

동중국해의 수온과 해류 변화 연구

- 쿠로시오 변동이 동중국해의 해양환경 변화에 미치는 영향-

2018. 2

한 국 해 양 과 학 기 술 원

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “동중국해의 수온과 해류 변화 연구 - 쿠로시오 변동이 동중국해의 해양환경 변화에 미치는 영향”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2018. 2.

총괄연구책임자 : 민 홍 식

참 여 연 구 원 : 강석구, 김미경, 김성대,
나한나, 신창웅, 이재학,
구본화, 김동국, 김연경,
김은진, 박혁민, 백규남,
안성민, 오경희, 이호원,
홍창수, 황초롱, 전동철,
안혜림, 이승현, 최은지,
서옥희, 김용엽, 진현근,
서성봉, 김민우, 김응,
이희열, 임보영, 전찬형,
이윤경, 이강진

보고서 초록

과제고유 번호	BSPE99498 -11578-1	해당단계 연구기간	2015. 1. 1 ~ 2017. 12. 31	단계 구분	1
연구사업명	중사업명	해양연구를 통한 기후변화 예측 및 대응			
	세부사업명	동중국해의 수온과 해류 변화 연구 - 쿠로시오 변동이 동중국해의 해양환경 변화에 미치는 영향			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명				
연구책임자	민 홍 식	해당단계 참여연구원수	총 : 19 명 내부: 8 명 외부: 11 명	해당단계 연구비	정부: 271,000천원 기업: 천원 계 : 천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 19 명 내부: 8 명 외부: 11 명	총 연구비	정부: 1,163,000천원 기업: 천원 계 : 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 해양순환·기후연구센터		참여기업명		
국제공동연구	상대국명:	상대국연구기관명:			
위탁연구	연구기관명: 인하대학교	연구책임자: 박재훈			
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	162
<p>○ 북서태평양 경계역 쿠로시오 해류의 시공간적 변동성 연구</p> <ul style="list-style-type: none"> - 쿠로시오 변동을 모니터링하기 위한 계류 관측은 한국-일본-중국의 공동참여로 추진 - 일본(가고시마대학)은 연구선 제공 및 종합 탐사 주관 - 해양과학기술원은 2대의 해류모니터링 시스템으로 쿠로시오 관측 수행 - 위성 고도계 자료와 계류점 관측 자료 비교를 통한 쿠로시오 특성 파악 - 2년간의 현장관측 자료와 위성 고도계 자료를 비교하여 1993~2017년 기간의 쿠로시오 변동성 시계열 자료 작성 <p>○ 동중국해 물리 해양환경 변동성 연구</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2년간의 현장관측 자료와 자료동화된 수치모델 결과의 쿠로시오 변동성 비교 - 쿠로시오 수송량과 연관된 동중국해의 수온, 해류 변동성 조사 - 쿠로시오 수송량과 동중국해 대륙붕으로의 쿠로시오 유입 상관성 분석 - 조석 및 위성 고도계 자료를 이용하여 1993년 이후의 동중국해 해수면의 정량적 상승 및 상승기작 분석 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	동중국해, 쿠로시오, 해양순환, 변동성, 해수면			
	영 어	East China Sea, Kuroshio, Ocean Circulation, Variability, Sea Level			

요 약 문

I. 제 목

동중국해의 수온과 해류 변화 연구 - 쿠로시오 변동이 동중국해의 해양환경 변화에 미치는 영향

II. 연구 개발의 목적 및 필요성

쿠로시오 변동은 북동아시아 지역에 막대한 기후적, 생태학적 영향을 주며 동중국해의 수온과 해류를 변화시키고, 우리나라 주변 해역의 해양환경에도 영향을 미친다. 따라서 우리나라 주변 해역의 해양환경 변동을 이해하기 위해서는 쿠로시오 변동을 이해하는 것은 매우 중요하다. 그러나 이제까지 쿠로시오 유속 직접 관측은 주로 대만 동쪽이나 동중국해 북부에서 있었기 때문에, 상대적으로 자료가 부족한 동중국해 남부의 쿠로시오 본류에 대한 현장관측 자료 획득이 필요하다. 그리고 동중국해 해양변화의 이해를 위하여 쿠로시오로부터 유입된 해수가 통과하는 동중국해 북동부 해역의 수괴분포 및 유속장 모니터링도 중요하다.

광범위한 영역의 현장관측을 수행하기는 매우 어려운 동중국해 해양환경 연구에서 자료동화 모델 자료는 유사 현장관측 자료처럼 유용하게 활용될 수 있으나 모델의 모의 수준 검증이 우선 요구된다. 동중국해 쿠로시오 본류의 유속 시계열 자료를 획득하여 자료동화 모델이 쿠로시오 변동을 모의하는 수준을 검증해야 하고 이를 근거로 자료동화 모델에 모의된 동중국해의 해양환경과 쿠로시오 변동의 연관성을 조사해야 한다. 한편, 동중국해의 해양환경 변동성 연구와 함께 기후변화에 따른 해수물성 변화 등에 기인한 해수면 변화도 조사해야 한다.

III. 연구 개발의 내용 및 범위

- 동중국해 현장 관측
 - 쿠로시오 변동 연속 관측을 위해 2년간 해류 모니터링 시스템 설치
 - 한국-일본-중국의 공동연구로 쿠로시오 해류 시계열 확보
 - 동중국해 북부해역(일본 EEZ 해역)에서 수괴분포, 내부파 및 혼합 특성 관측

- 쿠로시오와 동중국해 변동의 연관성
 - 현장관측과 자료동화 모델 자료의 쿠로시오 변동성 비교
 - 쿠로시오 수송량에 따른 동중국해 수온 및 해류 분포 분석
 - 쿠로시오 수송량과 동중국해로의 해수 유입 관계 제시

- 동중국해 해수면 변화
 - 동중국해 인근해 최근 해수면 자료 수집 및 분석
 - 동중국해 최근 해수면 상승 기작 분석

IV. 연구 개발 결과

- 동중국해에서의 쿠로시오 해류의 변동성 연구
 - 쿠로시오 변동을 모니터링하기 위한 동중국해 남부에서의 계류 관측은 한국-일본-중국의 공동참여로 추진
 - 해양과학기술원은 2대의 해류모니터링 시스템으로 2015년 6월~2017년 6월 동안 쿠로시오 관측 수행
 - 위성 고도계 자료와 계류점 관측 자료 비교를 통한 쿠로시오의 특성 파악
 - 1993년 이후의 쿠로시오 변동성 시계열 자료 작성
 - 동중국해 북동부 해역 쿠로시오수 유입 해역의 해양 관측 자료 확보

- 쿠로시오와 동중국해 물리 해양환경의 상관성 연구
 - 2015년 6월~2017년 6월 동안 현장관측된 자료와 자료동화된 수치모델 결과의 쿠로시오 변동성 비교

- 1993~2017년 기간 동안 쿠로시오 수송량과 연관된 동중국해의 수온과 해류 분포 조사
- 쿠로시오 수송량에 따른 대만 북동쪽 대륙붕으로의 쿠로시오 유입 변화 분석
- 황동중국해 해수면 상승률 및 상승 기작
 - 1994년 이후 황동중국해 조위, 수온, 염분, 고도위성 자료 수집 및 분석
 - 황동중국해 및 동중국해 동북부 해수면 상승률에서 밀도 기인, 저염화, mass 유입, 역학 효과 등을 분석

V. 연구 개발 결과의 활용 계획

- 한반도 주변해의 수온 상승과 해수물성 변동 원인 제시를 통한 기후변화 대응 방향 수립에 필요한 기초자료로 활용
- 쿠로시오 해류 관측에서 생산된 자료는 지구 기후변화 이해를 위한 각종 사업의 기초 자료 및 검증 자료로 활용
- 동중국해 해양순환 분석 결과는 한반도 주변해역의 생태계 변동을 이해하기 위한 정보를 제공, 생태계 관련 사업의 기초 자료로 활용
- 서해 및 남해 해수 순환 및 물질 플럭스 연구의 기반 자료로 활용
- 주변해역 순환모델의 자료동화 및 예측모델 검증, 정확도 향상을 위한 자료로 활용
- 우리나라 주변해 해수면 상승 파악 기본 자료로 활용
- 최근 황동중국해 해수면 정량적 상승률 수치는 해수면 국가정책 수립에 활용

S U M M A R Y

I. Title

Changes of ocean temperature and currents in the East China Sea - Effects of Kuroshio variability on the ocean environmental changes

II. Necessities and objectives of the study

Kuroshio variability has a large impact on climate and ecology in the northern East Asian countries. It changes temperature and currents in the East China Sea and in turn affects marine environment in the waters around Korea. It is therefore important to study the Kuroshio variability in order to understand the variability of marine environment in the waters around Korea. However, previous understanding of Kuroshio variability based on in situ observation has mainly focused on the east of Taiwan or northern part of the East China Sea, probably due to its proximity. Southern part of the East China Sea has been relatively less explored and thus needs to be studied for understanding of upstream Kuroshio variability. For a complete overview of the marine environmental changes in the East China Sea, it is necessary to monitor distribution of water masses and velocity field in both southern and northern parts of the East China Sea, following Kuroshio's path from its upstream to downstream.

Together with the in situ observation data, data assimilated model results can be useful in the investigation of marine environment in the East China Sea where extensive field observations are very difficult to be carried out. To do this, it is required to verify the model simulation results and validate the simulated Kuroshio variability by comparison with the observed Kuroshio time series at its main stream in the East China Sea. After the validation, the relationship between the marine environment of the East China Sea and Kuroshio variability can be investigated based on the model results. In addition, sea level changes over the East China Sea need to be

examined to figure out how much of them is related to the changes in water properties caused by climate change.

III. Contents and scopes of the study

- Observation in the East China Sea
 - 2-year deployment of current monitoring system for continuous observation of Kuroshio variability
 - Acquisition of Kuroshio time series by joint research between Korea, Japan, and China
 - Observation of the water mass distribution, internal wave and mixing in the northern part of the East China Sea

- Relationship between variabilities of Kuroshio and the East China Sea
 - Comparison of Kuroshio variability from observation data and data assimilated model results
 - Analysis of water temperature and current variability in the East China Sea related to the Kuroshio transport
 - Presenting relationship between Kuroshio transport and intrusion of the Kuroshio into the East China Sea shelf

- Sea level changes in the East China Sea
 - Data collection and analysis around the East China Sea
 - Study on the mechanism of recent sea level rise in the East China Sea

IV. Results

- Investigation of variability of Kuroshio in the East China Sea
 - Conducted international collaboration between Korea, Japan, and China, to deploy mooring instruments in the southern East China Sea including Japanese EEZs
 - Operated two sets of current monitoring system by KIOST to monitor Kuroshio variability from June 2015 to June 2017.
 - Examined characteristics of the Kuroshio by comparing in situ observation and satellite altimetry data
 - Obtained 25-year-long time series of Kuroshio variability from 1993 to 2017
 - Obtained observation data in the northeastern part of the East China Sea where Kuroshio water flows before entering the Korean water area

- Investigation of relationship between Kuroshio and physical environment of the East China Sea
 - Compared Kuroshio variability from June 2015 to June 2017 simulated by a data assimilated model with observation data
 - Investigated distributions of temperature and current in the East China Sea related to Kuroshio variability from 1993 to 2017
 - Investigated intrusion of the Kuroshio into the East China Sea shelf in the northwest of Taiwan related Kuroshio variability

- Sea level rise and its mechanism of the Yellow and East China Seas
 - Collected and analysed data of tide gauge, satellite, temperature and salinity since 1993
 - Investigated the contributing factors of the sea level rise, e.g. density, fresh water, water mass redistribution, etc.

V. Application plans of the results of the study

- Suggestion of possible cause of the temperature rise and water mass changes over the Korean neighboring seas, and its application as a basic dataset to prepare countermeasure for climate change
- Application of observed Kuroshio time series as a basic dataset to understand and validate global climate change signal
- Application of major results from the ocean circulation study of the East China Sea to investigate ecosystem variability over the Korean neighboring seas
- Application for studies focusing on ocean circulation and material flux over the South/Yellow Seas
- Application for validation of numerical ocean models focusing on marginal seas for possible improvement of accuracy and prediction skill
- Application for studies of sea level rise over the Korean neighboring seas
- Application as a basic dataset to establish national policy concerning rising sea levels around the Korean peninsula

C O N T E N T S

Summary	v
Contents	xiii
Chapter 1 Introduction	1
Chapter 2 Research status	3
Chapter 3 Contents and results of the study	6
Section 1 Observation in the southern East China Sea	6
Section 2 Observation in the northern East China Sea	41
Section 3 Variability of temperature and current in the East China Sea	56
Section 4 Recent sea level rise in the Yellow and East China Seas	86
Chapter 4 Achievement of the study goal and contributions to the related area	96
Chapter 5 Application plan of the results of the study	98
Chapter 6 References	99
Appendix	103

목 차

요약문	v
제1장 서론	1
제2장 국내외 기술개발 현황	3
제3장 연구개발수행 내용 및 결과	6
제1절 동중국해 남부역 관측	6
제2절 동중국해 동북부역 관측	41
제3절 동중국해 수온과 해류 변동성	56
제4절 동중국해 해수면 상승	86
제4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	96
제5장 연구개발결과의 활용계획	98
제6장 참고문헌	99
부록	103

그 립 목 차

그림 3.1.1. 쿠로시오-류큐해류 시스템 모식도와 관측선	6
그림 3.1.2. 관측에 활용한 일본 훈련선 가고시마 마루와 2015년, 2016년, 2017년의 조사 참여자	7
그림 3.1.3. 현장관측 해역 수심과 관측 라인	8
그림 3.1.4. HYCOM 재분석 자료의 평균 유속	9
그림 3.1.5. 관측 장비 계류 위치와 CTD 관측 정점 위치	10
그림 3.1.6. 2016년 6월 MY-라인 수온 단면	11
그림 3.1.7. 2016년 6월 MY-라인 염분 단면	12
그림 3.1.8. 2016년 6월 MY-라인 shipboard ADCP 남북방향 유속 성분	13
그림 3.1.9. 2016년 6월 MY-라인 shipboard ADCP 동서방향 유속 성분	13
그림 3.1.10. 2017년 6월 관측 염분, 수온, 밀도, 지형류 수직 단면	14
그림 3.1.11. 2017년 6월 관측 남북방향 유속 수직단면. 동중국해와 북서태평양	15
그림 3.1.12. 2017년 6월 관측 동서방향 유속 수직단면. 동중국해와 북서태평양	15
그림 3.1.13. 단층 해류계 회수 모습	16
그림 3.1.14. 다층 유속 관측 장비(ADCP)와 회수 모습	16
그림 3.1.15. 해류 모니터링 시스템 모식도	17
그림 3.1.16. 2015년 6월에서 2016년 6월까지 KCM1의 단층 해류계에서 관측한 유속	18
그림 3.1.17. 2015년 6월에서 2016년 6월까지 KCM2의 단층 해류계에서 관측한 유속	19
그림 3.1.18. 2016년 6월에서 2017년 6월까지 KCM1의 단층 해류계에서 관측한 유속	20
그림 3.1.19. 2016년 6월에서 2017년 6월까지 KCM2의 단층 해류계에서 관측한 유속	20
그림 3.1.20. PIES 계류 정점(KES1, KES2, KES3)과 유속계(ADCP+Current meter) 정점	21
그림 3.1.21. 유속계류선 및 PIES/CPIES 계류점	21
그림 3.1.22. KES1의 Tau와 Pbot 원시자료	22
그림 3.1.23. KES1의 Tau와 Pbot 원시자료를 window, despiking, detide, dedrift 보정한 1시간 간격 자료	23
그림 3.1.24. KES1의 Tau와 Pbot 보정한 자료를 3일 low-pass 필터링한 자료	23
그림 3.1.25. KES2의 Tau와 Pbot 원시자료	24
그림 3.1.26. KES2의 Tau와 Pbot 원시자료를 window, despiking, detide, dedrift 보정한 1시간 간격 자료	24

그림 3.1.27. KES1의 Tau와 Pbot 보정한 자료를 3일 low-pass 필터링한 자료	25
그림 3.1.28. KES3의 Tau와 Pbot 원시자료	25
그림 3.1.29. KES3의 Tau와 Pbot 원시자료를 window, despiking, detiding, dedrifting 보정한 1시간 간격 자료	26
그림 3.1.30. KES3의 Tau와 Pbot 보정한 자료를 3일 low-pass 필터링한 자료	26
그림 3.1.31. KES1에서 관측한 travel time, 수온, 압력	27
그림 3.1.32. KES2에서 관측한 travel time, 수온, 압력	27
그림 3.1.33. KES3에서 관측한 travel time, 수온, 압력	28
그림 3.1.34. 과거 80년간 자료 중 품질 검사를 통과한 700 m 이상 수직 프로파일 위치	29
그림 3.1.35. 과거 자료로부터 계산한 상층부 수온과 밀도의 계절 변동	29
그림 3.1.36. 과거 자료로부터 계산한 상층 700 dbar travel time	30
그림 3.1.37. 상층 700 dbar travel time과 수심별 수온 사이의 상관 관계	30
그림 3.1.38. 상층 700 dbar 수온 GEM	31
그림 3.1.39. 상층 700 dbar 밀도 GEM	31
그림 3.1.40. 관측한 605 dbar travel time과 700 dbar travel time 사이의 상관관계	32
그림 3.1.41. 관측한 1555 dbar travel time과 700 dbar travel time 사이의 상관관계	32
그림 3.1.42. 관측한 1439 dbar travel time과 700 dbar travel time 사이의 상관관계	33
그림 3.1.43. 2년 계류 기간 동안(2015년 6월~2017년 6월) KCM1 지점 ADCP 관측 MY-라인에 수직한 방향의 유속 성분	34
그림 3.1.44. 2년 계류 기간 동안(2015년 6월~2017년 6월) KCM1 지점 ADCP 관측 MY-라인에 평행한 방향의 유속 성분	34
그림 3.1.45. 2년 계류 기간 동안(2015년 6월~2017년 6월) KCM1 지점 ADCP 관측 MY-라인에 평행한 방향의 유속 성분	34
그림 3.1.46. 2년 관측수송량이 클 때(724일 중 120일)와 2년 관측수송량이 작을 때(724일 중 102일) 해면고도 편차의 평균	36
그림 3.1.47. 2년 관측수송량이 클 때(724일 중 120일)와 2년 관측수송량이 작을 때(724일 중 102일) 해면고도 평균	37
그림 3.1.48. 쿠로시오 유속 현장관측 지점과 인공위성 고도계 자료 격자 위치	38
그림 3.1.49. 2년 관측 쿠로시오 수송량과 인공위성 해면고도차	38
그림 3.1.50. 인공위성 해면고도차로 추정된 25년 쿠로시오 수송량과 2년 현장 관측 쿠로시오 수송량	39

