

# 일본 동북 연안 쿠로시오 속류 Warm Water Break의 발견

## Evidence of Outbreak in 2000m of Water Mass in the Kuroshio Extension

양찬수

Chansu Yang

<sup>1</sup>선임연구원, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소, yangcs@kriso.re.kr

### 요약

쿠로시오는 일본열도 동안(東岸)을 북상하면서, 조오반 앞바다에서 동쪽으로 이동하게 된다. 이 해역에서 오야시오에 기인한 냉수괴의 배치에 따라 쿠로시오의 북상범위 및 유로(여기서는 구불구불한 흐름의 형상)가 크게 바뀌게 된다. 본 연구에서는 쿠로시오 속류가 진행방향과 반대되는 방향으로 짧은 주기를 갖고 발생한 'warm water break' 을 발견하였다. 10일 이하의 주기를 갖는 것으로 추정되는 이 event을 상세히 이해하기 위하여 다음의 자료를 사용하였다. 1) SeaWiFS chlorophyll-a 영상, 2) AVHRR-SST 영상, 3) Topex/Poseidon과 ERS-2의 해면고도정보, 4) 관측데이터: ADCP와 수온과 염분의 연직 분포. 이 연구결과를 통해, 쿠로시오의 이벤트 'warm water break'을 확인하였으며, 이 현상은 10일 이하의 짧은 주기를 갖고 수심 2000m정도까지 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

### 1. 연구배경 및 목적

쿠로시오·오야시오 해류 경계역(그림-1)은 해양 물리 및 생물, 화학의 각방면에서 중요한 해역이기 때문에, 많은 연구가 이루어져 왔다<sup>1),2)</sup>. 또한, 연안의 수온 환경과 외해의 해황과의 관련성에 대해서도 고찰되어 왔다. 그러나, 종래의 관측 수법으로 얻을 수 있는 해양 내부의 데이터의 시간 및 공간 분포는 이 해역의 해양 현상을 파악하기 위해서는 불충분하다.

이 해역의 해황 파악에 기여하기 위해, 2000년도부터 시작된 일본 Argo 프로젝

트의 일환으로서 자동 프로파일링 플로트<sup>3)</sup> (그림-2와 3)에 의한 해양 표층·중층 관측을 하고 있다. 본연구에서는, TOPEX/POSEIDON·ERS-2 위성 데이터를 이용하고, 2001년 2월 15일부터 16일에 걸쳐 쿠로시오속류역에 투입된 8개의 플로트의 표면과 심도 2000 m에 있어서의 궤적에 대하여 해석을 실시했다.

### 2. ARGO Project

현재 지구전체의 해양변동을 실시간으로 관측하기 위한 전례가 없는 대규모 프로

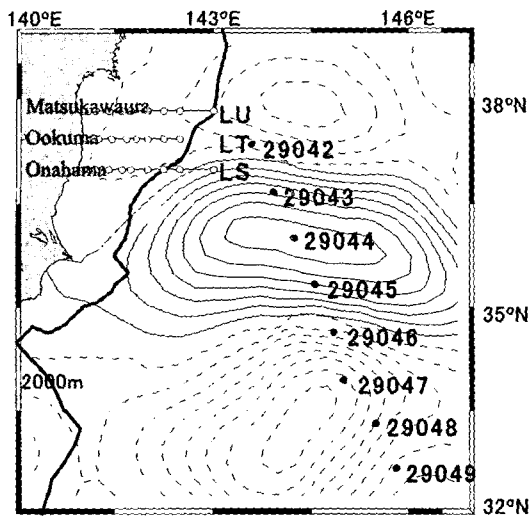


그림 1. 대상 해역에서의 해양 관측 위치 (LU, LT, LS), 연안 수온 관측 지점(오나하마, 오쿠마, 마쓰카와우라) 및 플로트 투입점(29024에서 29049). 2000 m의 등심선(굵은 실선)과 sea surface height anomaly 데이터에 의한 등치선(정은 실선, 부는 점선, 간격은 0.12m).

