作用, 等等。当然, 本海域流系结构本身也具有一些吸引人的新特征值得研究。其中之一是 20 年前日本学者^[12,16]发现了东向副热带逆流的存在, 从而引起人们不仅对副热带逆流本身机制的热烈探索, 也深化了对副热带环流结构的认识。从这个意义上说, 这一发现给经典的世界大洋环流理论提出了一个新课题: 环流经典模式是否完善无缺?

黑潮及其邻域的合作调查 (CSK, 1965~1977) 为研究这一海域的海流结构及其变异提供了迄今为止观测范围最大、测站最密和重复次数最多的宝贵资料。当然, 要深入研究这一课题, 现有资料仍然不足。

CSK 资料已为有关国家的许多海洋学者所广泛引用。但借此来系统地、大范围地探讨西北太平洋, 特别是台湾和菲律宾以东海域的海况和环流的工作, 还为数不多。值得提到的有, 二谷颖男 (Nitani)^[12] 比较全面地探讨了菲律宾和吕宋海峡以东海域 1965 及 1966 年夏季的海况, 重点是黑潮源地区域, 及北赤道流和棉兰老海流等。增泽让太郎 (Masuzawa)^[12] 及其合作者^[10]对 137°E 线断面的海流结构、水团、地转流量等多次作了细致的分析, 还指出了 El Niño 对这一断面上温盐结构和海平面等的影响。

最近, 作者^[1]根据“凌风丸”在赤道区域 137°E 及 155°E 的双机测流资料, 对赤道流系的纬向结构及其变异作了较系统的分析。王宗山等^[1]也应用 137°E 线的海流观测资料分析了热带西太平洋海流(主要是流量)的变化。法国学者引用他们的调查资料研究了西

中国科学院海洋研究所调查研究报告第 1653 号。

* 本文得到国家自然科学基金的资助。本文摘要刊于第 19 届 IUGG 大会(1987 年 8 月, 温哥华)论文摘要汇编。

收稿日期: 1988 年 5 月 23 日。

太平洋赤道流系的变化^[3,4]。苏联学者引用他们的调查资料分析研究了菲律宾海 1980 年夏季和北太平洋西部 1982 年夏季海水水平环流的主要特征^[17,18]。本文主要根据 CSK 的水文资料及图集^[6,7]较系统和详细地分析了台湾和菲律宾以东海域 1965~1969 年冬季的海流结构及其变异；并引用北太平洋信风场资料^[15]探讨了本海域海流带状结构与风场的关系等。