그림 3.1.51. 인공위성 해면고도차로 추정된 25년 쿠로시오 수송량의 월평균과 연평균	39
그림 3.1.52. 인공위성 해면고도차로 추정된 25년 쿠로시오 수송량의 계절변동성	40
그림 3.1.53. 인공위성 해면고도차로 추정된 25년 쿠로시오 수송량 시계열의 주기 분석 결과	40
그림 3.2.1. 2016년 7월 쓰시마 해류가 통과하는 동중국해 북부의 해양조사 정점 및 정점 C1 부근의 미세구조 변동 및 내부파 관측을 위한 CTD, TurboMAP, TRBM-ADCP 정점 위치도	41
그림 3.2.2. 2016년 7월 수온, 염분의 수평 분포도	43
그림 3.2.3. 2개 단면의 수온, 염분, 난류운동에너지 소산율 수직 분포	44
그림 3.2.4. 정점 C1에서 2016년 7월 21일 06:00부터 7월 26일 18:00까지 CTD와 TurboMAP 반복 관측하여 얻은 수온, 염분, 난류운동에너지 소산율의 시계열 수직구조 변화	46
그림 3.2.5. 내부파 관측 예시(2016/07/25, 17:55~7/26, 17:55). 수온, 염분, 난류 소산율 시계열 변화	47
그림 3.2.6. 내부파 관측 예시(2016/07/25, 17:55~7/26, 17:55). ADCP의 음파 산란강도, 수직유속, 수평유속크기	48
그림 3.2.7. 2016년 7월 21~27일 기간 동안 정점 C1의 수직방향 유속 시계열	49
그림 3.2.8. 2016년 7월 21~22일 사이 24시간 동안의 수직 및 동서방향 유속 시계열	50
그림 3.2.9. 2017년 7월 쓰시마 해류가 통과하는 동중국해 북부의 해양조사 정점 및 정점 C1 부근의 미세구조 변동 및 내부파 관측을 위한 CTD/XBT, TurboMAP, TRBM-ADCP 정점 위치도	51
그림 3.2.10. 2017년 7월 수온, 염분의 수평 분포도	53
그림 3.2.11. 2017년 7월 2개 단면의 수온, 염분 및 난류운동에너지 소산율 수직 분포	54
그림 3.2.12. 2017년 7월 22~26일 기간 동안 정점 C1의 ADCP 계류 관측 결과 전 수층의 유속 시계열	55
그림 3.2.13. 2017년 7월 22~26일 기간 동안 정점 C1의 ADCP 계류 관측 결과 전 수층의 연직방향 유속 시계열	55
그림 3.3.1. 2015년 6월~2017년 6월 기간 동안 KCM1과 KCM2에서 관측한 유속과 같은 지점에서 HYCOM 자료의 유속 비교	58
그림 3.3.2. 2015년 6월~2017년 6월 기간 동안 KCM1에서 관측한 유속을 수십 적분한 쿠로시오 수송량지수와 HYCOM 자료의 수송량지수 비교	59

그림 3.3.3. KCM1 지점에서의 수송량지수와 KCM1을 지나는 횡단면을 가로지르는 수송량의 시간변동성 비교	59
그림 3.3.4. 150일 low-pass 필터를 적용한 쿠로시오 수송량	60
그림 3.3.5. 150일 low-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우와 작은 경우의 표층 수온 분포	62
그림 3.3.6. 150일 low-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우와 작은 경우의 50 m 수온 분포	63
그림 3.3.7. 150일 low-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우와 작은 경우의 100 m 수온 분포	64
그림 3.3.8. 150일 low-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우와 작은 경우의 표층 해류 분포	66
그림 3.3.9. 150일 low-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우와 작은 경우의 50 m 해류 분포	67
그림 3.3.10. 150일 low-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우와 작은 경우의 100 m 해류 분포	68
그림 3.3.11. 60~150일 band-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우와 작은 경우의 표층 수온 분포	70
그림 3.3.12. 60~150일 band-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우와 작은 경우의 50 m 수온 분포	71
그림 3.3.13. 60~150일 band-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우와 작은 경우의 100 m 수온 분포	72
그림 3.3.14. 60~150일 band-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우와 작은 경우의 표층 해류 분포	74
그림 3.3.15. 60~150일 band-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우와 작은 경우의 50 m 해류 분포	75
그림 3.3.16. 60~150일 band-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우와 작은 경우의 100 m 해류 분포	76
그림 3.3.17. 60일 high-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우와 작은 경우의 표층 수온 분포	78
그림 3.3.18. 60일 high-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우와 작은 경우의 50 m 수온 분포	79

그림 3.3.19. 60일 high-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우와 작은 경우의 100 m 수온 분포	80
그림 3.3.20. 60일 high-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우와 작은 경우의 표층 해류 분포	81
그림 3.3.21. 60일 high-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우와 작은 경우의 50 m 해류 분포	82
그림 3.3.22. 60일 high-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우와 작은 경우의 100 m 해류 분포	83
그림 3.3.23. 150일 low-pass 필터링과 60~150일 band-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우와 작은 경우의 50 m 수온 분포	84
그림 3.3.24. 150일 low-pass 필터링과 60~150일 band-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우와 작은 경우의 표층 해류 분포	85
그림 3.4.1a. 황동중국해 및 동해의 한국과 일본의 연안 해수면 상승특성 평가를 위해 검조자료를 확보한 검조소 위치	87
그림 3.4.1b. 황동중국해 해역 해수특성 24년('92-'15)간 관측 지점, 위성고도 및 조석 관측점	88
그림 3.4.2. 황동중국해 한국 및 일본 연안 23지점에서 산정한 연평균 해수면 상승 특성	88
그림 3.4.3. 동해 한국과 일본 연안 13개 지점에서의 연평균 해수면 상승 특성	89
그림 3.4.4. 계절변화를 제거한 동중국해 고도위성 해수면 상승 특성	90
그림 3.4.5. 계절변화를 제거한 동해 고도위성 해수면 상승 특성	90
그림 3.4.6. 계절변화를 제거한 태평양 고도위성 해수면 상승 특성	91
그림 3.4.7. 계절변화를 제거한 태평양 고도위성 해수면 상승 특성	91
그림 3.4.8. 동중국해와 동해의 시계열 자료로부터 산정한 선형 상승률	91
그림 3.4.9. 황동중국해 중부 관측점에서 밀도 변화에 의한 해수면 변화 특성	92
그림 3.4.10. 황동중국해 중부 관측점에서 염분 변화에 의한 해수면 변화 특성	93
그림 3.4.11. 최근 8년간 밀도 변화에 의한 전지구 해양 해수면 상승 공간 분포	93
그림 3.4.12. 계절변화를 제거한 고도위성자료로부터 산정한 2017년말까지 해수면 상승률	94
그림 3.4.13. 전지구 해수면 및 GRACE, TPJ, Argo 자료를 이용한 전지구 해수면 상승곡선	95

제 1 장 서론

북서태평양 주변해의 하나인 동중국해는 우리나라 주변 바다와 직접 연결되어 북서태평양과 우리나라 주변 해역의 해양환경을 연결하는 곳이다. 동중국해는 넓은 면적의 대륙붕으로 이루어져 있으며 태평양쪽 대륙사면에는 북동진하는 쿠로시오가 존재하고 있다. 대륙사면 주변에서는 쿠로시오 해수와 동중국해 대륙붕의 해수 간 전선작용(frontal process)으로 인해 상당한 물질교환이 일어난다. 또 쿠로시오 해수가 동중국해 대륙붕으로 직접 유입되기도 하는데 주된 유입 위치는 대만 북동쪽 해역이다.

쿠로시오는 북태평양의 열, 염, 물질 등의 분포에 지대한 영향을 미치며, 특히 태양열에 의해 더워지는 저위도의 초과 열을 고위도로 수송하는 데 중요한 역할을 한다. 최근에 편서풍이 약해지고 태평양 분지 규모의 바람응력컬이 반시계방향으로 강해지는 추세와 연관되어 쿠로시오가 약해지는 경향이 있다. 그럼에도 불구하고 쿠로시오의 워폴쪽 상류역은 여전히 따뜻해지고 있어 쿠로시오에 더 많은 열이 공급된다. 그러므로 여전히 약화된 쿠로시오는 기후시스템의 에너지 균형에 영향을 주며 저위도와 고위도의 열을 조절하고 태평양과 그 주변해 사이의 열, 질량, 염, 영양염 교환에 중요한 영향을 미쳐 지역의 날씨나 어장, 환경에 영향을 미친다(Wang *et al.*, 2016).

북태평양 해양의 장단기 변화는 쿠로시오를 통해 우리나라 주변 해역의 해양환경에 영향을 미친다. 쿠로시오의 연평균 수송량은 엘니뇨-남방진동에 의해 주로 영향을 받는 북적도 해류의 북쪽 분지의 영향을 받고 연평균과의 편차는 서태평양 원격상관 패턴의 영향으로 인해 대만 동부의 중규모 소용돌이에 의해 지배된다(Shen *et al.*, 2014). 이러한 쿠로시오의 변동은 전선작용으로 인한 쿠로시오수와 대륙붕 해수와의 물질교환이나 동중국해로 쿠로시오가 직접 유입되는 현상의 변동을 유발한다.

기후인자와 연관이 있는 쿠로시오 수송량 변동은 동중국해의 수온과 해류를 변화시키고, 우리나라 주변 해역의 해양환경에도 영향을 미친다. 따라서 우리나라 주변 해역의 해양환경 변동을 이해하기 위해서는 변동의 근원지인 동중국해서의 해류 변동을 이해하여야 한다. 북서태평양과 동아시아의 열과 물질 수송을 이해하는 데 동중국해 쿠로시오의 시공간 변동성 관측이 요구되나 그 동안 동중국해 쿠로시오의 시공간적 변동성 관측은 매우 드물었다. 쿠로시오를 통한 우리나라 주변해로의 열, 염 및 물질수송을 이해하기 위해 아직까지 미관측 분야로 남아있는 동중국해 쿠로시오 상류역에서의 장기 관측 자료 확보가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 동중국해 남부해역의 쿠로시오 경로에 2개 계류 관측점을 구축하여 2년간 쿠로시오의 변동을 직접 관측하였다.

동중국해 북동부해역은 쿠로시오 해수가 대륙붕으로 유입되어 대한해협으로 이동되는 길목에 해당되어 남해와 대한해협 등의 해양환경 변화 연구를 위하여 기본적으로 모니터링해야 하는 곳이다. 그러나 이 곳은 대부분 일본의 배타적 경제수역에 해당되어 이 해역에서 국내 연구팀에 의한 해양 조사는 거의 전무한 상태이다. 동중국해 대륙붕에서의 해양환경 변화의 기작을 이해하기 위하여 해양 내부 혼합과정의 연구도 중요하다. 이와 관련하여 내부파 및 해저혼합층 등 관측과 연구의 필요성이 있다. 동중국해 대륙붕에서 관측되는 내부파는 많은 경우에 동중국해 북동부해역 대륙붕단 영역에서 발생하는 것으로 알려져 내부파 관측과 연구에 중요한 해역이다. 일본 연구선에 공동 승선하여 이 해역에 대한 조사를 본 연구에서 수행하였다.

쿠로시오 변동과 연관된 동중국해의 수온과 해류 변동을 조사하기 위해서 동중국해의 해양 환경을 지속적으로 관측하는 것이 필요하나 광범위한 해역에 대한 현장 관측 조사를 지속적으로 수행하기에는 어려움이 따른다. 즉, 동중국해의 상당한 영역이 중국과 일본의 배타적 경제수역이고, 현장 관측 조사에는 많은 인력과 기간, 예산이 투입되어야 하기 때문에 동중국해 전역에서 현장 관측 조사를 직접 수행하는 것은 현재 상황에서는 물리적으로 거의 불가능하다. 부족한 현장 관측 자료를 보완해 주는 수치 모델 결과, 특히 관측 자료가 동화된 모델 결과를 활용하는 방법이 동중국해의 현장 조사를 대신할 수 있는 매우 유용한 방법이다. 따라서 본 연구에서는 쿠로시오 변동과 동중국해 해양환경의 연관성을 자료가 동화된 모델 결과를 활용하여 평가하였다.

북서태평양의 시그널은 동중국해를 통해 서해, 동해로 전파된다. 그러나 황해, 동중국해와 동해는 수심과 해수, 해류특성 차이로 인해 해수면 상승이 특징적으로 다르게 나타난다. 해수면 변화는 지구기후변화의 특징을 대변하는 현상으로 대양과 접해있는 동중국해의 해수면 변화의 특성고찰은 이러한 점에서 중요한 의미가 있다. 본 연구에서는 동중국해의 해수면 변화를 검조소 자료와 위성 자료를 이용하여 고찰하였다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

- 국내에서는 1994년에서 1999년까지 ‘쿠로시오 해역과 동중국해 순환연구와 ’동중국해 북서부해역의 해양순환 연구’를 수행하여 동중국해 사면역에서 쿠로시오의 변동과 물성변화, 큐슈 서쪽에서의 쿠로시오 분지과정, 제주난류의 특성, 양자강 유출수의 거동, 황해와 경계역에서의 교환특성 등을 해석함.
- 영양염의 중요한 공급과정인 대륙붕 단에서 저층수의 용승 등 해수와 물질의 혼합과정 등에 대한 기초 연구를 수행한 바 있음.
- 한국해양연구원에서 2003년에서 2010년까지 ‘기후변화에 따른 남해(동중국해 북부)의 해양환경 및 생태계 변동 연구’를 수행하여 동중국해의 물리, 화학, 생물학적 특성을 현장 관측을 통해 조사함. 여러 해에 걸친 현장 관측 조사가 수행되었으나 해양 환경의 경년 변동성을 제시하기에는 자료가 충분치 않아 단편적인 계절적 차이를 제시한 상태임.
- 2003년에서 2008년까지 ‘기후변화 모니터링 및 예측을 위한 요소기술 개발 연구’ 사업과 후속사업의 일환으로 해수면 변화 연구를 수행한 바 있음.
- 일본 자료동화 해양모델인 JCOPE2을 이용하여 획득한 재분석 자료를 이용하여 PDO와 동중국해 쿠로시오 수송량의 경년 변동성의 상관성 연구가 일본 연구진에 의해 수행됨.
- 인공위성 고도계 자료, 바람, 표층 열속, 해표면 수온 등을 이용하여 동중국해의 쿠로시오 경로의 장주기 변동성이 연구된 바 있음(Wang and Oey, 2014).
- 인공위성 고도계 자료로부터 산출된 표층 지형류를 이용하여 동중국해에서 쿠로시오의 시공간적 변동성이 중국 연구진에 의해 연구된 바 있음(Liu and Gan, 2011).
- 2003년에서 2008년까지 ‘기후변화 모니터링 및 예측을 위한 요소기술 개발 연구’ 사업과 후속사업의 일환으로 해수면 변화 연구를 수행하여, 동해의 9년간(1993~2001년) 해수면 정량적 상승치가 지구해수면 상승의 2배에 달함을 보고한 바 있음. 지구평균 상승률보다 2배에 가까운 상승률은 열팽창에 의한 특성을 보고하였으며, 장기간의 특성은 지구평균상승률에 수렴할 것으로 예상함.
- 미국과 프랑스는 1992년 9월부터 Topex/Poseidon 위성과 연이은 JASON1, JASON2 위성을 발사하여 전지구 기후변화모니터링 차원에서 전세계 해양의 해수면 변화를 준실시간으로 25년 이상 모니터링 하여 오고 있으며, 이자료는 기후변화로 인해 대표적인 현상인 해수면변화를 모니터링하는 데 활용하고 있음.

- 해양과학기술원에서는 2003년에서 2008년까지 연구 이후 공식적인 연구 사업으로 해수면 변화 연구를 수행한 바 없으며, 이로 인해 이 분야 연구가 취약한 상태임. 한반도 주변에서 다양한 관측방법을 활용한 지속적인 자료수집이 요청되며, 장기적인 상승기작 메커니즘에 대한 모니터링이 필요한 것으로 지적되고 있음.
- Andres *et al.* (2008)은 동중국해 북부 PN-라인 근처에서 쿠로시오 수송량을 약 2년 동안 현장 관측하였으며, 이 장기 관측을 통해 동중국해 쿠로시오 본류 수송량의 절대값과 시간 변동성이 처음으로 밝혀짐.
- 동중국해 남부에서는 1994년 9월부터 1996년 5월까지 대만 동쪽 쿠로시오 수송량을 관측한 결과가 있음(Zhang *et al.*, 2001; Johns *et al.*, 2001). 이 관측 결과 평균값이 약 21.5 Sv으로 나타났고 약 100일 주기에서 10 Sv 정도의 큰 변동성이 나타남이 밝혀짐. 또한 인공위성 해면고도 자료와의 비교를 통해 이 100일 정도 주기의 변동성이 중규모 소용돌이에 의해 생기는 쿠로시오 사행의 영향인 것으로 보고됨. 이러한 중규모 소용돌이 신호를 시공간적으로 추적한 결과, 태평양에서 생겨난 신호가 서쪽으로 전파하면서 대만 동쪽 쿠로시오의 수송량에 영향을 주는 것으로 밝혀짐. 또한 대만 동쪽 관측 쿠로시오 수송량과 해면고도차 시계열의 비교를 통해 인공위성 해면고도차로부터 쿠로시오 수송량을 추정할 수 있음을 보임.
- 류큐열도 동쪽편으로 중층에서 최대 유속이 나타나는 류큐해류의 경우에도 제한적이지만 현장 관측을 통해 그 시간 변동성이 밝혀진 바 있음. Zhu *et al.* (2004)은 오키나와 남동쪽으로 관측 장비들을 계류하여 류큐해류를 포함한 서안경계류를 관측하고자 하였고, 그 결과 얻어진 수송량의 시계열이 인공위성 해면고도차 시계열과 높은 상관성을 보였고, 이를 바탕으로 수송량 시계열을 장기간으로 연장함.
- 쿠로시오 수송량이 대만 동쪽 상류역과 동중국해 북부에서 관측되어 수송량 시계열과 인공위성 해면고도차와의 상관성이 밝혀졌고, 류큐해류의 경우에도 관측한 수송량과 인공위성 해면고도차와의 상관성이 밝혀짐에 따라, 현장관측이 동시에 이루어지지 않은 경우에도 추정 시계열을 통해 북서태평양의 주요 서안경계류인 쿠로시오와 류큐해류의 상관성을 밝히려는 시도가 있음. Andres *et al.* (2008)의 연구에 따르면 동중국해 쿠로시오와 류큐해류 사이에 약 60일의 시간차를 두고 상관관계가 나타나며, 주변해역의 인공위성 해수면편차를 함께 살펴본 결과 북서태평양에서 중규모 소용돌이가 나타난 후, 류큐해류의 변동성이 나타나고, 그 후에 동중국해 쿠로시오의 변동성이 나타난다는 것으로 보임. 이에 따라 이 두 수송량의 상관성을 일으키는 원인으로 류큐열도에서 가장 깊은 수심인 Kerama Gap을 통한 통과류가 제시되었음. 즉, 북서태평양에서 중규모 소용돌이에 의해 생겨난 류큐해류의 변동성이 Kerama Gap을 통해 동중국해

내부로 전달되고, 이를 통해 동중국해 내부에 해면고도차가 유도되어 쿠로시오 수송량에 영향을 미치게 되는 것임(Na *et al.*, 2014).

- 기존에 발표된 현장 관측 자료를 바탕으로 한 결과들은 1~2년 정도의 현장관측 자료에서 수송량 시계열을 얻고, 인공위성 해면고도 자료와의 상관성을 밝힌 다음, 이를 바탕으로 추정된 수송량으로부터 서로 다른 해역 해류 사이의 상관성을 밝히는 방식으로 얻어짐.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 동중국해 남부역 관측

1. 쿠로시오 현장관측 개요

쿠로시오 현장관측은 쿠로시오-류큐해류 해류시스템(그림 3.1.1의 모식도 참조) 공동연구(Joint Kuroshio Ryukyu Current System Study, JKRYCSS)에 필요한 현장 관측 자료를 확보하기 위하여 한국, 일본, 중국의 공동조사로 수행되었다. 일본 EEZ에 속하는 영역에 대한 조사에 일본의 조사선을 이용하기로 하였고 쿠로시오와 류큐해류를 동시에 관측하기 위한 기기를 3국의 연구진이 제공하여 관측된 자료를 공동 활용하기로 하였다. 각국의 주된 연구 주제에 따라 한국의 해양과학기술원 연구진은 동중국해 쿠로시오 분석, 중국 제2해양연구소 연구진은 류큐해류 분석, 일본 가고시마대학교 연구진은 deep overflow 현상 등에 중점을 두고 CTD 자료 분석을 진행하기로 하였다.