젝트가 주목받고 있다. 이 계획은 "아르고 프로젝트(Argo Project)"라고 불리는 것으로 2000 년에 시작된 국제프로젝트이다(Roemmich & Owens[2000], Guinehut et al.[2002]). 이 『Argo 프로젝트』는 전 세계 해양에 자동 프로파일링 플로트(autonomous profiling float) 약 3,000 개를 투입(약 300km 평균 간격-위·경도로 약 3 도마다 1 대)해서 수심 2,000m 부터 해면까지의 수온·염분을 약 10 일 마다 관측하며 해면에서의 유속을 얻을 수도 있는 준 실시간 해양관측 시스템이다.

이 프로젝트에는 미국, 일본, EU, 캐나다, 영국, 독일, 한국, 오스트레일리아, 프랑스, 중국, 인도, 스페인, 덴마크, 뉴질랜드,

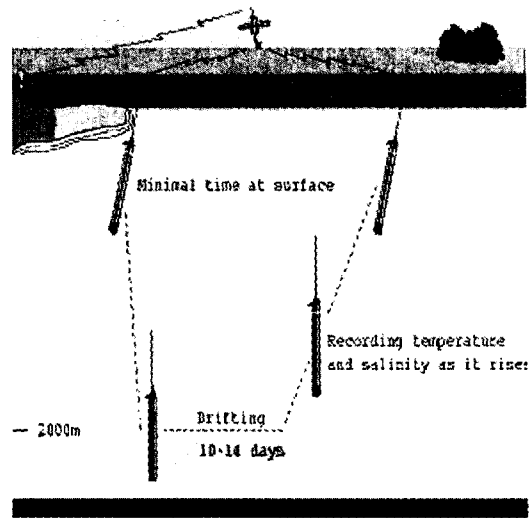


그림 2. 아르고 플로트의 관측 시스템.

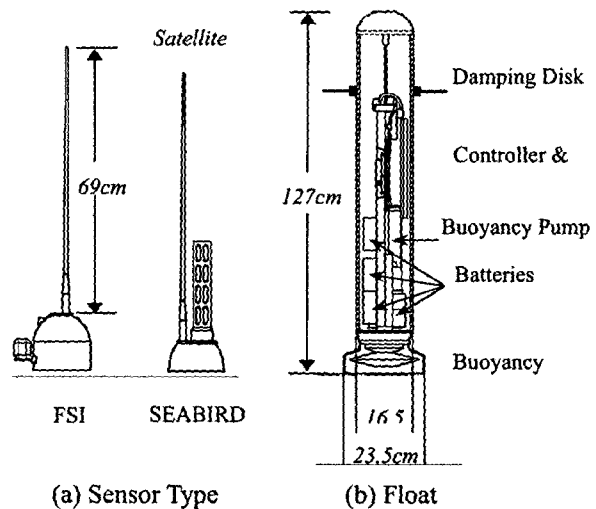


그림 3. 아르고 플로트(APEX 타입)의 단면도 ((a)를(b)의 상단에 접합).

드, 노르웨이, 러시아 연방, 아일랜드, 모리셔스(이상, Argo 플로트의 투입수의 순서에 따라) 등 18개국이 적극적으로 참여하고 있으며, 2006년까지 연간 700-800대의 플로트를 투입할 계획이다. 프로젝트의 시작단계에서는 목표달성을 2005년으로 하였으나, 2006년으로 수정된 상황이다. 일본에서는 새로운 천년 프로젝트(Millennium Project)의 하나로서 시작되었고, 『고도해양감시시스템(아르고계획)의