1. 冬季流况基本特征

1965—1966 年冬季是这四个冬季中测站最多的时期,故以此冬作为代表来阐明本海域冬季流况的基本特征。

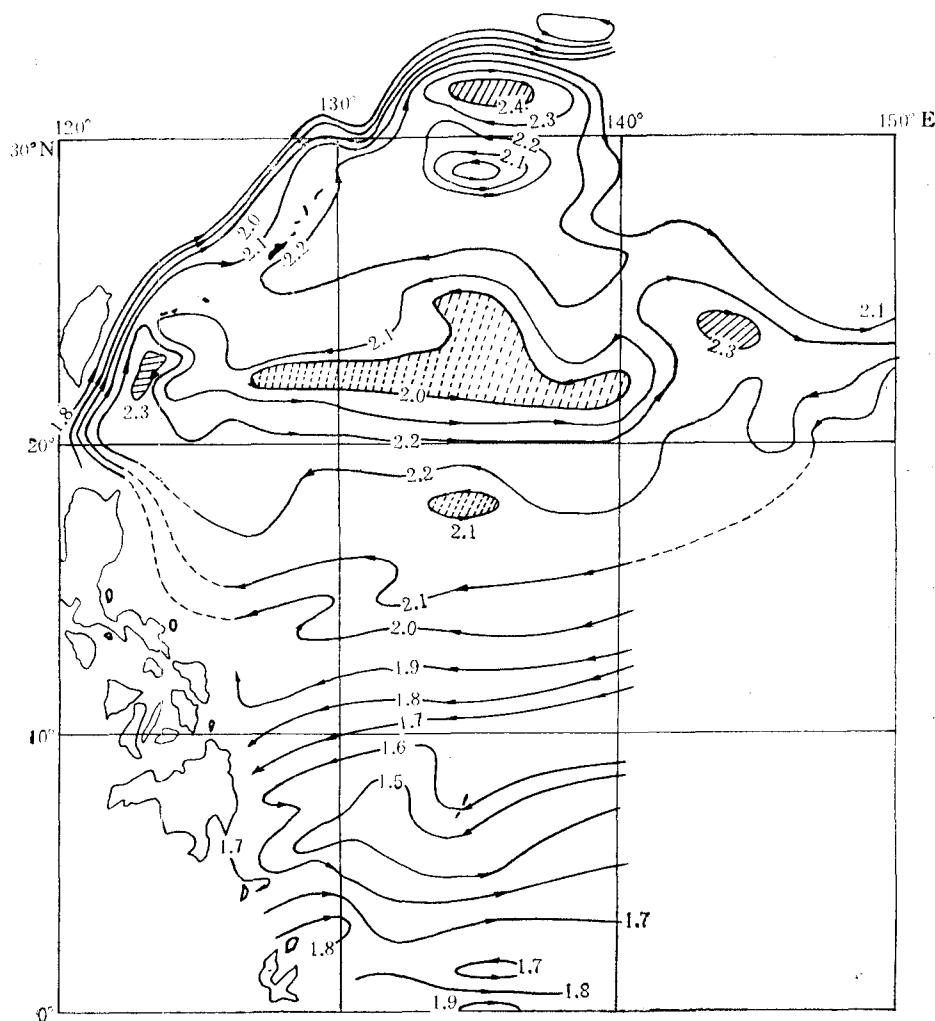


图 1 1965~1966 年冬季海面动力高度 (0/1 000db, dyn. m) 分布图
(根据 CSK Atlas, Vol. 2, 1968)

Fig. 1 Sea surface dynamical height topography (0/1 000db, dyn. m) in winter, 1965~1966 (From CSK Atlas, Vol. 2, 1968)

从 1965~1966 年冬季海面动力高度分布图 (图 1) 上可以看出, 北赤道流约在 11~

12°N 处, 南北分叉。1.9 动力米线由自东而西转向北, 沿萨马岛 (Sharma I.) 东岸北上, 成为北向西边界流的渊源。2.2 动力米线为西向流的北界。它位于源自台湾东岸的暖脊的南坡, 是不同于北赤道流的另一支西向流, 与副热带逆流组成这一暖脊^[8]。但此脊强度不大, 只有台湾以东的暖涡和 140°E 以东的暖涡脊高才达 2.3 动力米。在 18°N, 135°E 附近出现一弱的以 2.1 动力米线封闭的槽。以南为一系列纬向西流, 即北赤道流, 其宽度约为 8 个纬度 (15~7°N), 南界达到帕劳群岛 (Palau Is.) 以南 (2.1~1.5 dyn.m)。如将 2.2 动力米线的西向流亦视为北赤道流, 则其宽度增至 12 个纬度 (19~7°N)。1.8 动力米线在 11°N, 130°E 附近开始由向西转向西南, 延伸为棉兰老海流。1.5~1.7 动力米线在棉兰老岛以东呈反时针旋转, 形成向东流动的北赤道逆流的渊源。在帕劳群岛以南附近出现纬向的气旋型涡旋, 有些年份, 如 1968, 1969 年冬季, 它趋于封闭状。这就是棉兰老涡旋。

在新几内亚北岸流况比较复杂, 在 130~140°E 附近, 赤道偏北处为东向流, 即新几内亚沿岸流; 在 140~150°E 附近, 赤道偏南处为西向流, 即南赤道流; 还出现一些顺时针或反时针旋转的涡旋(图略)。

在巴士海峡及台湾以东, 以密集的 1.8~2.1 动力米线为标帜的黑潮沿台湾东岸进入东海, 出吐噶喇海峡流向日本南岸。在 135°~140°E 附近黑潮离岸(只南达 32°N) 作反时针弯曲, 在伊豆诸岛以西、纪伊半岛以南出现气旋式涡旋, 在 100m 及 200m 层上均有相应的冷水团存在, 但强度不大。