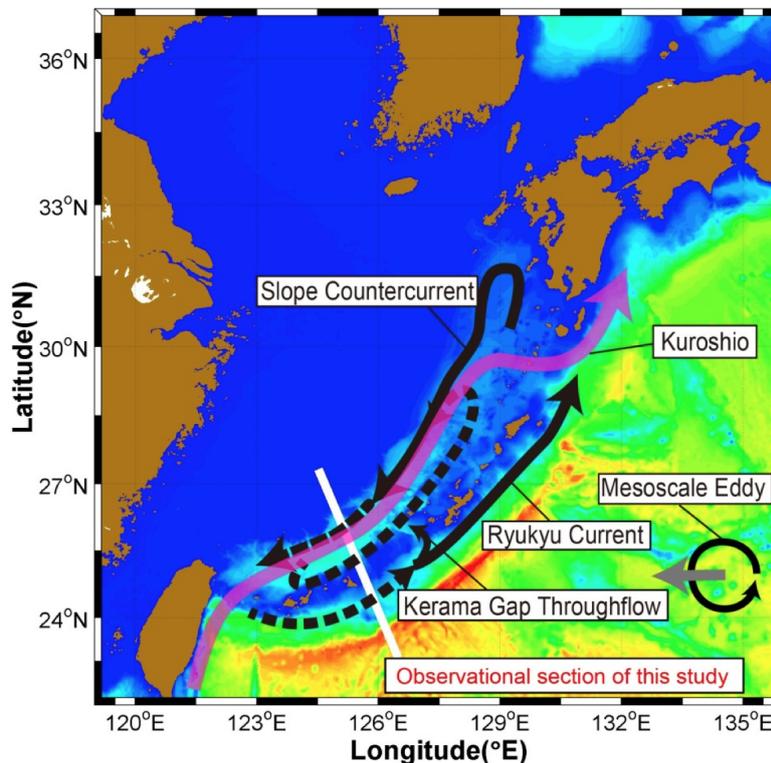


그림 3.1.1. 쿠로시오-류큐해류 시스템 모식도와 관측선.

일본 가고시마대학교 수산대학 훈련선인 가고시마 마루를 활용하여 진행한 현장 관측에는 가고시마대학교 학생 선상실습의 일환으로 가고시마대학교 연구진들이 승선하였고, 한국해양과학기술원 연구진과 중국 제2해양연구소 연구진들도 함께 승선하여 2015년 6월, 2016년 6월, 2017년 6월, 3년 연속 매년 약 2주 동안 조사하였다(그림 3.1.2).

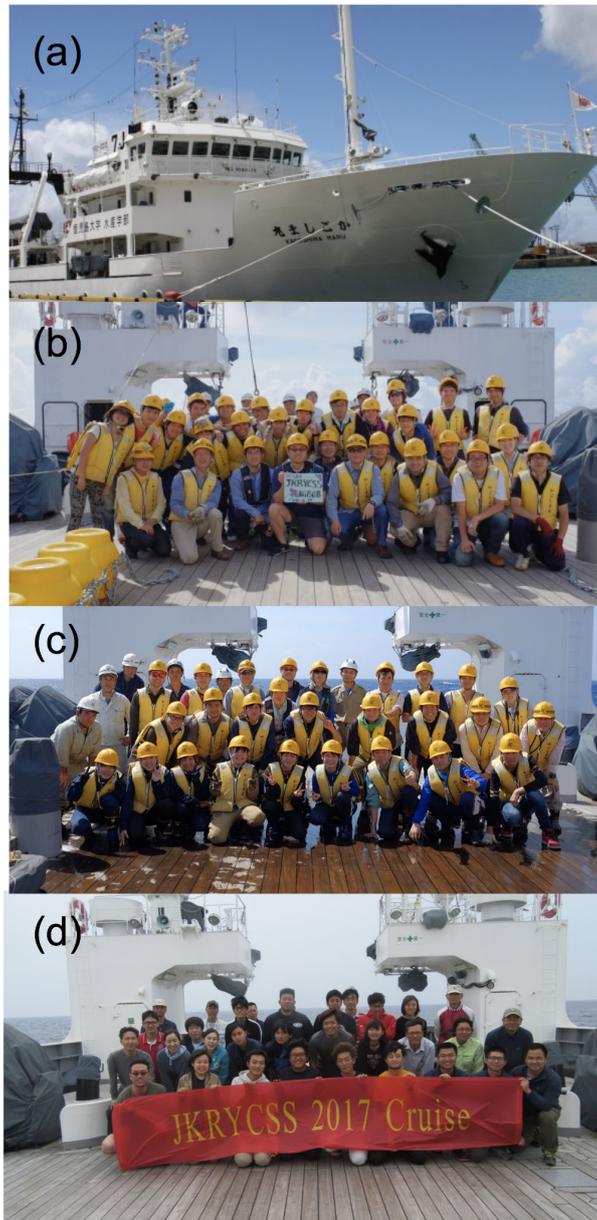


그림 3.1.2. 관측에 활용한 일본 훈련선 가고시마 마루(a)와 2015년(b), 2016년(c), 2017년(d)의 조사 참여자.

관측 해역은 동중국해 남부 미야코지마 섬을 기준으로 북서 방향 오키나와 해구 (Okinawa trough) 지역과 남동 방향 류큐해류 지역으로 나뉜다(그림 3.1.3). 기존 관측이 있었던 동중국해 북부 PN-라인이나 Kerama Gap보다 남쪽에 위치하여 쿠로시오 본류 상류역을 관측하도록 계획하였으며, 동중국해 쿠로시오와 류큐해류를 동시에 관측함으로써 북서태평양 주요 서안경계류 사이의 상관관계를 알아보고자 하였다. 따라서 현장관측 기준선은 동중국해 쿠로시오와 류큐해류를 가로지르는 방향으로, 해면고도 관측 인공위성 궤도를 따라 정하였다(MY-라인). 이 라인을 따라 CTD 관측을 수행하였고, 해류 관측 장비들을 계류하였다. 2015년 6월에 관측 장비를 계류하였고, 2016년 6월에 일부를 회수하여 재계류하였으며, 2017년에 최종 회수하여 총 계류 기간은 만 2년이 되었다.

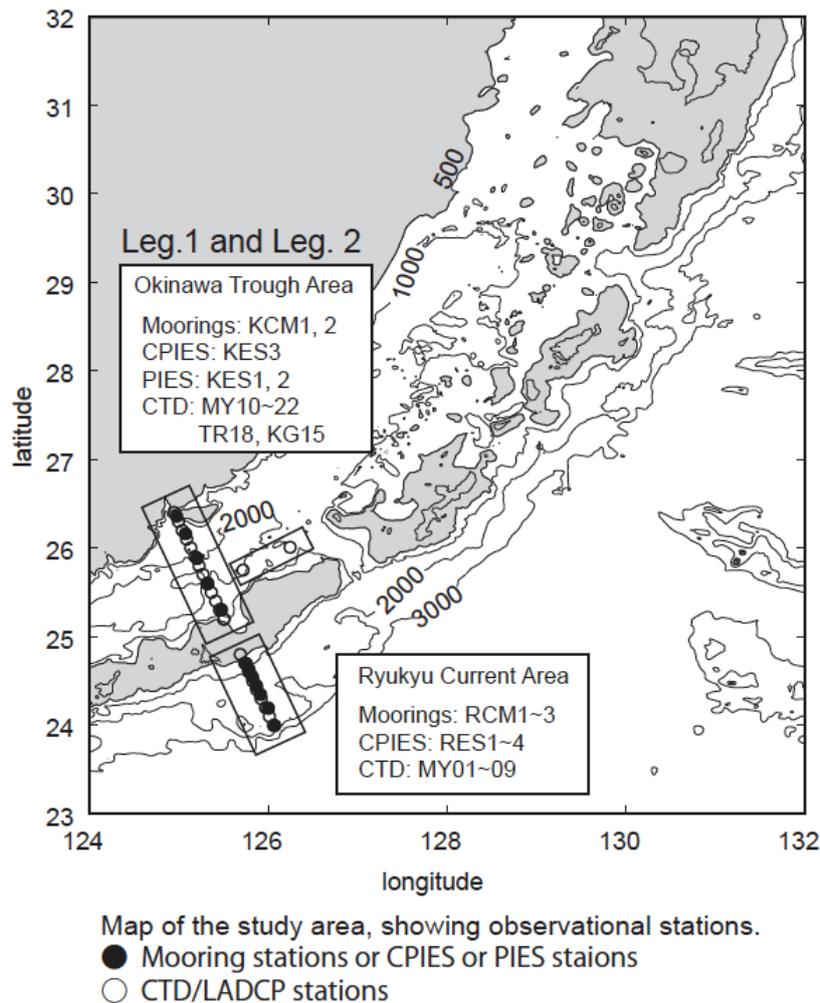


그림 3.1.3. 현장관측 해역 수심과 관측 라인.

관측 장비 계류 지점과 수심 등을 결정하기 위해 HYCOM 재분석자료(HYCOM 설명은 3장 3절 참조)를 사용하여 평균적인 해류의 공간 구조를 파악하였다. MY-라인을 따라 평균 유속의 수직 성분을 보면, 동중국해 쿠로시오 해역에서는 표층부터 약 500~700 m 수심까지 북동쪽으로 흐르는 강한 유속의 형태가 나타나며, 그보다 깊은 수심에서는 반대 방향인 남서쪽으로 흐르는 형태가 나타난다(그림 3.1.4). 쿠로시오 해역에서는 유속 core가 상층에 존재하는 반면, 류큐해류는 약 500~1000 m 수심에서 북동향류가 가장 크게 나타나는 중층 core의 특징이 뚜렷하다. 이러한 모델에 나타나는 평균적인 유속 구조를 바탕으로 쿠로시오의 상층 core, 류큐해류의 중층 core를 관측하기 위한 장비의 계류 위치와 수심을 결정하였다.

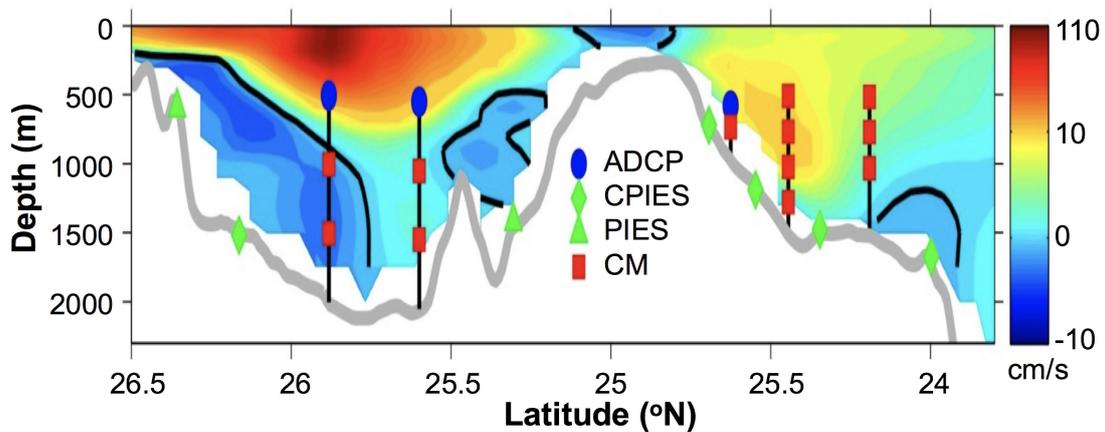
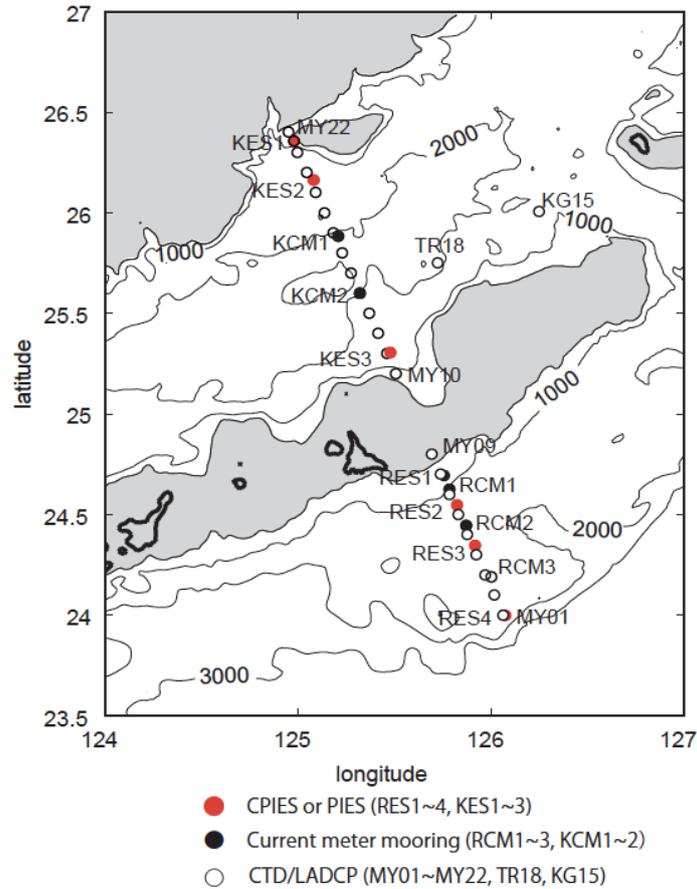


그림 3.1.4. HYCOM 재분석 자료의 평균 유속(양의 부호가 북동향류).

동중국해 쿠로시오의 주축에 가까운 정점인 KCM1과 여기에서 남동쪽으로 떨어진 정점인 KCM2에 tall mooring line을 배치하여 쿠로시오의 상층 core를 관측하도록 계획하였다(그림 3.1.5). 그리고 MY-라인을 따라서 KCM1의 북서쪽으로 KES1과 KES2를 배치하고, KCM2의 남동쪽으로 KES3를 배치하였다. 류큐해류 중층 core를 관측하기 위해 RCM1과 RCM2에 tall mooring line을 배치하였고, 남동쪽으로 RCM3를 배치하였다. 또한 각 RCM1의 북서쪽, tall mooring line의 사이와 RCM3의 남동쪽으로 RES1~4를 배치하였다.



Ryukyu Current and Kuroshio measuring arrays

그림 3.1.5. 관측 장비 계류 위치와 CTD 관측 정점 위치.

매년 6월 현장 관측 시에 MY-라인을 따라 CTD 관측을 수행하여 수온, 염분, 용존산소 등의 기초 자료를 획득하였다. 그림 3.1.6에서 2016년 6월에 관측한 동중국해 쿠로시오 해역의 수온 단면 분포를 보여주고 있는데, 표층에 28도 이상의 고온수가 나타나고 1000 m보다 깊은 수심에서는 5도 이하의 저온수가 나타난다. 중층 등온선은 오키나와 해구의 남동 방향으로 더 깊어지는 특성을 보여, 북동쪽으로 향하는 유속과의 물리적 일관성을 보여준다. 염분의 경우 표층 300 m 정도에 고염수가 존재하며 염분 최대층은 오키나와 해구 남동쪽에서 약 100 m 수심에 나타난다(그림 3.1.7). 오키나와 해구 북서쪽으로는 표층에 저염수가 나타나고 있다. 염분 최소층은 오키나와 해구 전역 약 400~600 m 수심에서 나타나고 있는데, 오키나와 해구 북서쪽으로는 염분 최소층의 수심이 조금 얕아지는 특징을 보인다.

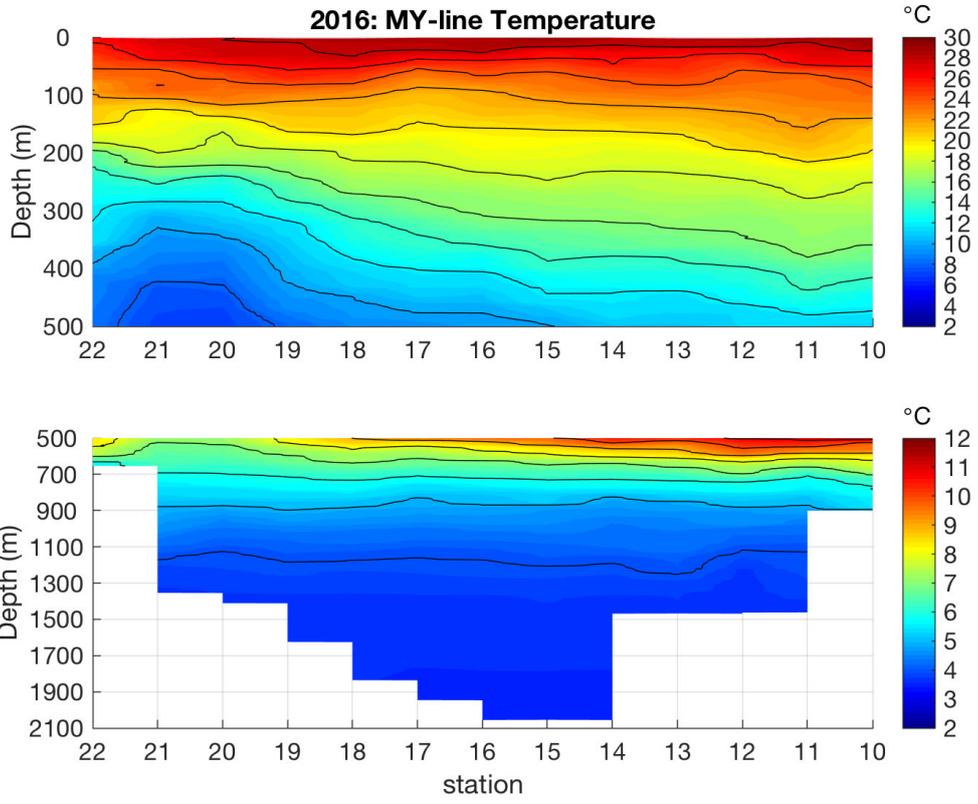


그림 3.1.6. 2016년 6월 MY-라인 수온 단면.

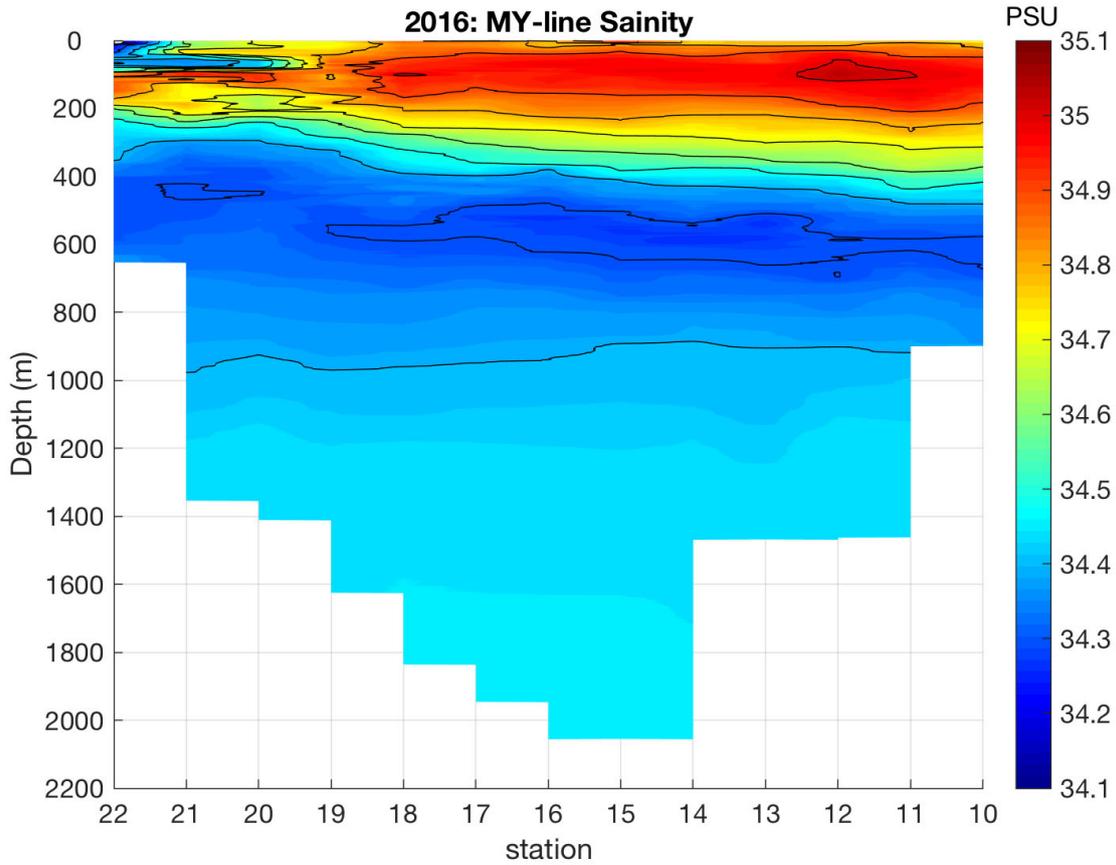


그림 3.1.7. 2016년 6월 MY-라인 염분 단면.