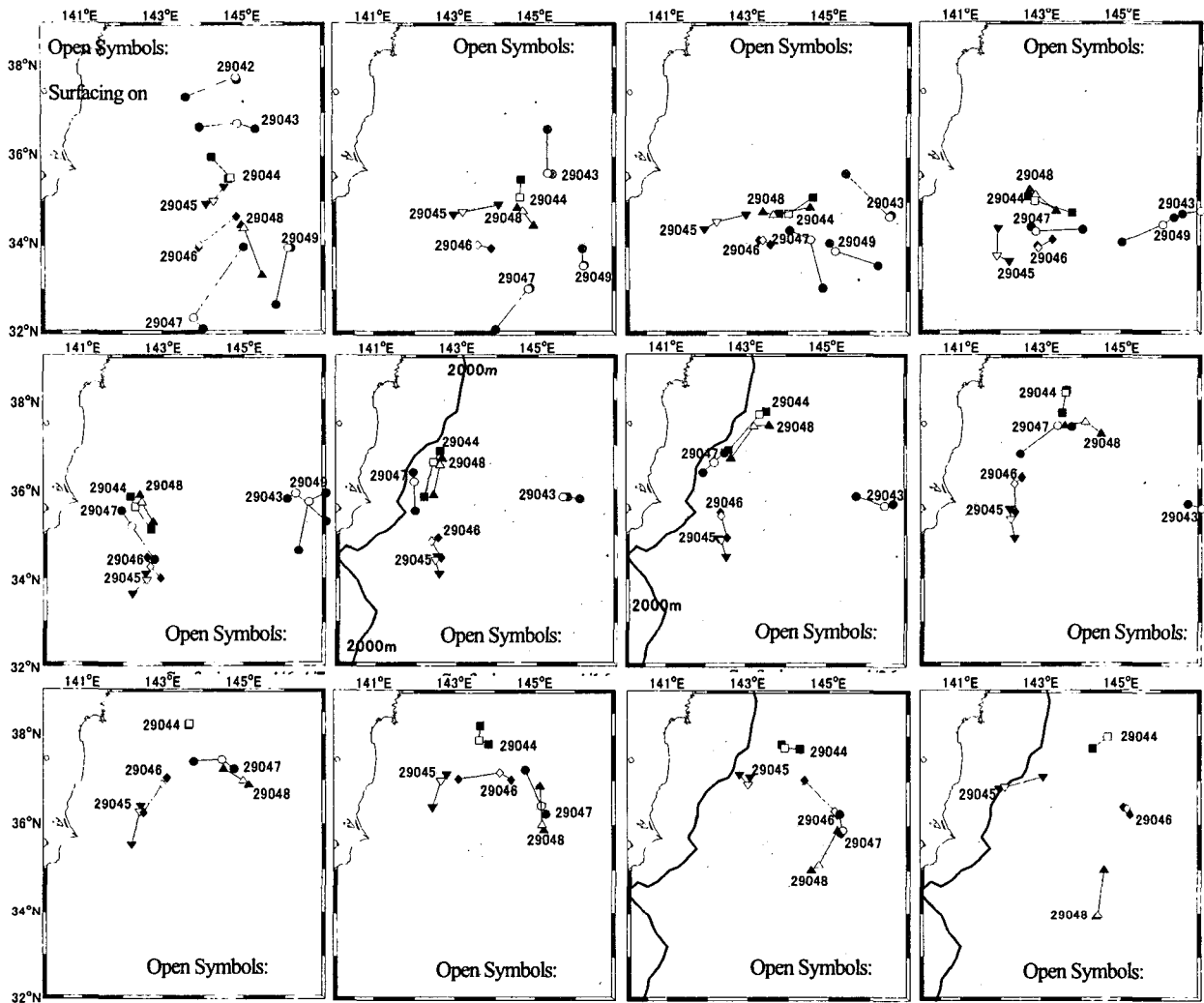


그림 4. 해면고도(0.2m간격)과 플로트의 궤적 비교.

구축』이라는 방법으로 국제Argo프로젝트에 참여하고 있다. 우리나라에서는 2001년부터 플로트 투입을 시작하였으며, 현재 26개의 플로트가 가동 중에 있다.

일반적으로, Argo 플로트는, 바다에 투입되면 체재심도(통상 2,000m)까지 가라앉고, 일정기간 그 깊이에서 표류하다가 약 10일 후에 해면으로 부상한다. 그 사이에 해양표층, 중층의 수온, 염분, 압력을 관측하고, 부상 후에는 ARGOS시스템(위성에 의한 데이터 전달 서비스)에 의해 관

측데이터와 Argo 플로트의 위치를 전송하고 다시 체재심도까지 가라앉는다. 이와 같은 표류 주기를 4-5년간 지속한다. 이 기간은 플로트의 배터리수명에 상당한다. 그리고, APEX가 PROVOR와 다른 점은 구조적인 차이에 기인한 체재심도의 차이이다. 그림 3은 APEX타입의 구조를 나타낸 것이다.