2. 副热带流涡的结构

副热带流涡的西端部分 (WSG) 的海流结构是本海域最显著的特征之一。测站最密的 1965~1966 年冬季海面动力高度 (图 1, 0/1 000db) 分布表明: 在 140°E 以西及 15°N 以北海域, WSG 确实不象传统概念所描述的是单一流涡, 而是分裂为两个或多个次级流涡。但其结构与莲沼和吉田 (Hasunuma and Yoshida)^[8] 所揭示的并非完全相同。两者在天气式的“细”结构上有一些差异, 特别是在副热带流涡的南部。莲沼和吉田 (1978) 根据长期平均资料及 1974 年 2~3 月调查资料所揭示的 WSG 都含有三脊和两槽, 即黑潮脊 (KR)、热带脊 (TR)、北赤道脊 (NER) 和副热带槽 (STT)、热带槽 (TT), 并且三脊在其西端相联结。但 1965~1966 及 1967 年冬季的 WSG 的基本结构只含二脊和一槽, 即黑潮脊, 副热带槽和另一从台湾以东的暖涡先向南后向东延伸出来的脊。此脊在 1965~1966 年冬季位置偏北, 而在 1967 年冬季位置稍偏南。按莲沼和吉田的命名, 前者似以称为“热带脊”为宜, 后者则可称为“北赤道脊”。为方便计, 本文中均称为北赤道脊。副热带槽向西伸展很深, 故黑潮脊及北赤道脊在西边界附近并不互相联结。热带脊及热带槽甚弱, 或竟不明确。这两冬 WSG 的结构, 与其说与莲沼和吉田的模式^[8] 相似, 不如说, 与吉田和城所 (Youshida and Kidokoro)^[46] 的模式 (二脊一槽) 更为相似。所以, WSG 虽分裂为若干次级流涡, 但其天气式“细”结构并非固定或规则, 而随季节和年际而变。1965~1966 年冬季是“二脊一槽”模式发展最典型的时期。

和 1965 年夏季的情况^[11] 相比, 1965~1966 年冬季在台湾以东出现的涡旋个数较少, 强度亦较弱。在 120°~150°E 范围内, 明显的涡旋只有 3 个。即自西向东, 分别为暖涡—冷涡—暖涡。一个大而长的气旋型冷涡(纬向长度约 17 个经度, 经向宽度约 5 个纬度)构

成副热带槽。北赤道脊(纬向长度约 30 个经度)呈一“U”字形,在西、东两端各有一峰.台湾以东暖涡冬季所出现的峰值(>2.3 动力米)较夏季(>2.5 动力米)为弱,峰的尺度亦较小。黑潮脊构成极向次级流涡。值得指出的是在黑潮脊之内却有气旋型涡出现。

冬季,副热带逆流明显地出现在副热带较低纬度区域。它由副热带槽的南坡和北赤道脊的北坡所组成。从这样看,副热带逆流的起源部分只是与黑潮邻接。但如将北赤道脊的西边界看成是黑潮东边界的一部分,则可以看到在 24°N 附近,黑潮东边界的流线开始从其主体分离出来,绕台湾以东的暖涡作反气旋式转动,然后在 124°E 附近大致沿