관측기간 동안 연구선에서 MY-라인을 따라 얻은 남북방향의 유속은 북향류의 공간분포를 보여준다(그림 3.1.8). 북서쪽 정점인 MY22에서 남동방향 MY14까지 북향류가 강하게 나타나며, 표층 최대 유속은 MY15~16 정점에서 나타나지만, 중층 최대 유속은 그보다 북서쪽 정점인 MY18 근처에서 나타나는 것을 볼 수 있다. 동서방향의 유속을 보면 대체로 양의 부호를 보이고 있어, 남북방향 유속과 함께 북동류를 보여주고 있다(그림 3.1.9). 북향류가 강하지 않았던 남동쪽 정점에서 표층에 동향류가 나타나며 북서쪽 정점에서는 서향류가 나타나는 것을 볼 수 있다.

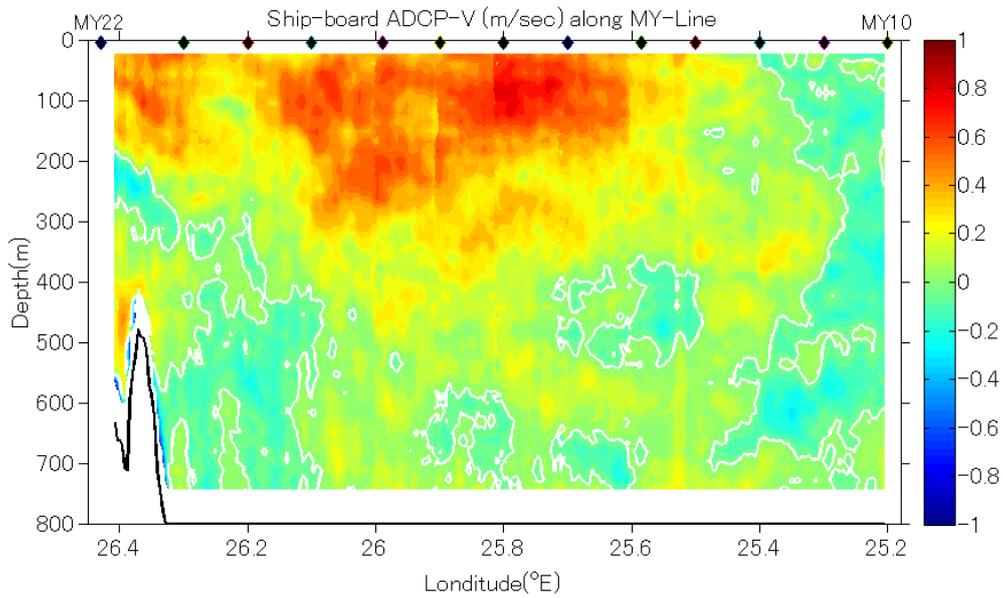


그림 3.1.8. 2016년 6월 MY-라인 shipboard ADCP 남북방향 유속 성분.

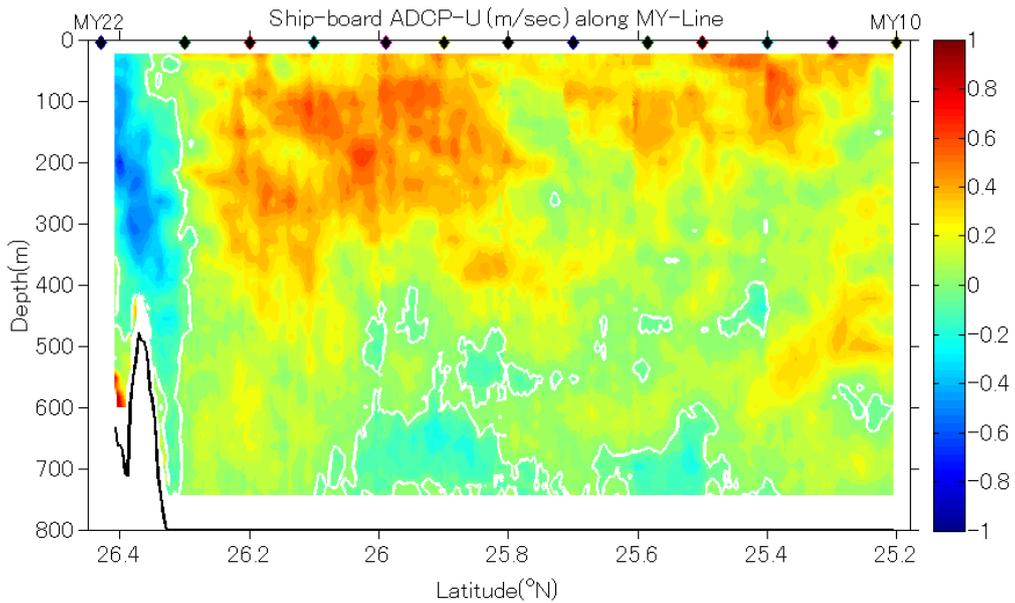


그림 3.1.9. 2016년 6월 MY-라인 shipboard ADCP 동서방향 유속 성분.

2017년 6월 관측 자료를 통해 동중국해 쿠로시오와 북서태평양 류큐해류 지역의 수온, 염분, 밀도, 그리고 지형류 특징을 살펴볼 수 있다(그림 3.1.10). 표층에 고온 고염수가 나타나고, 수온의 경우에는 수심이 깊어지며 낮아지는 경향, 염분의 경우에는 약 1000 m 수심까지 염분 최소층이 나타난 후 다시 높아지는 경향을 보인다. 미야코지마를 중심으로 북서쪽 해역인 쿠로시오와 남동쪽 해역인 류큐해류 지역을 비교해보면, 동중국해 해역에서 등온선

과 등염분선이 모두 북서쪽으로 갈수록 얕아지는 특징을 보인다. 이에 따라 등밀도선도 동중국해 해역에서 상층 약 300 m 수심에서 북서쪽 방향으로 얕아지고 있어, 이에 수직한 방향으로의 유속 특징을 암시한다.

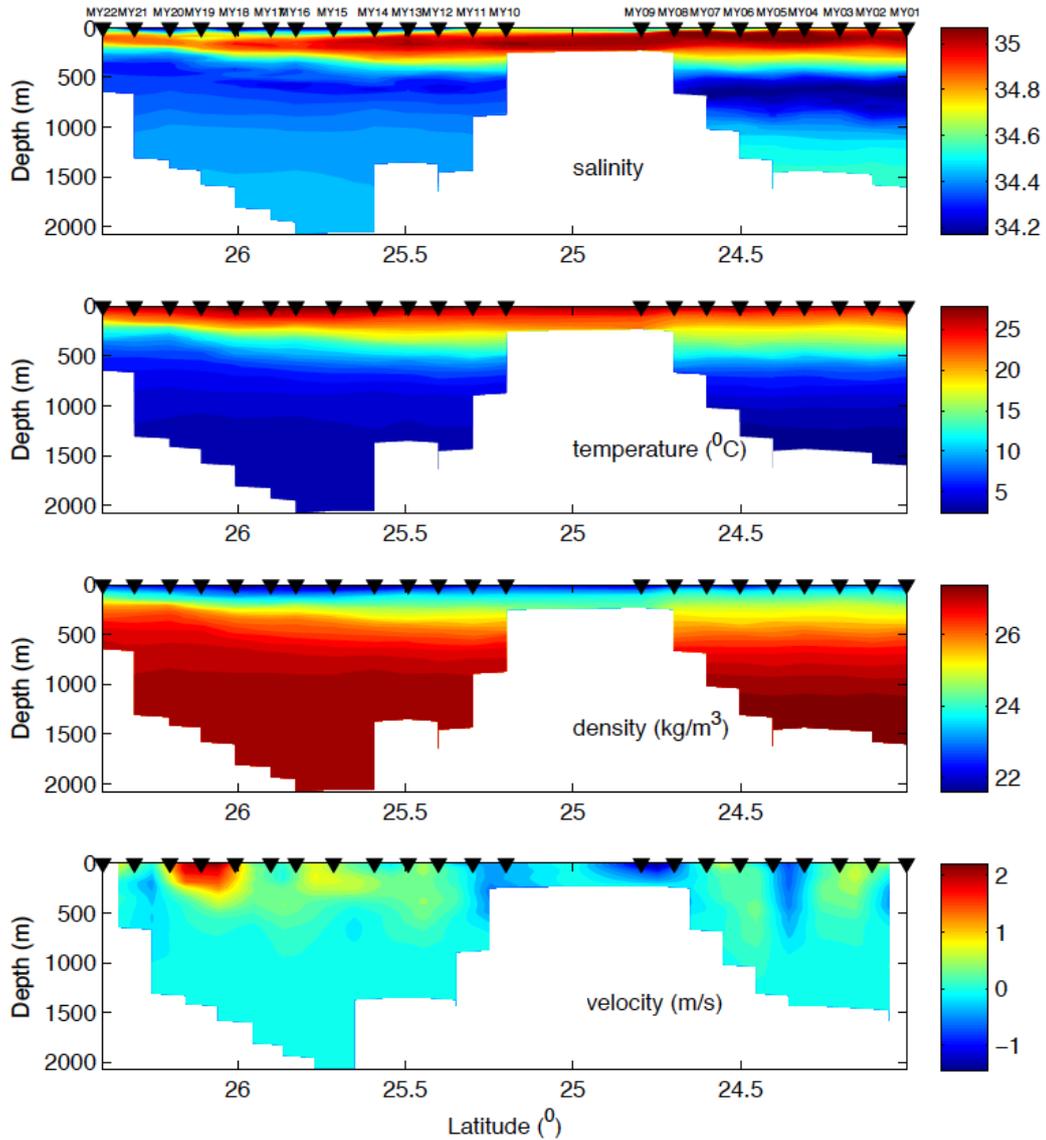


그림 3.1.10. 2017년 6월 관측 염분, 수온, 밀도, 지형류 수직 단면(위부터 아래로).

2017년 6월 현장 관측 시기에 연구선에서 관측한 유속 자료에서도 동중국해 해역과 류큐해류 해역의 특징을 비교할 수 있다(그림 3.1.11, 3.1.12). 동중국해에서는 북서쪽 해역 상층 500 m 정도에서 북향류가 강하게 나타나고, 동향류는 오키나와 해구 중앙에서 크게 나타나고 있다. 북서태평양에서는 남동쪽으로 갈수록 표층에서 강한 북향류가 나타나지만, 류큐열

도에 가까운 북서쪽 해역에서는 북동향류의 특징이 표층에서는 잘 나타나지 않는 반면, 중층에서 잘 나타나는 것을 확인할 수 있다.

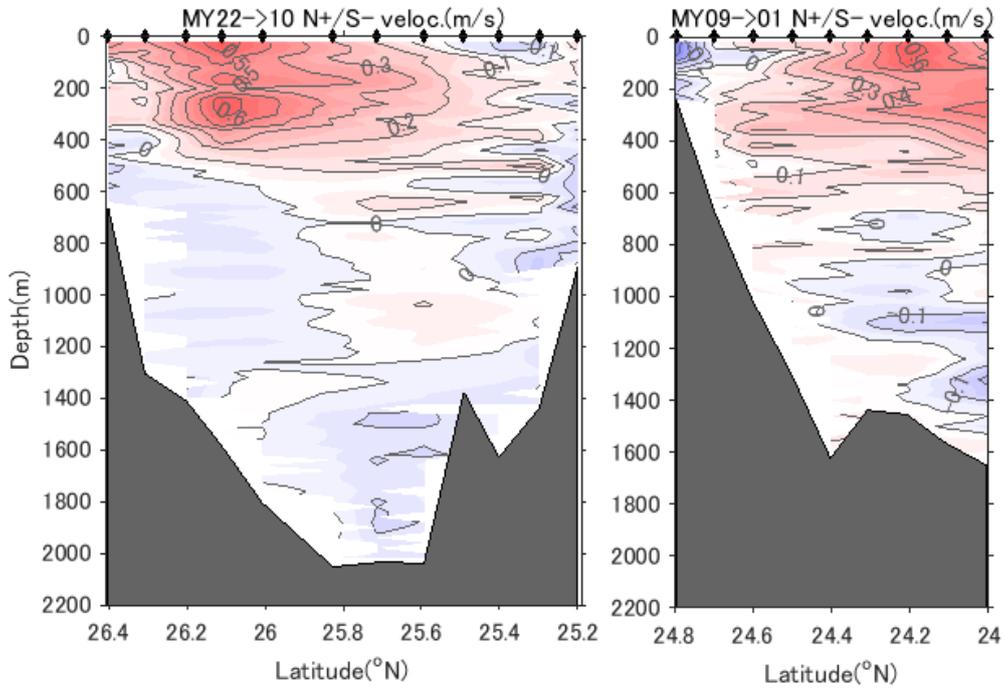


그림 3.1.11. 2017년 6월 관측 남북방향 유속 수직단면. 동중국해(좌)와 북서태평양(우).

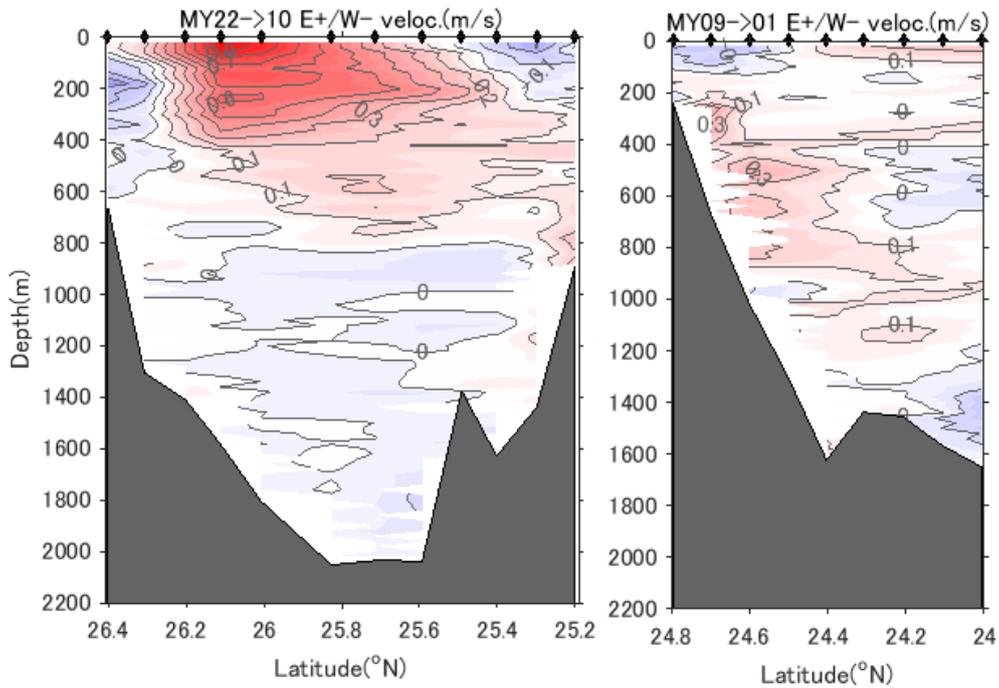


그림 3.1.12. 2017년 6월 관측 동서방향 유속 수직단면. 동중국해(좌)와 북서태평양(우).

2. 해류 모니터링 시스템

동중국해 쿠로시오의 변동성을 장기간 모니터링하기 위해 단층 해류계(그림 3.1.13 참조)와 다층 유속 관측 장비인 ADCP(그림 3.1.14 참조) 등으로 구성된 해류 모니터링 시스템을 구축하여 KCM1과 KCM2 지점에서 만 2년 동안(2015년 6월~2017년 6월) 운영하였다(그림 3.1.15). 해저면에서부터 약 500 m 수심까지 이어지는 tall mooring line의 상단에 ADCP를 배치하고, 그보다 깊은 수심 약 1000 m와 1500 m 깊이에 단층 해류계를 배치하였다.



그림 3.1.13. 단층 해류계 회수 모습.



그림 3.1.14. 다층 유속 관측 장비(ADCP)와 회수 모습.

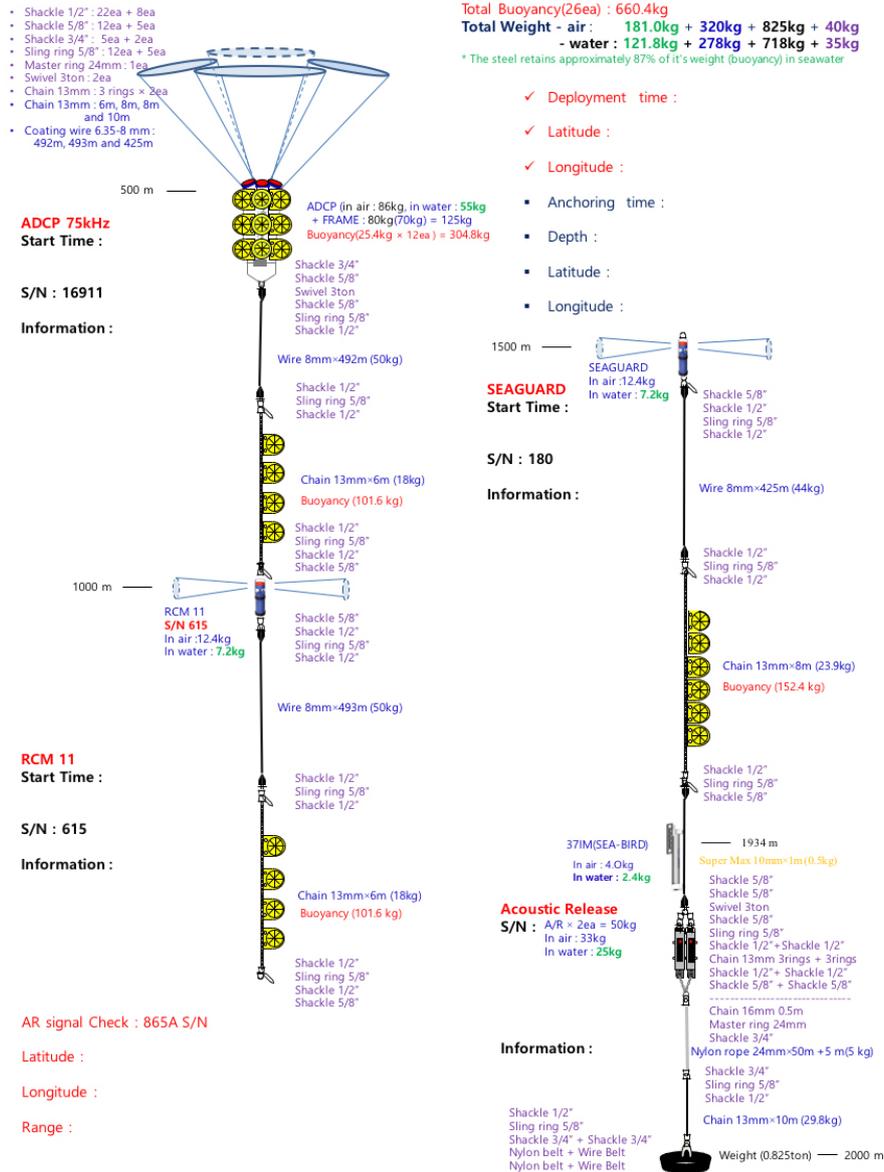


그림 3.1.15. 해류 모니터링 시스템 모식도.