### 3. 해면 고도 데이터와 플로트의 궤적의 비교

### 3.1 사용데이터 및 조건

해석에 이용한 해면 고도 편차(sea surface height anomaly, 이하 SSHA) 데이터는 TOPEX/POSEIDON와 ERS-2 해면 고도계에 의해서 관측된 것이다. 본연구에서는 Colorado 대학이 편집·공개하고 있는 데이터 세트를 이용했다. 그림-1과 같은 SSHA의 contour map은 Kuragano and Kamachi<sup>4)</sup> 방법에 따라서 SSHA 데이터를 10일간격으로 최적내삽해서 얻은 것이다 (2001년 2월 15일부터 6월 15일까지).

그림-4은 절대 해면 고도(sea surface height, 이하 SSH) 데이터이며, SSHA에 역학 고도장의 연평균 기후치를 더해 작성한 것이다. 역학 고도 기후치는, HydroBase<sup>5)</sup> 수록의 데이터 세트를 기초로 1000 db를 기준면으로 하는 역학 계산에 의해 구했다. SSH도를 작성하는 것에 의해서 SSHA로 볼 수 있는 저기압·고기압성의 소용돌이를 확인할 수 있었다. 그림-4에서는 그 소용돌이를 보기 쉽게 하기 위해서 1.9 m이상은 실선(고기압), 그것 이하는 점선(저기압)으로 나타냈다. 또, 백색의 심볼·마크는 ARGOS에 의해서 부상 후 최초로 얻은 플로트의 위치를 나타내며, 흑색은 침강전 마지막에 얻은 위치이다. 각 플로트의 번호가 붙어 있는 곳은 각 도면에서의 마지막 위치를 나타낸다. 해면에서의 표류(부상으로부터 침강까지)는 약 9시간이다.

해면 고도 데이터와 플로트의 궤적의 비교를 실시하기 위해서, 플로트 29042가 부상하는 날(29042에서 29049까지의 부상 시간차이는 약 23시간)의 SSH도에 검

쳐서 플로트의 궤적을 표시했다(그림-4). 그림-1으로 보여지는 SSHA의 상황으로 8개의 플로트가 투입된 후, 2월 25-26일로 부상해 침강 할 때까지의 궤적(그림-4의 좌상)을 보면, 29042에서 29044까지의 플로트는 고기압 부분의 상단에 위치해, 동쪽 방향으로 이동했다. 29045에서 29048의 플로트는 고기압 부분의 하단과 저기압에 위치해, 서향으로 이동했다. 특히 표면에서의 표류는 SSH의 등치선과 잘 일치하고 있다. 한편, 심도 2000m에서의 플로트 궤적도 해면 소용돌이에 잘 대응하고 있는 것으로부터, 소용돌이는 적어도 2000m까지 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 6월15-16일의 그림까지 공통으로 나타나고 있다. 전체적으로 쿠로시오속류의 남쪽으로 고기압성의 소용돌이가, 그 남쪽에는 저기압성의 소용돌이가 분포하고 있고, 플로트의 움직임은 그 중 규모 스케일의 흐름에 따르는 것으로 알 수 있다.

그림-4에서 보여지는 특징의 하나는, 혼슈 연안의 2000 m 등심선 부근에서의 움직임이다(4월 6일부터 27일까지의 그림). 플로트는 2000 m 등심선 부근까지 가까워지면서 우측으로 돌아나간다. 따라서, 2000 m보다 깊은 곳의 물은 그것보다 얇은 곳에 들어가기 어렵고, 이 해역의 흐름은 해저지형에 제어되고 있다고 추측된다.

그러나, 6월16-17일의 그림을 보면, 플로트 29045는 2000 m보다 얇은 곳에 들어가 있는 것을 알 수 있다. 이것은 SSH장으로부터 기대되는 움직임과는 다르다. 게다가 이 시기에는 다른 플로트의 궤적도 SSH장과 일치하고 있지 않다.