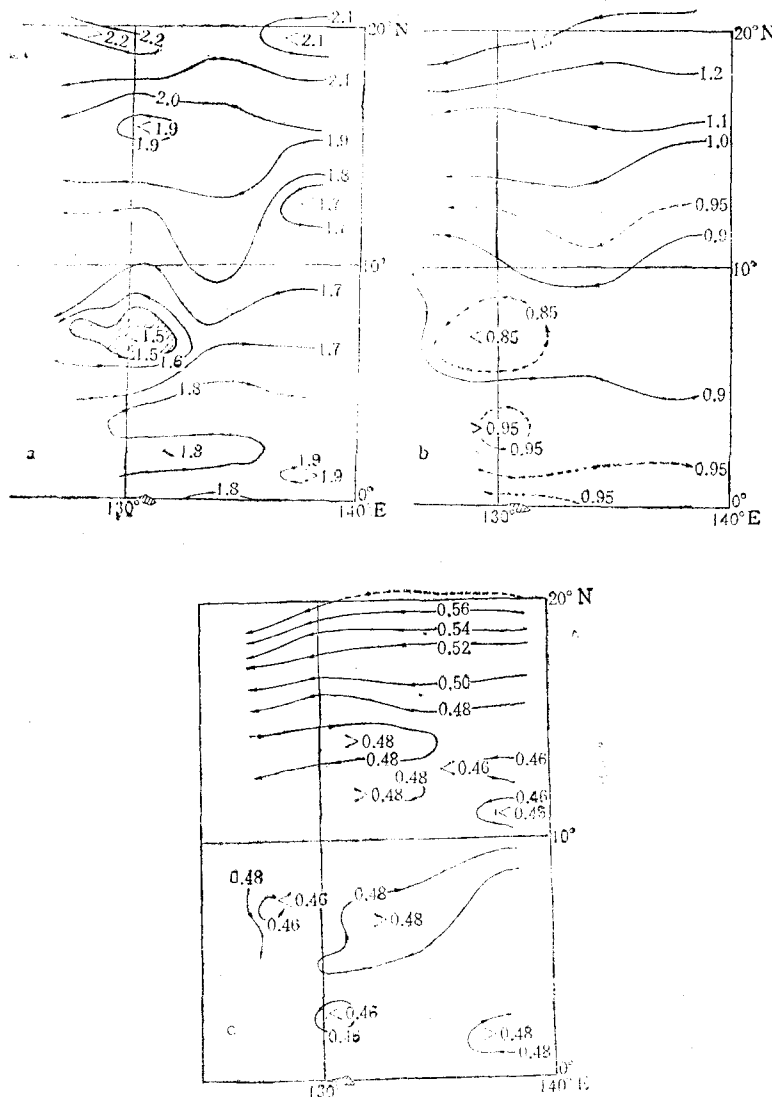


图 2 1968 年 1~3 月海面 (a), 200db(b) 及 500db(c) 面动力高度 (相对于 1 000 分巴面,动力米)分布图

Fig. 2 Dynamical height topographies (referenced to 1 000db surface, dyn. m.) at sea surface (a), 200db surface (b) and 500db(c) surface in Jan.~Mar., 1968

20°N 纬线向东延伸,并与副热带槽南坡的流线平行流动,一起形成副热带逆流。从这样看,副热带逆流部分地是从台湾以东的黑潮东边界分离出来的一个分支。其流径在冬季(1965~1966,1967)较夏季(1965)更为连续。1965~1966 年冬季副热带槽很发展,且位置偏西,故副热带逆流的较强部分出现在 140°E 以西及 20°N 以北海域。而在 1967 年冬季副热带槽的位置偏东,故副热带逆流的较强部分出现在 142°E 以东及 24°N 以北海域。

3. 棉兰老冷涡

在棉兰老岛以东及帕劳群岛以西海域,在这四期冬季都存在着一个气旋型涡旋。它位于北赤道流、棉兰老流和北赤道逆流之间(见图 1)。1965~1966 年冬季这涡向东延伸越过 140°E,形成一条纬向长度在 12 个经度以上,中心动力高度小于 1.5 动力米的带状结构。1967 年冬季,因 130°E 以西无资料,这涡在图上只呈向西开口的半椭圆形,中心 1.5 动力米高度线的范围大大缩小。1968 及 1969 年冬季这涡更趋于封闭,中心呈圆形或菱形。这涡是中心部分具有低温特征的水体,但伸展不深。研究发现,棉兰老冷涡的变化与 El Niño 密切相关。在 El Niño 年期间,冷涡低比容水位的范围向东扩展和(或)冷涡毗邻区域的水位比正常偏低,因而冷涡变得较强,范围亦较大。反之,在非 El Niño 年期间,冷涡低比容水位的范围向西收

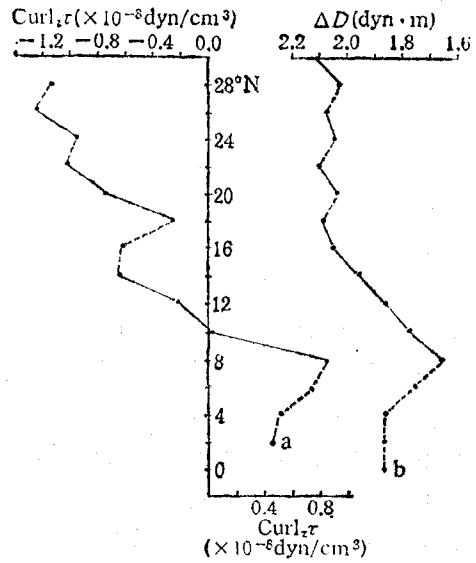


图 3 风应力涡度 (a, $Curl_z r$) 及海面动力高度 (b, ΔD) 的经向分布
Fig. 3 Meridional distributions of wind stress curl (a, $Curl_z r$) and sea surface dynamical height (b, ΔD)