약 500 m 수심에 계류한 ADCP는 75 kHz로 표층을 바라보도록 하여, 상층 500 m 유속을 모니터링 하고자 하였다. 매 3분마다 관측 ping을 내보내고, 10개의 자료를 모아 매 30분마다 자료를 생산해내도록 세팅하였다. 매 1 m 마다 수심 보정을 하여 얻어진 자료의 가장 얇은 수심은 약 50 m이고, 16 m 간격으로 자료 획득률이 90% 이상이며 최대 유속 3 m/s 이하인 자료만을 추출하였다. 이렇게 얻어진 30분 간격, 매 16 m 간격의 자료를 local magnetic declination 보정을 위해 시계방향으로 약 4.4도 회전시켜 최종 자료를 얻었다.

단층 해류계는 수심 약 1000 m와 1500 m에 배치하였는데, 30분 간격으로 자료를 얻도록

설정하였다. KCM1이 쿠로시오 주축에 가까운 정점인데 1500 m 수심에서 첫 해(2015년 6월~2016년 6월) 후반부 절반 기간 정도의 자료가 얻어지지 않았으며, 배터리 문제인 것으로 생각된다. 그리고 KCM2에서는 두 번째 해(2016년 6월~2017년 6월) 1500 m 수심에 KIOST 장비가 아닌 가고시마대학교의 3D-ACM을 계류하였고, 관측 간격이 1시간으로 설정되었다.

각 단층 해류계에서 첫 해에 관측한 유속을 보면 쿠로시오 주축에 가까운 KCM1의 1000 m 수심에서는 북향류와 남향류가 고루 나타나지만 1500 m 수심에서는 남향류가 주로 나타나는 것을 볼 수 있다(그림 3.1.16). 상층부 쿠로시오가 강할 때 깊은 수심층에서 반대 방향의 남향류가 크게 나타나는 경향은 HYCOM 재분석장에서도 나타났던 특징이다. 쿠로시오 주축에서 남동쪽으로 떨어져 있는 KCM2에서 관측된 유속의 경우, 1000 m 수심에서는 KCM1과 비슷하게 북향류와 남향류가 고루 나타나지만 1500 m 수심에서는 강한 북향류가 상대적으로 꾸준하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

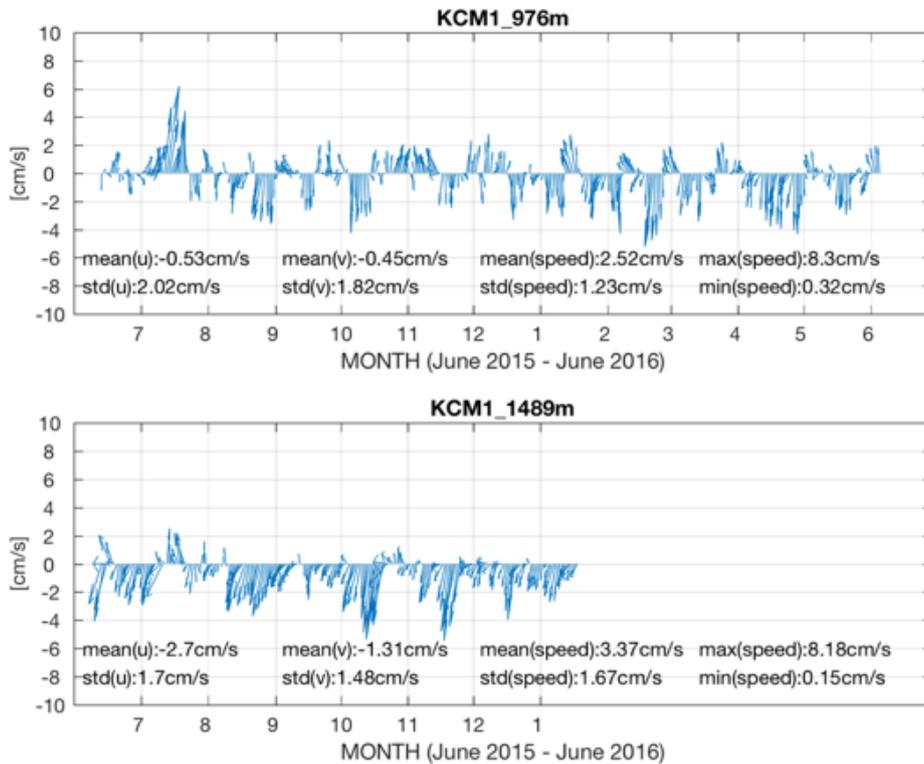


그림 3.1.16. 2015년 6월에서 2016년 6월까지 KCM1의 단층 해류계에서 관측한 유속(평균 수심 약 1000 m와 1500 m).

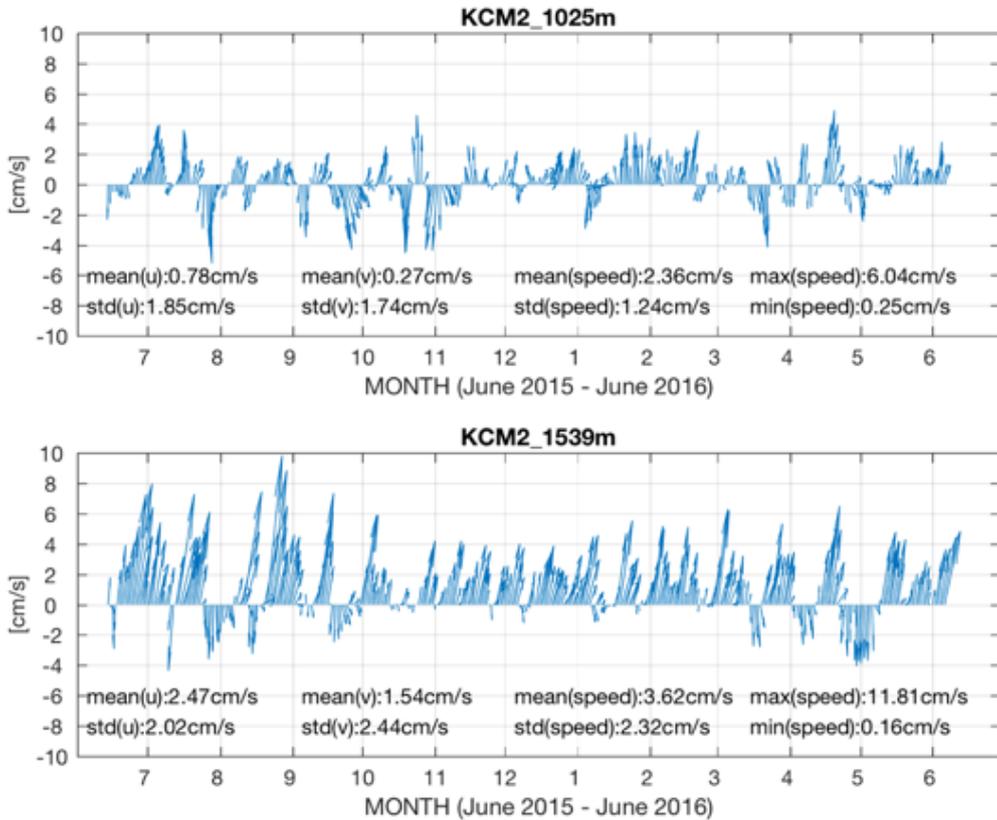


그림 3.1.17. 2015년 6월에서 2016년 6월까지 KCM2의 단층 해류계에서 관측한 유속(평균 수심 약 1000 m와 1500 m).

단층 해류계를 이용하여 두 번째 해에 관측한 유속을 보면 쿠로시오 주축에 가까운 KCM1의 1000 m 수심과 1500 m 수심에서 모두 남향류가 주로 나타나고 있다(그림 3.1.18). 이러한 남향류는 더 깊은 수심인 1500 m에서 더 강하게 나타나는 특징을 보인다. KCM2에서는 KCM1에 비해 약한 유속이 나타나며 1000 m와 1500 m 수심에서 북향류와 남향류가 고루 나타나고 있다. 북향류 성분은 1000 m에서 조금 더 강하게 나타나는 경향이 보인다.

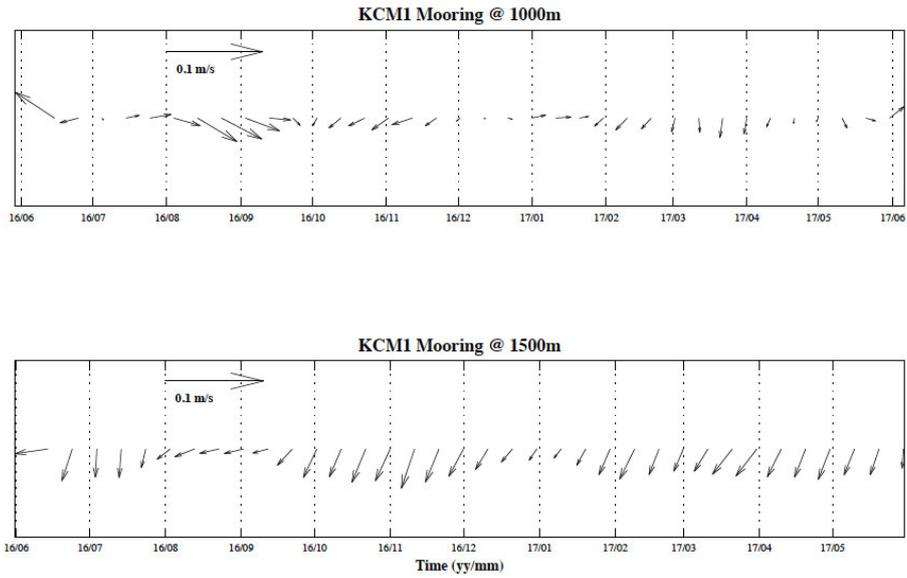


그림 3.1.18. 2016년 6월에서 2017년 6월까지 KCM1의 단층 해류계에서 관측한 유속(평균 수심 약 1000 m와 1500 m).

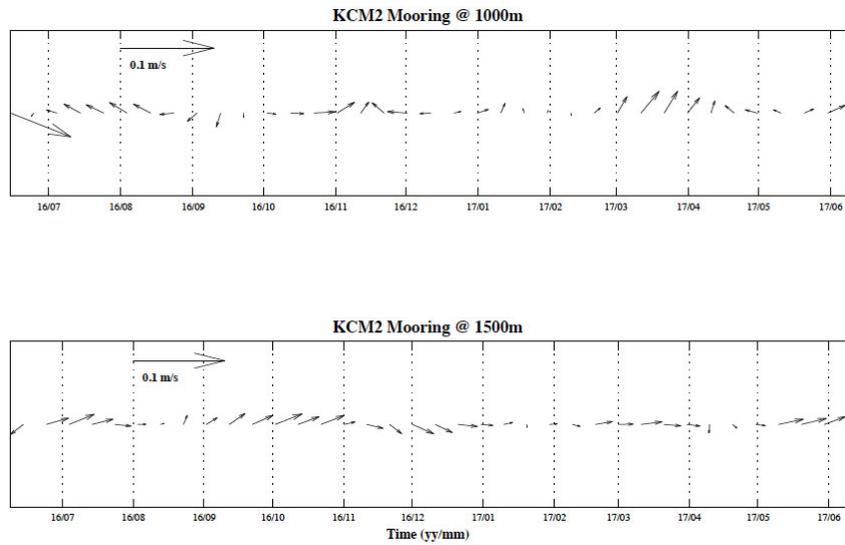


그림 3.1.19. 2016년 6월에서 2017년 6월까지 KCM2의 단층 해류계에서 관측한 유속(평균 수심 약 1000 m와 1500 m).

3. PIES 관측

PIES (Pressure recording inverted echo sounder)는 해저에 계류하여 음파를 통해 해저-해수면을 왕복하는 시간을 측정하고, 압력과 수온도 측정하는 장비이다. CPIES (Current and Pressure recording inverted echo sounder)는 해저에서 50 m 상층에 단층 유속계를 추가로 부착하여 유속도 함께 측정할 수 있는 장비이다. C/PIES에서 얻은 음파 왕복시간 (Tau)과 해저 압력(Pbot) 원시자료는 위탁과제를 통해 통계처리법을 이용하여 변환하였다. 그림 3.1.20은 관측 지점의 수심, 그림 3.1.21은 관측 해역에 설치한 유속계 및 C/PIES의 위치를 연직 단면으로 보여준다.

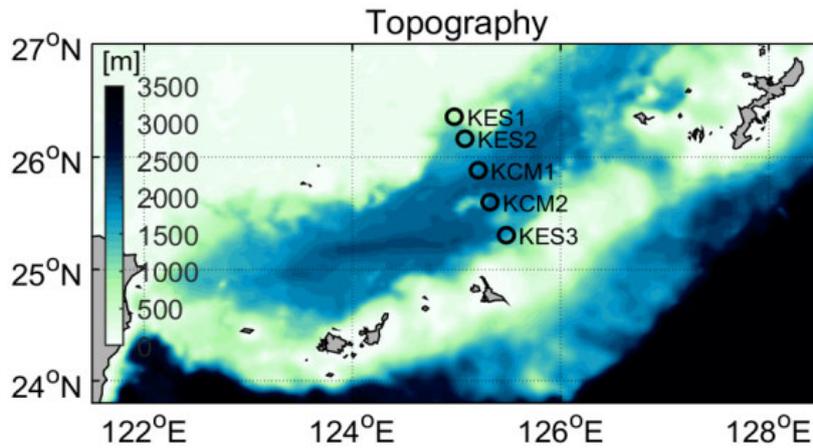


그림 3.1.20. PIES 계류 정점(KES1, KES2, KES3)과 유속계(ADCP+Current meter) 정점(KCM1, KCM2). 쿠로시오 중심축은 KCM1에 주로 위치.

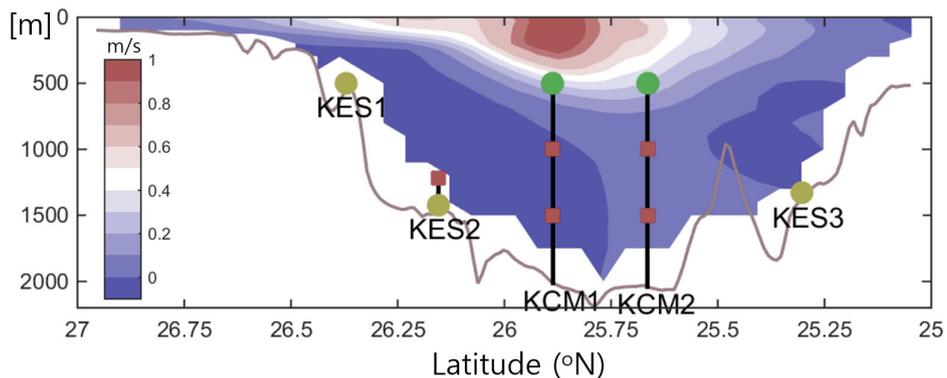


그림 3.1.21. 유속계류선 및 PIES/CPIES 계류점. KES1과 KES3는 PIES를 KES2는 CPIES를 계류. KCM1과 KCM2에는 상층 약 500 m에 위쪽을 향하는 75kHz ADCP와 1000, 1500 m 수심에 단층 측정 유속계를 설치. 색은 자료동화 모형 HYCOM에서 나타난 2004~2010년 평균 동서방향 유속.

Tau와 Pbot 원시자료의 후처리를 위해 Tau 및 Pbot 값에 window, despiking, detide, dedrift 과정을 거쳐 자료의 에러를 제거하고 조석주기의 단주기 성분을 제거하였다 (Inverted Echo Sounder Data Processing Manual; Kennelly *et al.*, 2007). 그림 3.1.22, 3.1.25, 3.1.28은 KES1, KES2, KES3의 Tau, Pbot 원시자료이며, 그림 3.1.23, 3.1.26, 3.1.29는 KES1, KES2, KES3의 Tau, Pbot의 여러 요소에서 기인된 에러를 제거한 1시간 간격의 자료이다. 그림 3.1.24, 3.1.27, 3.1.30은 정점 에러를 제거한 KES1, KES2, KES3의 Tau, Pbot 자료에 3일 low-pass 필터링을 적용하여 단주기 성분을 제거한 것이다. 음파속도는 염분보다 수온에 민감한 함수로, 온도가 높아지면 음파 속도가 빨라지고, 온도가 낮아지면 음파 속도가 감소한다. KES1, KES2, KES3의 Tau로부터 쿠로시오 변동에 따른 수온의 변화가 있음을 유추할 수 있으며, 이를 통하여 쿠로시오 변동을 살펴볼 수 있다.

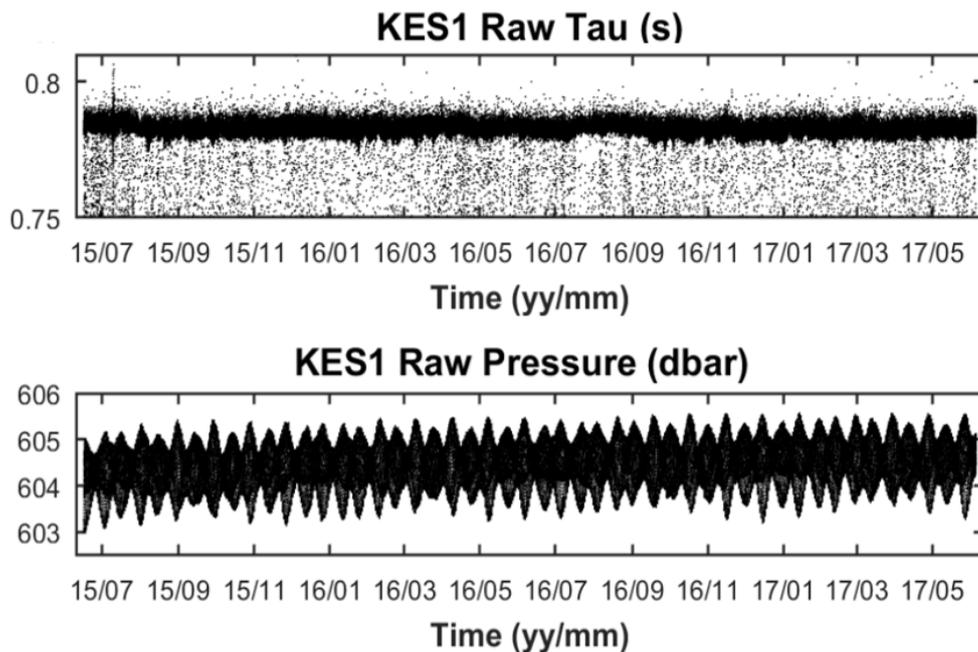


그림 3.1.22. KES1의 Tau와 Pbot 원시자료. Tau에서 많은 잡음(noise)이 나타남.