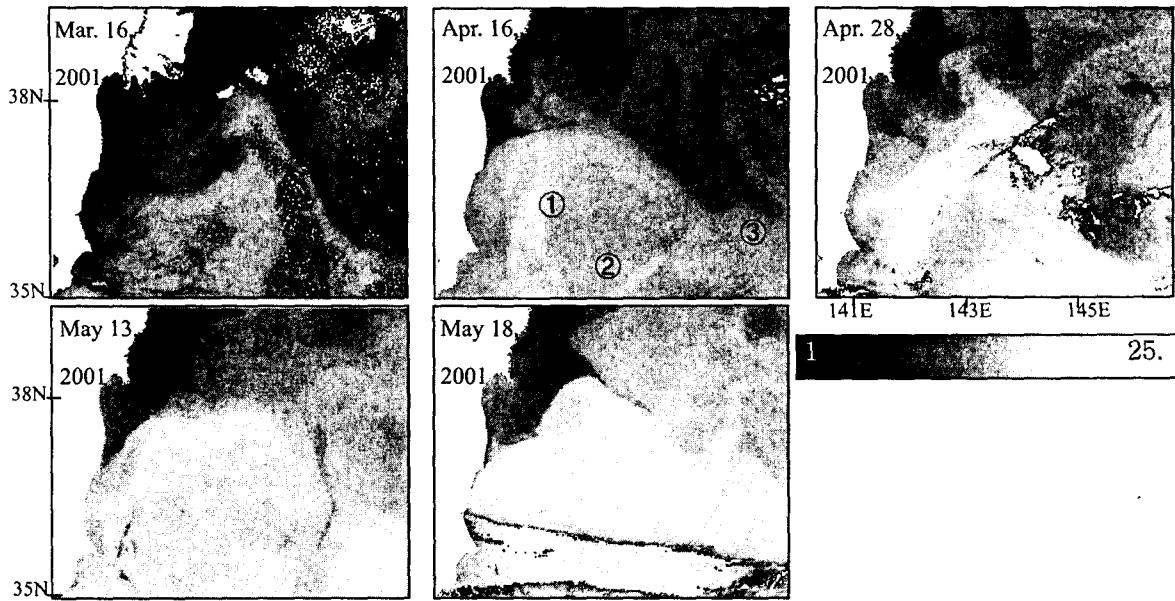


그림 5. 해수면온도의 변화.



그림 6. 2001년 6월 4일의 해수면온도와 심도 100m에서 관측된 유속벡터. LT는 11-13일의 유속.

다음에 이러한 플롯의 경로 이탈의 원인을 구명하기 위해, NOAA/AVHRR의 Ch.4 데이터 및 해양정선관측 데이터(위치는 그림-1)를 이용하여 조사했다.

#### 4. 위성 데이터와 선박 관측 데이터에 의한 2001년 봄의 해황

쿠로시오는 3월말부터 5월에 걸쳐 북상하지만, 연안부에는 보이지 않고, 외해에

서 발달하고 있는 경우가 많다. 봄에 쿠로시오계 수괴의 세력이 연안 근처에서 강해지는 것에 의해서, 해저 에크만층에 의한 연안 용승의 영향으로 이상 어획 현상이 일어난 적도 있다<sup>6), 7), 8)</sup>.

그림-5와 6은 2001년 3월부터 5월까지의 대표적인 해면 수온 화상이다. 이것들은 Tohoku대학에 의한 NOAA 위성 화상의 데이터베이스 JAIDAS<sup>9)</sup>로부터의 데이터이며, 그 중에 AVHRR/2의 Ch.4만을 온도 변환한 것이다. 그림안의 백색은 구름을 나타낸다.

그림-6은 2001년 6월 4일의 해면 수온 화상이다. 또한, 화상 위에 ADCP에 의해서 심도 100 m에서 관측된 정선관측선(LS, LP, LU)의 유속 벡터를 플롯했다. 여기서, LS와 LU는 6월4-5일만에 관측했지만 LT는 11-13일의 유속이다. LT 이외는 유속 벡터와 수온 분포가 잘 대응하고 있는 것을 알 수 있다.

그림-6으로 볼 수 있는 쿠로시오속류

는 지금까지의 흐름 패턴과는 매우 다른 모습을 나타내고 있다. 매우 넓은 폭을 가지는 흐름이 급격하게 북동으로 나아가고 있었지만 그 흐름이 서쪽과 동쪽으로 돌아 그림과 같은 패턴이 되었다고 생각된다. 그림-4의 6월의 두 개의 그림((k)와 (l))로 플롯트가 예상되는 경로로부터 이탈한 현상과의 관련을 조사한다.