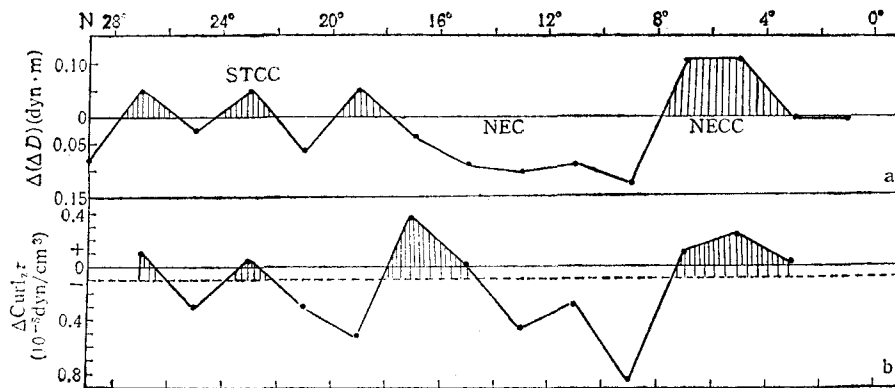


图 4 $\Delta(\Delta D)$ (a) 及 $\Delta Curl_z r$ (b) 的经向分布

Fig. 4 Meridional distributions of $\Delta(\Delta D)$ (a) and $\Delta Curl_z r$ (b)

STCC 为副热带逆流; NEC 为北赤道流; NECC 为北赤道逆流。

缩和(或)冷涡毗邻区域的水位比一般偏高,因而冷涡变得较弱,范围亦较小。详情已在文献[2]中专题讨论。

4. 地转流的带状结构

本海域的主要纬向地转流,边界分明,且呈明显的带状结构。这不仅表层流如此,次表层流及深层流也是这样。这一特征显示在 1968 年冬季(1~3 月)0~20°N 海域的海面、200m 层及 500m 层的动力高度分布图(相对于 1 000 分巴面,见图 2)上。除深层的若干局部区域可能出现流向迥异或相反的微弱海流外(例如,在 500m 层上 5~10N 及 130~140°E 区域内出现很弱的反气旋型流),虽流速随深度减弱,但流场的带状结构保持基本不变。同时,北太平洋西部海流的带状结构具有准稳定性^[13]。

判明这种带状结构是否与其上空的风场作用相一致,是很有意义的。

在吉田和城所^[14]早年试图用 Sverdrup (1947) 理论来解释东向的副热带逆流的成因时,由于当时风应力涡度资料的分辨率太粗(经向为 5 个纬度),未能很好地来阐明宽度只有 1~2 个纬度的带状结构。为了进一步探索东向流带状结构的原因,一定要构作分辨率更高的长期平均的风应力涡度场。

Wyrski 及 Meyers^[15] 的太平洋信风场资料(经向分辨度为 2 个纬度)及日本凌风丸调查船(R/V Ryofu Maru)自 1967 年开始的 137°E 断面定期观测水文资料^[6]为检验这种带状结构与风应力场的关系提供了良好的条件。