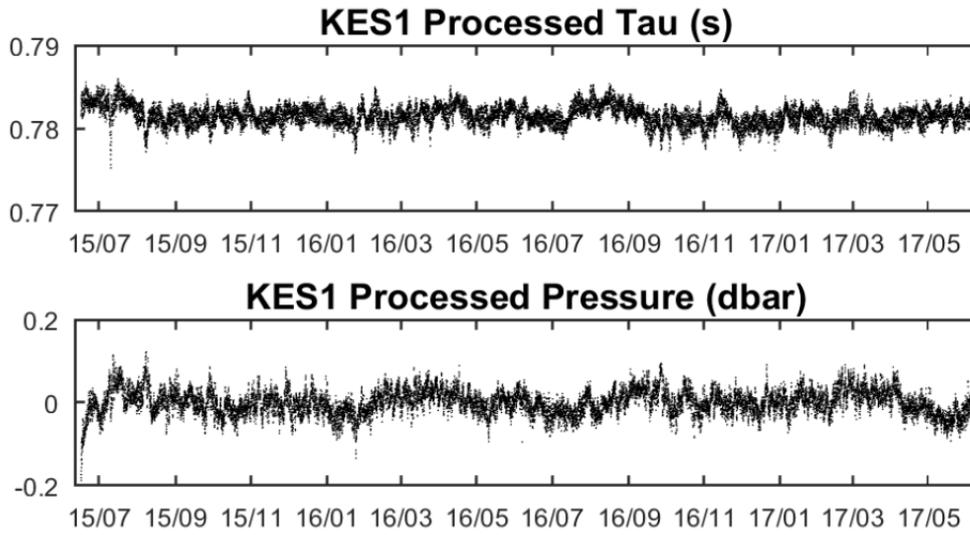


그림 3.1.23. KES1의 Tau와 Pbot 원시자료를 window, despiking, detide, dedrift 보정한 1시간 간격 자료.

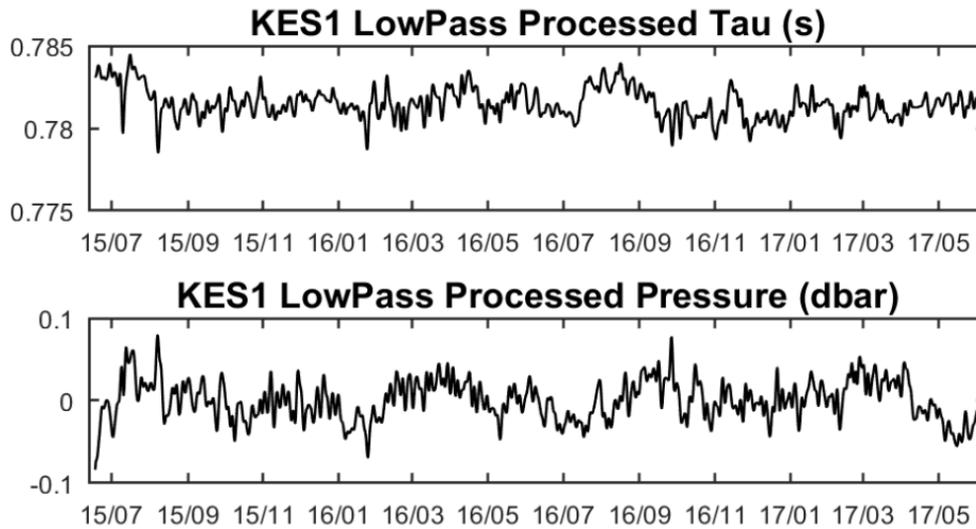


그림 3.1.24. KES1의 Tau와 Pbot 보정한 자료를 3일 low-pass 필터링한 자료.

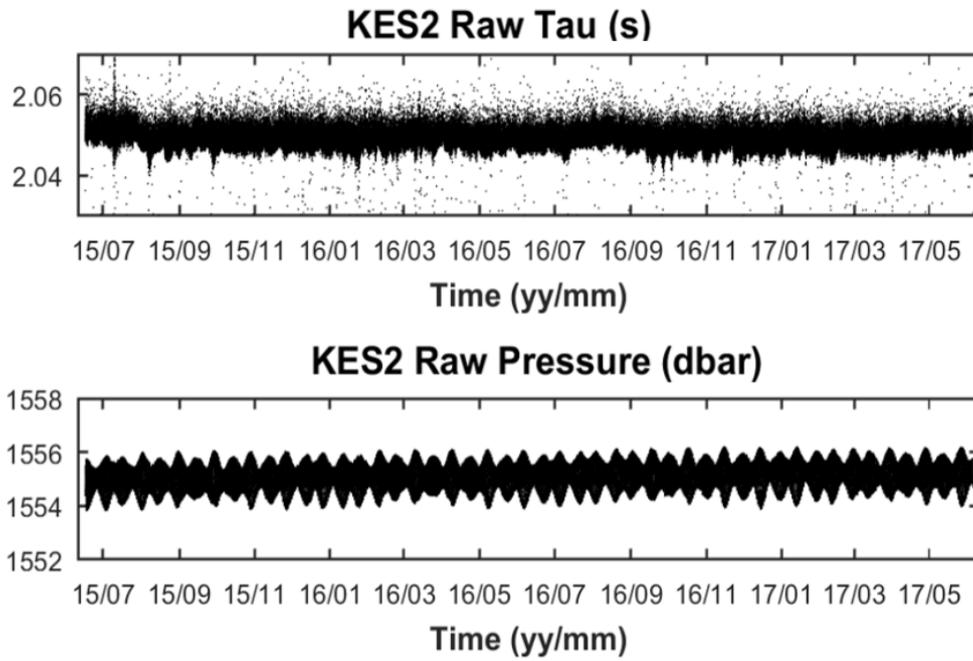


그림 3.1.25. KES2의 Tau와 Pbot 원시자료. Tau에서 많은 잡음(noise)이 나타남.

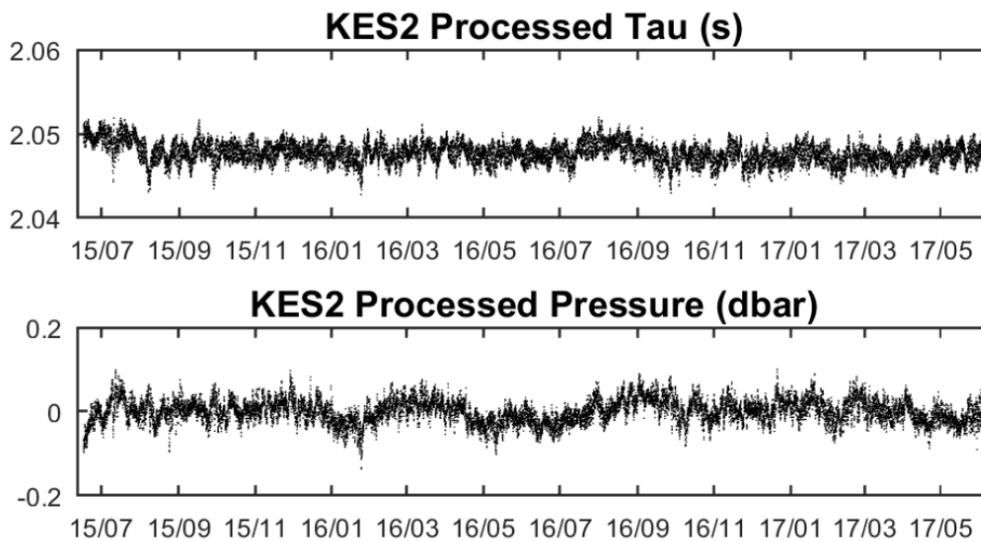


그림 3.1.26. KES2의 Tau와 Pbot 원시자료를 window, despiking, detide, dedrift 보정한 1시간 간격 자료.

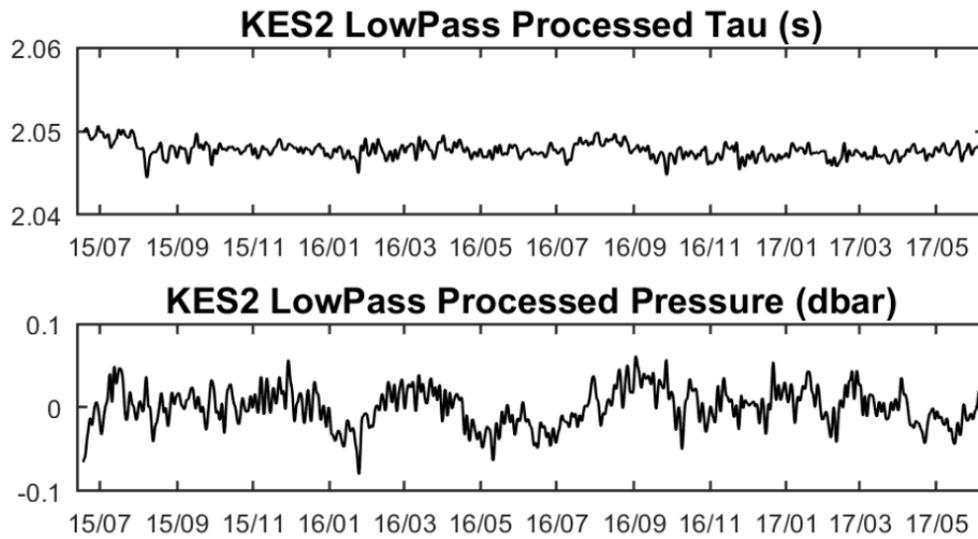


그림 3.1.27. KES1의 Tau와 Pbot 보정한 자료를 3일 low-pass 필터링한 자료.

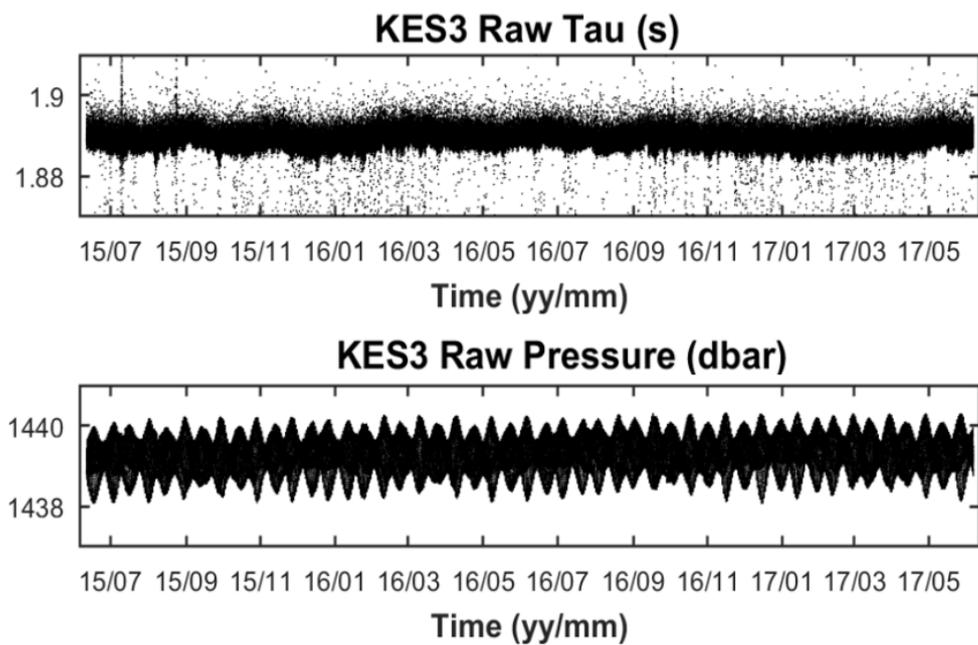


그림 3.1.28. KES3의 Tau와 Pbot 원시자료. Tau에서 많은 잡음(noise)이 나타남.

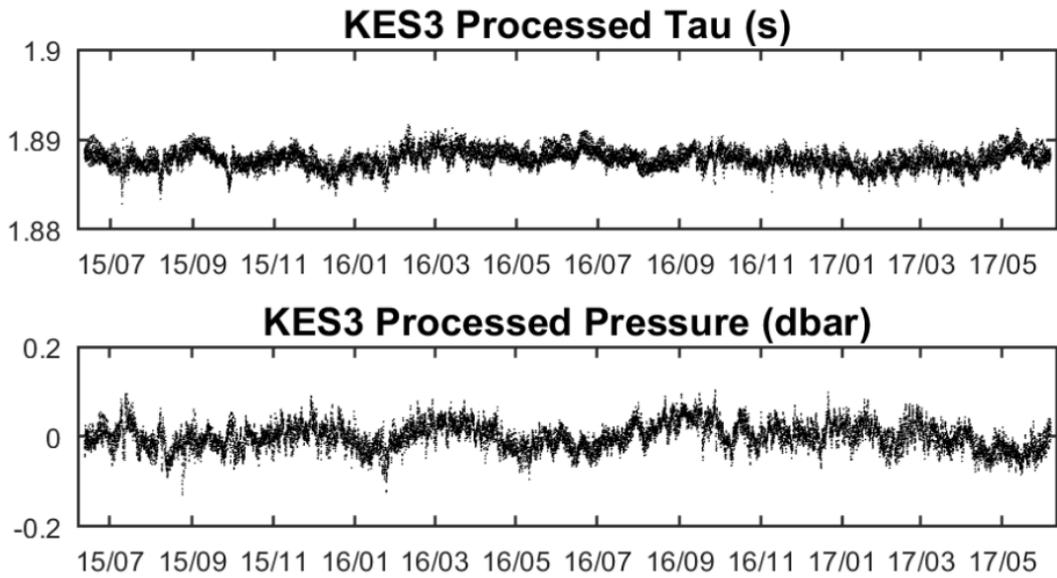


그림 3.1.29. KES3의 Tau와 Pbot 원시자료를 window, despiking, detide, dedrift 보정한 1시간 간격 자료.

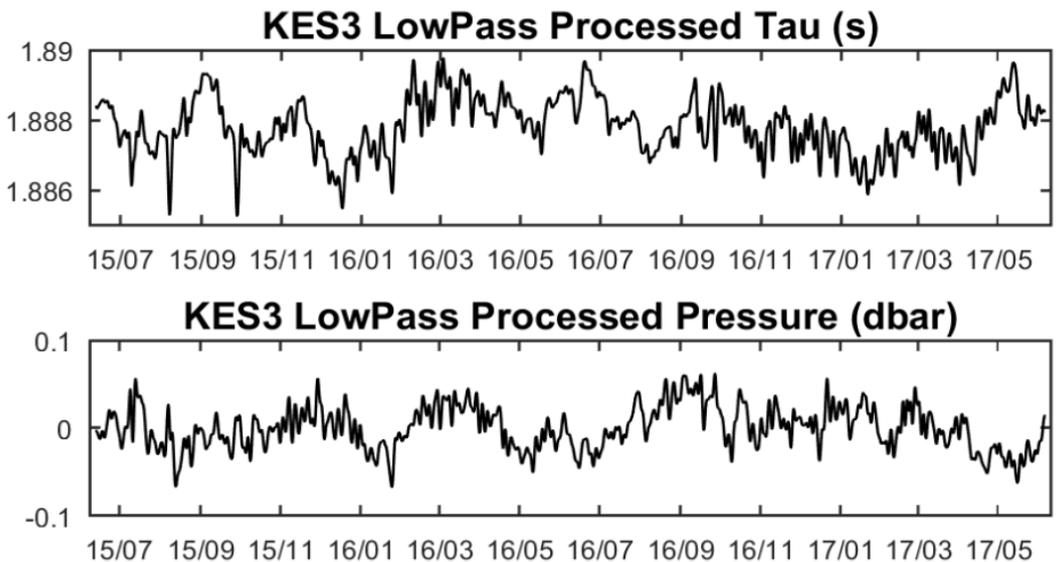


그림 3.1.30. KES3의 Tau와 Pbot 보정한 자료를 3일 low-pass 필터링한 자료.

위와 같이 후처리를 거친 Tau, 바닥 수온, 압력 자료를 그림 3.1.31~3.1.33에서 보여주고 있다. Travel time의 경우 KES1과 KES2의 변동이 KES3보다 크게 나타난 점으로부터 쿠로시오 변동이 KES1과 KES2사이에서 더 활발했음을 유추할 수 있다. 압력(Pbot)은 KES1, KES2, KES3에서 매우 비슷한 변동성을 보여, 세 정점을 모두 포함하는 큰 공간규모의 변동이 존재함을 암시한다.

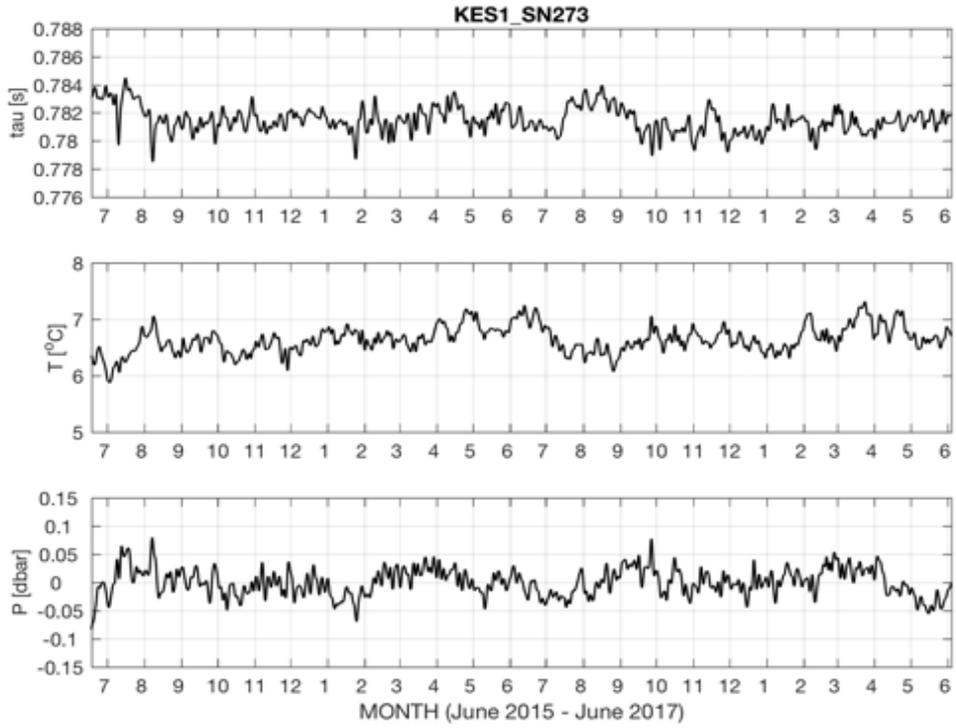


그림 3.1.31. KES1에서 관측한 travel time, 수온, 압력.

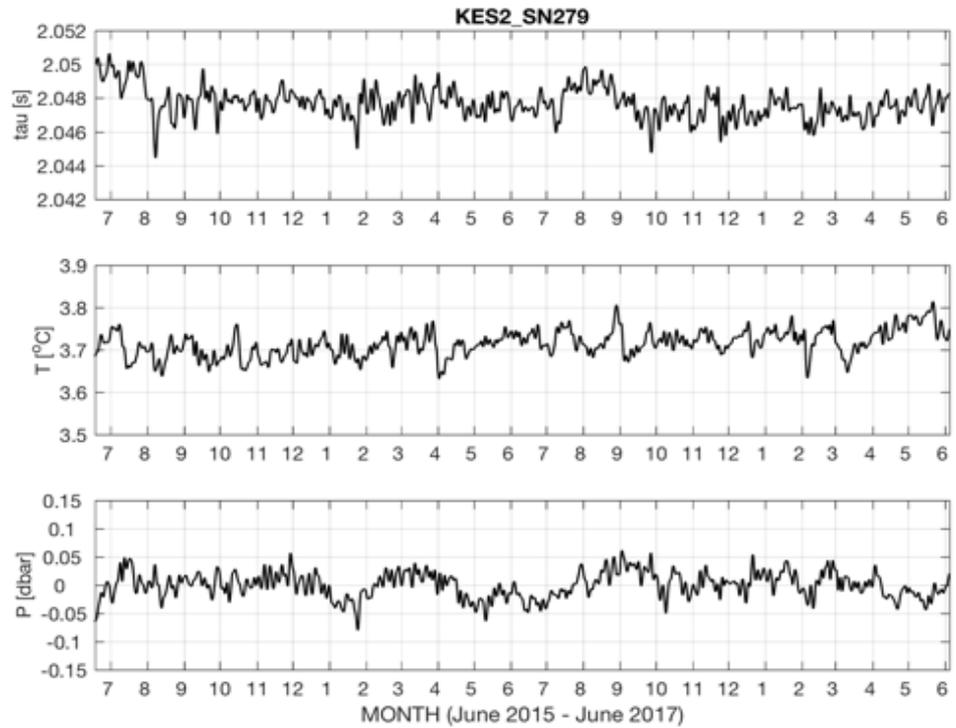


그림 3.1.32. KES2에서 관측한 travel time, 수온, 압력.