따라서, 그림-4의 6월5-6일(k)의 상황에서는, 벌써 쿠로시오속류로부터 분기한 흐름으로부터, 해안으로 향해 흐르는 이벤트가 발생하고 있었다고 생각된다. 즉, 6월 15일(그림-4의(l))경은, 그 이벤트가 끝난 단계이다. 그 이벤트에 따라서 플롯트가 움직였다고 말할 수 있다. 6월 25일부터 7월 15일까지의 SSH장(그림 생략)과 플롯트의 궤적을 비교해 보면 플롯트 29048이외는 잘 대응하고 있었다.

Toba등<sup>10)</sup>은 이번 토호쿠 연안 부근에서 관측된 현상과 같은 흐름을 기이(紀伊)반도 외해에서 관측하여, 그것을 난수의 아웃 브레이크(outbreak)로서 기술했다. 이번 이벤트는 그 위치나 형태 등에서 Toba등의 아웃 브레이크와는 다르지만 쿠로시오 본류와는 역방향에 난수를 방출한 점은 공통되고 있다.

## 5. 결론 및 계획

해면 고도 데이터와 플롯트의 궤적의 비교를 실시한 결과, 플롯트의 움직임은 중규모 스케일의 흐름에 따르는 것을 알았다. 또한, 2000 m 등심선 부근에서의 플롯트의 움직임에 의하면, 이 해역의 흐름은 해저지형에 제어되고 있다고 추측된다.

## 감사의 글

플롯트의 준비, 투입 작업등에는, 일본해양 과학 기술 센터, 지구 관측 프런티어 연구 시스템, 관측선 「MIRAI」(MR01-K01 항해), 마린 워크 재팬의 많은 분들이 관련되었다. 또한 후쿠시마현 수산시험장에서 부터 귀중한 자료를 제공 받았다. 여기에 사의를 나타낸다. 본 연구의 일부는 과학기술부의 기본연구사업 "해양위해도 통합관리시스템 기반기술 개발"의 지원을 받았다.

## 참고문헌

- 1) Hanawa, K.: Southward penetration of the Oyashio water system and the wintertime condition of midlatitude westerlies over the North Pacific, *Bull. Hokkaido Natl. Fish. Res. Ins.*, 59, pp. 103-120, 1995.
- 2) Okuda, K., Yasuda, I., Hiroe, Y. and Shimizu, Y.: Structure of subsurface intrusion of the Oyashio water into the Kuroshio Extension and formation process of the North Pacific Intermediate Water, *J. Oceanogr.*, Vol.57, 2001.
- 3) Davis, R.E., Webb, D.C., Regier, L.A. and Dufour, J.: The Autonomous Lagrangean Circulation Explorer (ALACE), *J. Atmos. Ocean Technol.*, Vol.9, pp.264-285, 1992.
- 4) Kuragano, T. and Kamachi, M.: Global statistical space-time scales of oceanic variability estimated from the TOPEX/POSEIDON altimeter data, *J. Geophys. Res.*, Vol.105, pp.955-974, 2000.
- 5) Macdonald, A. M., Suga, T. and Curry, R. G.: An isopycnally averaged North Pacific climatology, *J. Atmos. Ocean Technol.*, Vol.18, pp.394-420, 2001.
- 6) Yang, C. S., Tanaka, H., Sawamoto, M. and Hanawa, K.: Topographically induced upwelling of the Kuroshio and its effect, northeast Japan, *29<sup>th</sup> IAHR Congress Proc.: Hydraulics for Maritime Engineering*, Tsinghua University Press, pp. 439-444, 2001.
- 7) 楊燦守: 昇温期間における東北沿岸海面温度の変動特性, *水工学論文集*, 第44巻, pp. 927-932, 2000.
- 8) Yang, C. S.: Atmospheric and oceanic forcings on the spring coastal thermal environment in the Kuroshio/Oyashio Frontal Region, *Coastal Eng. J.*, 42(4), pp.407-425, 2000.
- 9) 江藤純一, 牧野正三, 川村宏: 日本画像データベース (JAIDAS) について, *SENAC*, Vol. 30, 97-102, 1997.
- 10) Toba, Y., H. Kawamura, Hanawa, K., Otobe, H. and Taira, K., Outbreak of warm water from the Kuroshio South of Japan -A combined analysis of a satellite and OMLET oceanographic data, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. 47, 297-303, 1991.