137°E 断面的水文测站间距,除靠近日本南岸及新几内亚岛北岸的为半个纬度外,其余在 2~30°N 范围内均为 1 个纬度。Wyrski 及 Meyers^[15] 的太平洋风应力场资料的经向间距为 2 个纬度。为了便于两者相互比较,本文选取了自 0~30°N 每隔 2 个纬度的测站计算了海面动力高度(ΔD , 0/1 000db, dyn. m.)及风应力涡度($\text{Curl}_z \tau$, 10^{-8}dyn/cm^3),如图 3 所示。在此基础上又计算了动力高度和风应力涡度的经向梯度 [$\Delta(\Delta D)$, $\Delta \text{Curl}_z \tau$] 如图 4 所示。 ΔD 是沿 137°E 断面上六个冬季(1967~1972 年 1~2 月)观测的平均值。 $\Delta(\Delta D)$ 由低纬测站的 ΔD 中减去高纬测站的 ΔD 而得,正值表示东向流,负值表示西向流。 $\text{Curl}_z \tau$ 是沿纬圈七个冬季(1966~1972 年 1~2 月)的平均值。 $\Delta \text{Curl}_z \tau$ 由高纬平均值中减去低纬平均值而得。由于前期的风可能也有影响,所以风应力涡度资料自 1966 年取起。又由于风应力资料限于 1950~1972 年期间,故动力高度资料相应地只取到 1972 年。图 3 两条曲线比较表明,风应力涡度和海面动力高度两者的经向分布几乎相互平行。即当风应力涡度向北增加时,相应地,动力高度向北减少。这是东向流的情况。反之,则是西向流的情况。由图 4 可知,两相邻测站动力高度差值与风应力涡度差值的关系也十分密切。自赤道向北相继出现:(1)东向的北赤道逆流(3~8°N),与 $\text{Curl}_z \tau$ 的正梯度带(3~7.5°N)相对应;(2)西向的赤道流(8~18°N),与 $\text{Curl}_z \tau$ 的负梯度带(7.5~15°N)相对应;(3)三支宽度为两个纬度的东向流(中心分别位于 19°N, 23°N 及 27°N 附近),与 $\text{Curl}_z \tau$ 的三个正梯度带(中心分别位于 17°N, 23°N 及 27°N)相对应。这三支东向流组成副热带逆流。在两支相邻东向流之间,有一西向流区,它与 $\text{Curl}_z \tau$ 的负梯度带相对应。除了 19°N 附近的东向流与以 17°N 为中心的风应力涡度正梯度带位置略有偏移外,两者的关系确实十分紧密。

东向副热带逆流的带状结构是北太平洋西部环流结构中最引人注目的现象之一。莲

沼和吉田^[8]根据长期平均资料得出的海面动力高度图指出, 在 $130\sim 160^{\circ}\text{E}$ 区域内, 副热带逆流是由三个东向流组成, 其中心分别位于 19°N , 23°N 及 27°N 附近。White 及 Walker^[14] 最近利用分辨率更好的 (0.5° 纬距) 资料分析结果表明, 副热带逆流至少由三个半永久性的东向地转流所组成, 其中心分别位于 20°N , 24°N 及 26°N 附近。本文所得出的 1967~1972 年 137°E 断面上的副热带逆流的分布是与上述两项结果颇为一致的。

更值得指出的是, 本文所得上述结果也为判明迄今仍在争论中的副热带逆流的成因问题, 提供了有力的佐证。东向副热带逆流的存在及其带状结构(分辨度为两个纬度)与风应力涡度的经向梯度(分辨度为两个纬度)颇为一致, 这一事实明确地表明, 反气旋涡度沿经向分布上的“槽”结构是副热带逆流的一个重要驱动力, 至少也是重要动力之一。

本文所得出的台湾及菲律宾以东海域冬季的海流结构充分表明, 本海域主要平均纬向海流的带状结构是与海面上风应力场的作用相一致的。这项定性结果是海-气相互作用的一个好例。