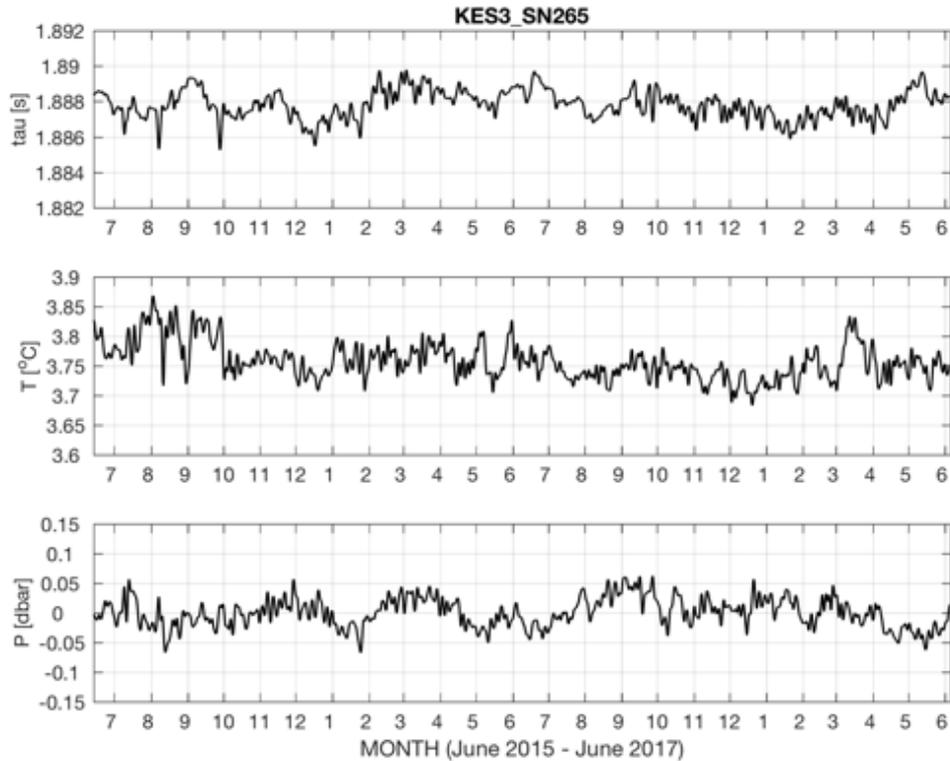


그림 3.1.33. KES3에서 관측한 travel time, 수온, 압력.

과거 이 해역에서 얻어진 수온, 염분 자료를 모아서 수직 프로파일과 travel time과의 상관관계에 대한 경험 테이블을 만들면, travel time의 시계열 자료를 수온이나 밀도의 수직 프로파일 시계열 자료로 변환할 수 있다. 이를 위해 Levitus *et al.* (2009)이 bias correction을 적용한 EN4.2.0 자료를 사용하였다(quality controlled subsurface ocean temperature and salinity profiles, Good *et al.*, 2013). 동중국해 오키나와 해구 지역에서 과거 80년간 수집된 700 m보다 깊은 수심 자료들 중에서 품질검사(quality control)를 통과한 프로파일을 선별하였고, 이 중에서 관측 해역에 해당하는 파란색 박스를 설정하여 총 1084개 프로파일을 선택하였다(그림 3.1.34). 변수 사이의 상관관계를 구할 때 진폭이 큰 계절 변동을 제거한 후 계산하기 위해, 선택한 과거 자료의 상층부 각 수심별로 수온과 밀도의 계절 변동을 추출하였다(그림 3.1.35).

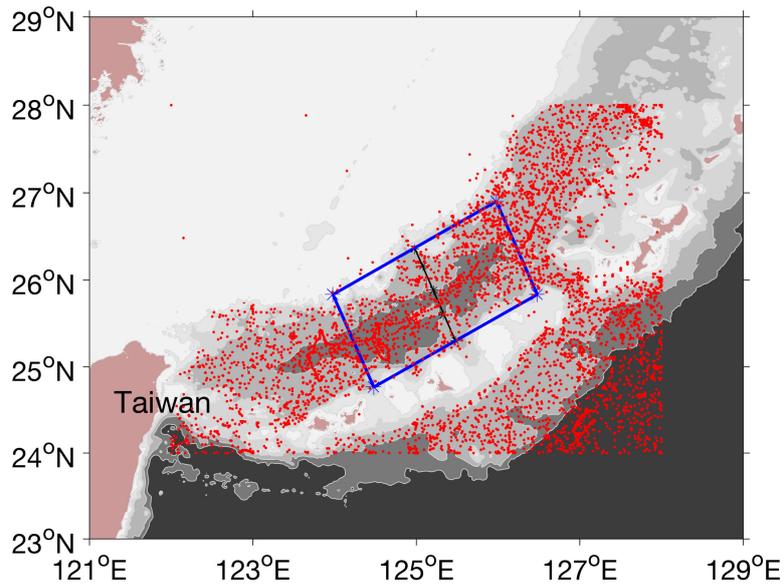


그림 3.1.34. 과거 80년간 자료 중 품질 검사를 통과한 700 m 이상 수직 프로파일 위치.

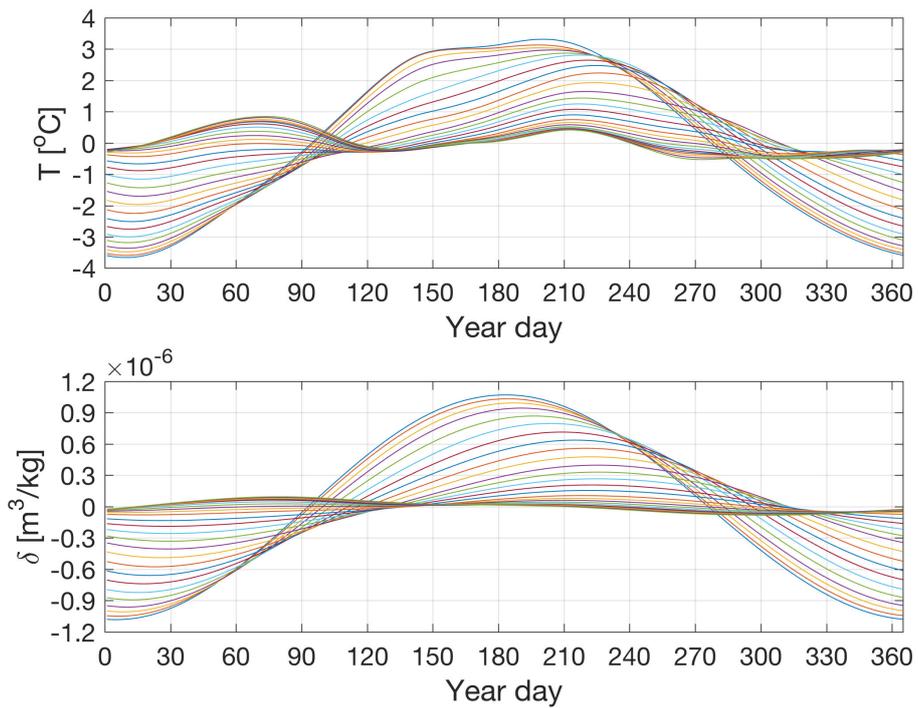


그림 3.1.35. 과거 자료로부터 계산한 상층부 수온과 밀도의 계절 변동.

그림 3.1.36은 과거 수온, 염분 자료로부터 계산한 상층 700 dbar travel time의 계절 변동을 보여주고 있다. 그리고 그림 3.1.37은 상층 700 dbar travel time과 수심별 수온 사이

의 상관 관계를 보여주고 있다. 수온약층이 존재하는 수심 약 300 dbar까지 높은 상관관계를 보여주어, travel time이 수직 수온 구조의 변동을 잘 반영할 수 있음을 나타낸다. 그림 3.1.38과 3.1.39에서 결과적으로 구성한 수온과 밀도의 GEM field를 보여주고 있다.

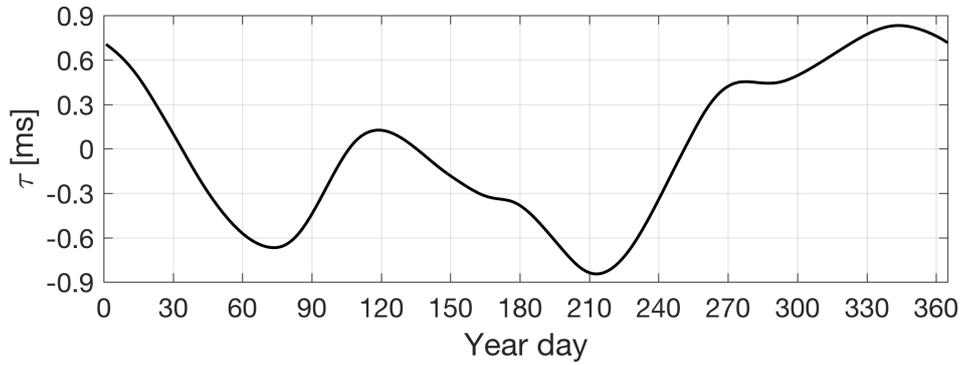


그림 3.1.36. 과거 자료로부터 계산한 상층 700 dbar travel time.

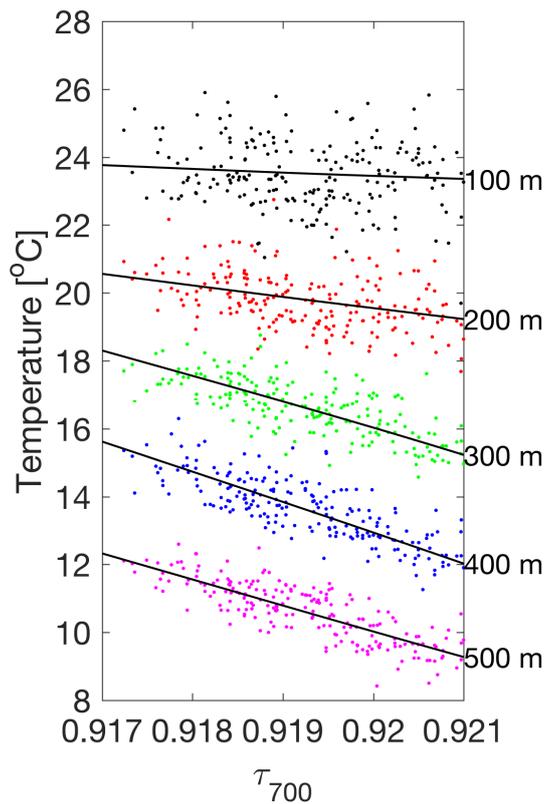


그림 3.1.37. 상층 700 dbar travel time과 수심별 수온 사이의 상관 관계.

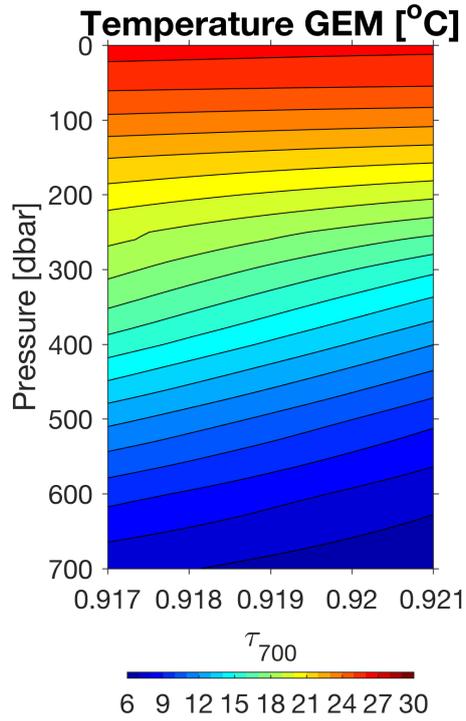


그림 3.1.38. 상층 700 dbar 수온 GEM.

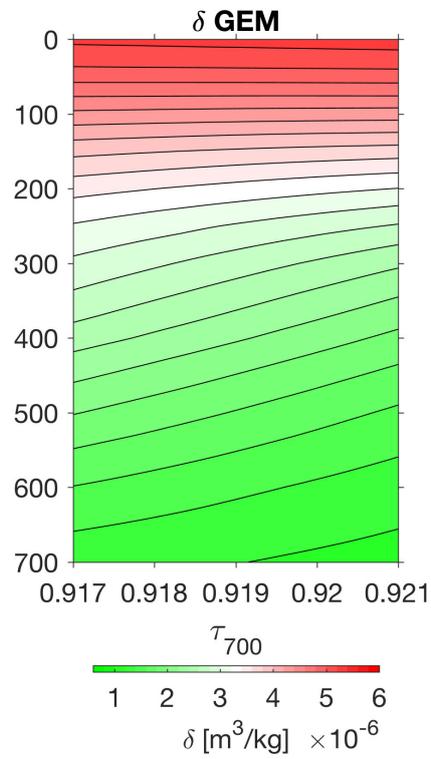


그림 3.1.39. 상층 700 dbar 밀도 GEM.

그림 3.1.40, 3.1.41, 3.1.42에서는 과거 자료로부터 계산한 700 dbar travel time과 관측된 수심에서의 travel time 사이의 선형 상관관계를 보여주고 있다. 여기에서 구한 선형식을 사용하여 관측된 travel time을 700 dbar travel time으로 변환하고, 위의 GEM field를 이용하여 수직 프로파일의 시계열을 구할 수 있다.

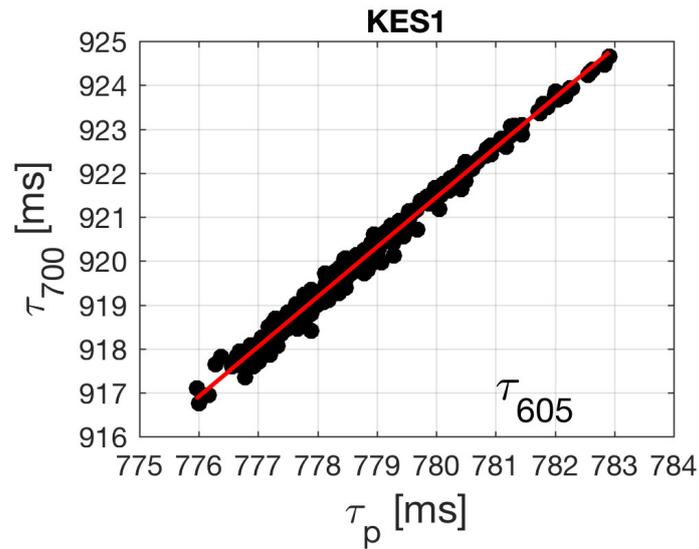


그림 3.1.40. 관측한 605 dbar travel time과 700 dbar travel time 사이의 상관관계.

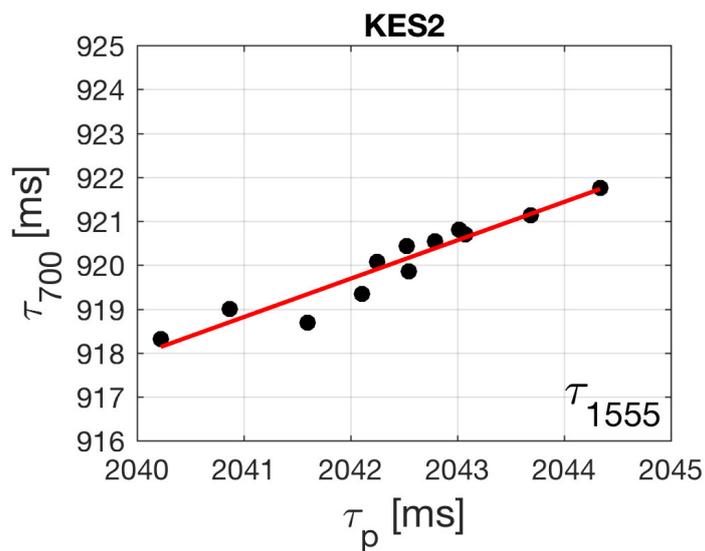


그림 3.1.41. 관측한 1555 dbar travel time과 700 dbar travel time 사이의 상관관계.

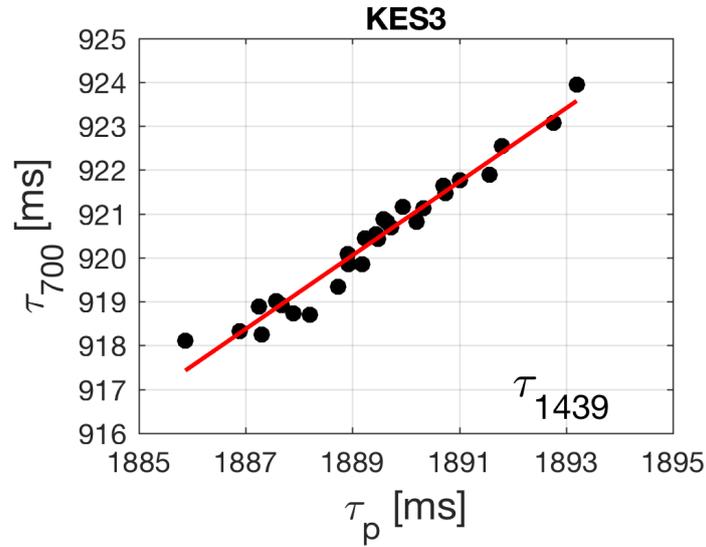


그림 3.1.42. 관측한 1439 dbar travel time과 700 dbar travel time 사이의 상관 관계.

4. 현장 관측 쿠로시오 변동성

그림 3.1.43은 쿠로시오 주축 근처인 KCM1 지점 tall mooring line의 ADCP에서 관측한 유속을 보여준다. MY-라인에 수직한 방향으로 회전하여 북동쪽 방향의 유속이 양의 부호를 가지도록 하였으며, 72시간 low-pass 필터링한 유속 변동성을 보면 2년 계류 기간 동안 쿠로시오의 시간 변동성을 살펴볼 수 있다. 상층 약 400 m까지 북동향류가 지배적으로 나타나는데, 2016년 8월과 2017년 1월에 특히 강한 유속이 나타났음을 알 수 있다. MY-라인에 평행한 방향의 유속은 수직 성분보다 전반적으로 약하지만, 수직한 방향의 유속이 강할 때 평행 성분도 강해지는 것을 볼 수 있다(그림 3.1.44). 즉 쿠로시오 유속이 강해질수록 offshore shift의 특징을 나타내는 것으로 보인다. KCM1과 KCM2에서 관측한 유속을 종합하여 쿠로시오 수송량 index를 계산한 결과는 그림 3.1.45에서 보여준다. 2015년 6월부터 2017년 6월까지 만 2년의 계류 기간 동안 다양한 주기의 변동이 보이며 전반부에 비해 후반부에 수송량이 전반적으로 감소하였음을 알 수 있다.