参 考 文 献

- [1] 王宗山、邹娥梅, 1987. 热带西太平洋海流的变化。黄渤海海洋 5(4): 15—20。
- [2] 管秉贤, 1989. 棉兰老冷涡的变异及其与 El Niño 的关系。海洋与湖沼 20(2): 131—138。
- [3] Donguy, J. R. and C. Henin, 1983. Fluctuations of the equatorial current system connected with the hydroclimatic conditions in the western Pacific. *Océanogr. trop.* 18(1): 17—24.
- [4] Donguy, J. R., G. Eldin and A. Morlière et al., 1984. A thermal interpretation of a change in equatorial western Pacific circulation. *Trop. Ocean-Atmos. Newslett.* 24: 9—11.
- [5] Guan Bingxian, 1986. Current structure and its variation in the equatorial area of the western North Pacific Ocean. *Chin J. Oceanol. Limnol.* 4(3): 239—255.
- [6] Japan Meteorological Agency, 1968—1973. The Results of Marine Meteorological and Oceanographic Observations. No. 41—51.
- [7] Japanese Oceanographic Data Center, 1967—1977. CSK Atlas. Vol. 1—7.
- [8] Hasunuma, K. and K. Yoshida, 1978. Splitting of the Subtropical Gyre in the western North Pacific. *Jour. Oceanogr. Soc. Japan.* 34(4): 160—172.
- [9] Masuzawa, J., 1967. An oceanographic section from Japan to New Guinea at 137°E in January 1967. *Oceanogr. Mag.* 19: 95—118.
- [10] Masuzawa, J. and K. Nagasaka, 1975. The 137°E oceanographic section. *Jour. Mar. Res., Supp.* 33: 109—116.
- [11] Nitani, H., 1970. Oceanographic conditions in the sea east of the Philippines and Luzon Strait in summers of 1965 and 1966. In *The Kuroshio-A Symposium on the Japan Current*, Edited by John C. Marr. East-West Center Press. Honolulu, pp. 213—232.
- [12] Uda, M. and K. Hasunuma, 1969. The eastward Subtropical Countercurrent in the western North Pacific Ocean. *Jour. Oceanogr. Soc. Japan* 25(4): 201—210.
- [13] White, W. B. and K. Hasunuma, 1982. Quasi-stationary banded structure in the mean zonal geostrophic current regimes of the western North Pacific. *Jour. Mar. Res.* 40(4): 1035—1046.
- [14] White, W. B. and A. E. Walker, 1985. The influence of the Hawaiian Archipelago upon the wind-driven Subtropical Gyre in the western North Pacific. *J. Geophys. Res.* 90(C4): 7061—7074.
- [15] Wyrski, K. and G. Meyers, 1975. The trade wind field over the Pacific Ocean, Part II, Bimonthly fields of wind stress: 1950—1972. Rep. HIG-75-2. Hawaii Inst. Geophys. University of Hawaii, 16pp.
- [16] Yoshida, K. and T. Kidokoro, 1967. A Subtropical Countercurrent (II)—A prediction of eastward flows at lower subtropical latitudes. *Jour. Oceanogr. Soc. Japan* 23(5): 231—246.
- [17] Ластовецкий, Е. И. и А. Д. Нелезин, 1984. Особенности горизонтальной циркуляции вод север-западной части Тихого Осеана летом 1982г. Результаты Экспедиций КЗТИ-82, стр. 233—248.
- [18] Яричин, В. Г. и Е. И. Ластовецкий, 1981. Основные черты горизонтальной циркуляции вод

в Филиппинском море летом 1980г. Результаты Экспедиции КИСЗ-80, Часть 1~2, стр. 65~76.

CURRENT STRUCTURE AND ITS VARIABILITY IN THE AREA EAST OF TAIWAN AND PHILIPPINES IN WINTER

Guan Bingxian

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao*)

ABSTRACT

In this paper, based on CSK hydrographic data and atlas (JODC, 1967~1977) the current structure and its variations in the area east of Taiwan and Philippines in winters of 1965~1969 are systematically analyzed in some detail.

In the area west of 140°E and north of 15°N the Western Subtropical Gyre (WSG) in indeed not a single one as traditionally described, it splits into two or more subgyres. But its structure is not totally alike as that shown by Hasunuma and Yoshida (1978). The Subtropical Gyre shown by them reveals three major ridges and two troughs, and the three ridges come in contact at their western end. But the basic structure of WSG in winters of 1965~1966 and 1967 reveals only two major ridges and one trough, and the two ridges are not joined together near the western boundary. Therefore, though WSG splits into subgyres, its synoptic "fine" structure is not fixed or regular, but changes seasonally and yearly. The winter of 1965~1966 is the period during which the model of two ridges and one trough well developed.

The Subtropical Countercurrent (STCC) is evidently displayed at lower subtropical latitudes in winter. Its path is more continuous in winters (1965~1966, 1967) than in summer (1965). It is evident from the pattern of stream-lines that STCC seems to be a branch separated from eastern boundary of the Kuroshio east of Taiwan.

In the area east of Mindanao Island and west of Palau Islands, a cyclonic eddy existed among the North Equatorial Current (NEC), Mindanao Current and North Equatorial Countercurrent (NECC) throughout the period. The variation of the Mindanao Cyclonic Eddy is closely related with the El Niño event, which has been discussed in a separate paper.

The major zonal geostrophic currents of this area are well defined in their boundaries and display a pronounced banded structure of quasi-stationary nature. The relation of the current banded structure with the overlying wind fields is analyzed by using the trade wind stress data (Wyrтки and Meyers, 1975). Results show that, qualitatively speaking, banded structure of the major mean zonal currents along 137°E from Equator to 28°N (including NECC, NEC and STCC) is closely related to the meridional distribution of the zonally averaged wind stress curl. This is a good example of air-sea connection.