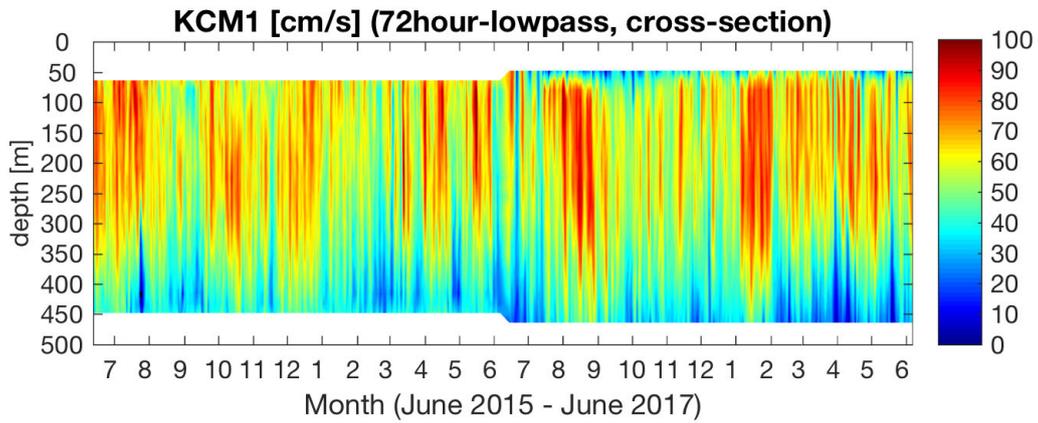


그림 3.1.43. 2년 계류 기간 동안(2015년 6월~2017년 6월) KCM1 지점 ADCP 관측 MY-라인에 수직한 방향의 유속 성분.

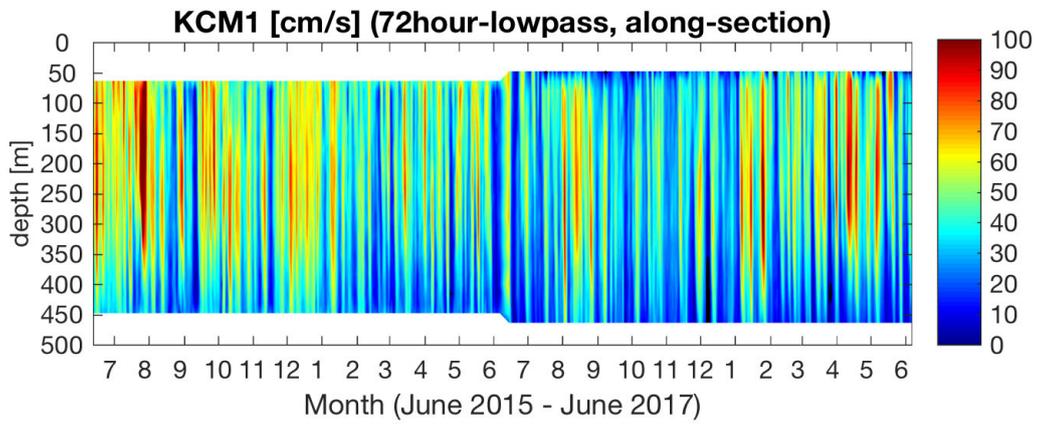


그림 3.1.44. 2년 계류 기간 동안(2015년 6월~2017년 6월) KCM1 지점 ADCP 관측 MY-라인에 평행한 방향의 유속 성분.

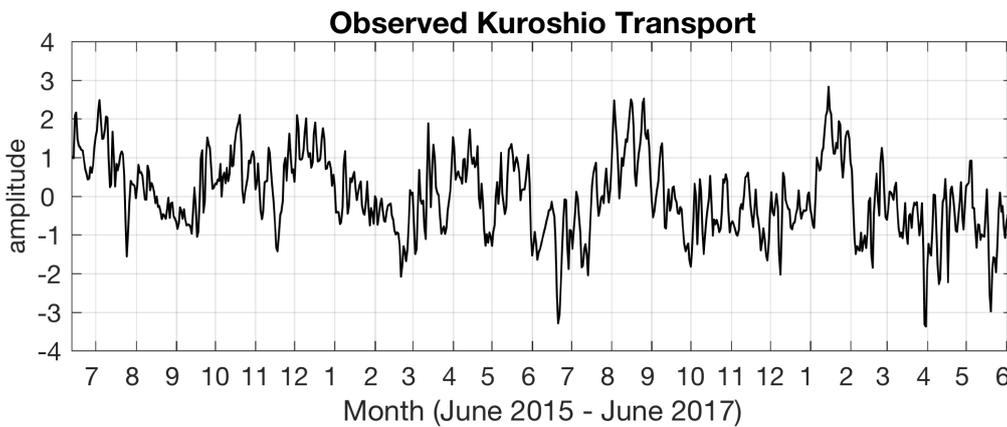


그림 3.1.45. 2년 계류 기간 동안(2015년 6월~2017년 6월) KCM1 지점 ADCP 관측 MY-라인에 평행한 방향의 유속 성분.

쿠로시오 수송량 index의 시간 변동이 인공위성 관측 해면고도와 어떤 상관성을 보이는지 알아보기 위해 2년 관측 자료가 있는 기간 동안 composite analysis를 수행하였다. 정규화된 index가 표준편차 1보다 크거나 -1보다 작을 때는 총 724일 중에 각각 120일과 102일에 해당한다. 이 기간 동안 각각 평균한 해면고도 편차를 그림 3.1.46에서 보여주고 있다. Positive composite의 경우 관측라인의 동쪽으로 양의 해면고도 편차가 있어 북동쪽으로의 유속, 즉 강한 쿠로시오와 물리적 일관성을 나타낸다. Negative composite의 경우에는 positive composite에 있는 양의 해면고도 편차가 보이지 않으며, 관측라인의 서쪽보다 동쪽의 해면고도가 낮게 나타남을 볼 수 있다. 두 경우 모두 류큐열도의 동쪽인 북서태평양 쪽으로 중규모 소용돌이의 형태가 나타나는 것으로 보아 해면고도 편차가 중규모 소용돌이와 관련되어 있음을 알 수 있다. 그림 3.1.47에서 해면고도의 composite analysis 결과를 보면 쿠로시오 수송량이 클 때 북서태평양 해역의 해면고도가 높고 등고도선 사이의 간격이 조밀하게 나타난다. 쿠로시오 수송량이 작을 때는 클 때와 비교하여 북서태평양 해역의 해면고도가 낮으며 등고도선 사이의 간격이 넓어져서 지형류 관계성을 잘 반영함을 알 수 있다.

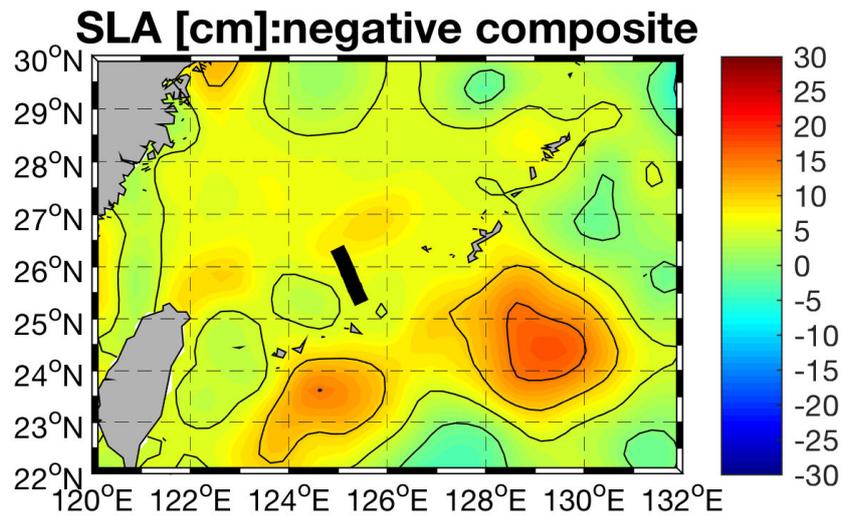
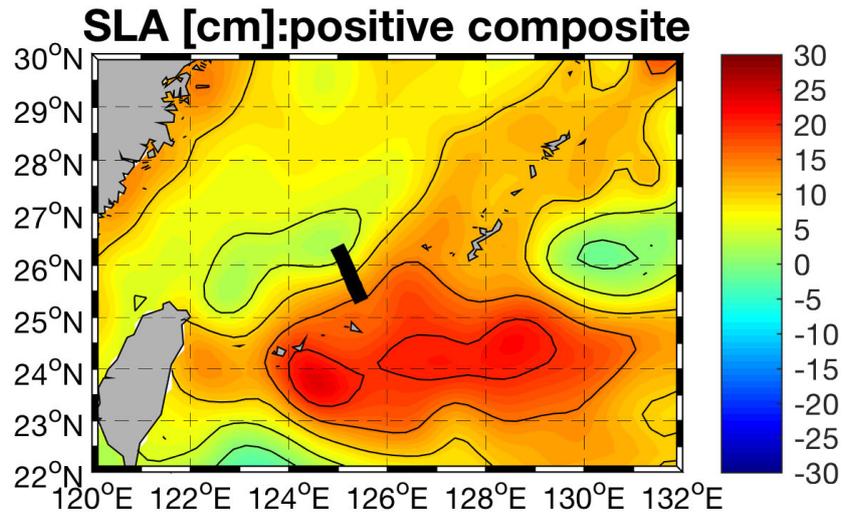


그림 3.1.46. 2년 관측수송량이 클 때(724일 중 120일)와 2년 관측수송량이 작을 때(724일 중 102일) 해면고도 편차의 평균. 동중국해 쿠로시오 현장 관측 위치는 검은색 막대로 표시함.

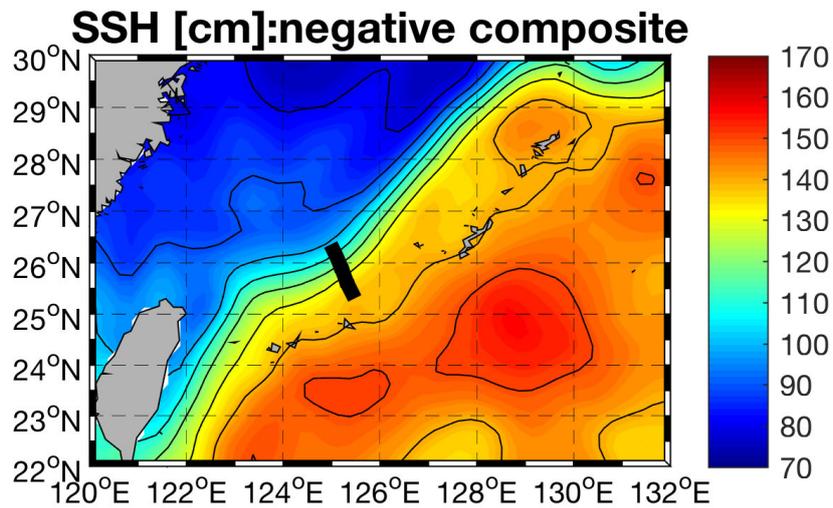
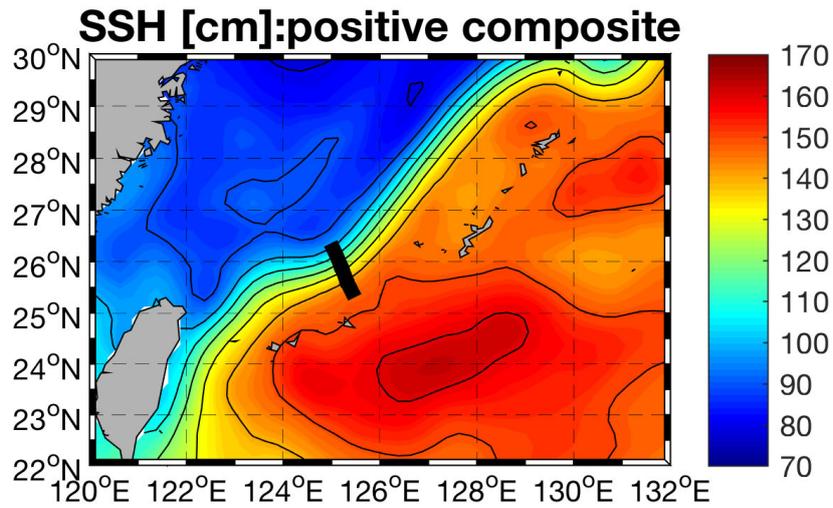


그림 3.1.47. 2년 관측수송량이 클 때(724일 중 120일)와 2년 관측수송량이 작을 때(724일 중 102일) 해면고도 평균. 동중국해 쿠로시오 현장 관측 위치는 검은색 막대로 표시함.

5. 쿠로시오 장기 변동성

2년 관측 쿠로시오 수송량과 해면고도 편차, 해면고도 사이의 상관성으로부터 관측 수송량과 상관성이 우수한 인공위성 해면고도차를 계산할 수 있다. 현장 관측 지점 주변의 인공위성 고도계 자료 격자들 중에서 우수한 상관성을 보이는 격자를 택하여 해면고도차를 계산하였다(그림 3.1.48의 붉은색 별). 그 결과로 그림 3.1.49에서 2년 관측 쿠로시오 수송량과 인공위성 해면고도차로부터 계산한 시계열을 비교하고 있다.

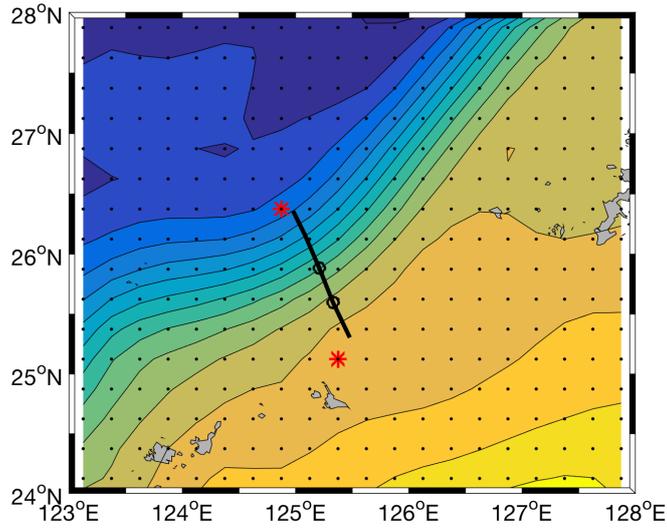


그림 3.1.48. 쿠로시오 유속 현장관측 지점과(검은 실선) 인공위성 고도계 자료 격자 위치(검은색 점), 선택한 격자는 붉은색 별표 표시함. 바탕색은 관측 기간 동안의 인공위성 관측 해면고도.

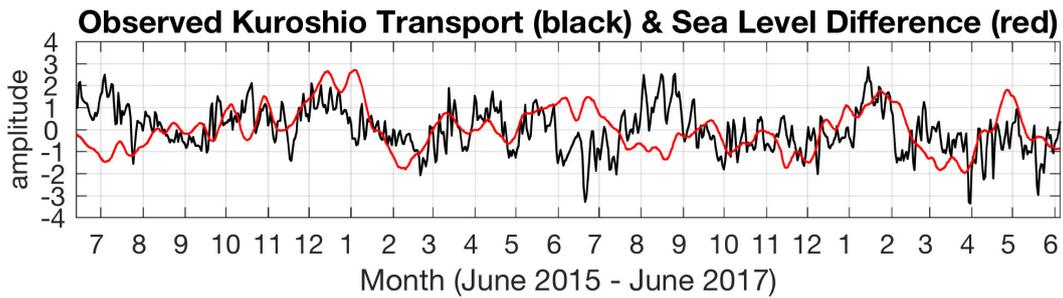


그림 3.1.49. 2년 관측 쿠로시오 수송량과(검은색) 인공위성 해면고도차(붉은색).

이렇게 2년 자료로 구한 상관성으로부터 인공위성 자료가 있는 1993년부터 2017년까지 25년 동안의 쿠로시오 수송량을 추정할 수 있다. 그림 3.1.50에서 25년간 연장한 쿠로시오 수송량 변화(붉은색)와 2년 현장관측 쿠로시오 수송량(검은색)을 비교하고 있다. 연평균 값을 표시한 그림 3.1.51을 보면 현장 관측 기간 동안의 수송량이 25년 대비 상대적으로 큰 값을 보였으며, 2015년에서 2017년으로 가며 감소하였음을 알 수 있다. 연평균 최저 수송량을 보인 해는 2000년과 2013년이며, 연평균 최고 수송량을 보인 해는 2015년이다. 특히 2000년은 대한해협을 통해 동해로 들어오는 대마난류의 수송량이 상대적으로 작은 값을 보였던 해이고, 이 대마난류의 기원이 동중국해 쿠로시오라고 여겨지는 만큼, 동중국해 남부역과 우리나라 주변해역 해류 변동성 사이의 상관관계에 관한 앞으로의 연구에 대해 동기 부여가 되고 있다.

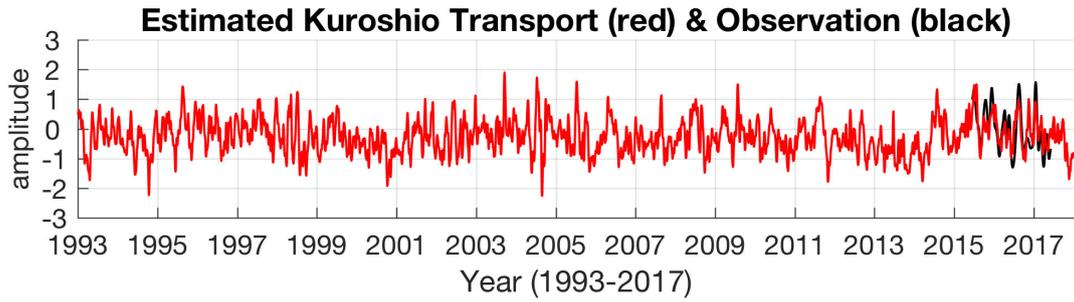


그림 3.1.50. 인공위성 해면고도차로 추정된 25년 쿠로시오 수송량(붉은색)과 2년 현장 관측 쿠로시오 수송량(검은색).

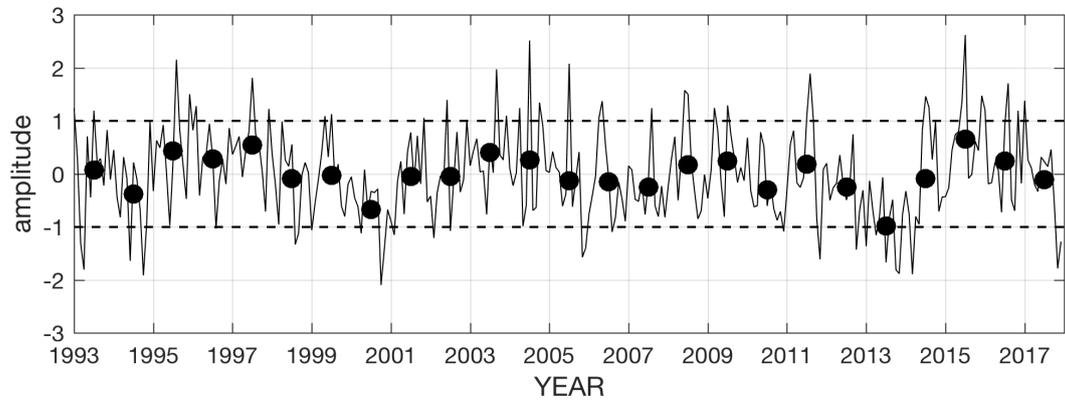


그림 3.1.51. 인공위성 해면고도차로 추정된 25년 쿠로시오 수송량의 월평균(실선)과 연평균(●).

월평균 수송량으로부터 구한 계절변동성을 보면 계절변화가 뚜렷하지는 않지만, 7월에 수송량이 크고 10~11월에 작은 경향을 보인다(그림 3.1.52). 또한 25년 길이의 월평균 쿠로시오 수송량 시계열의 주기성을 분석해보면, 약 60~100일 주기의 변동이 통계적으로 유의하게 나타난다(그림 3.1.53). 이는 중규모소용돌이 관련 주기로, 앞서 쿠로시오 수송량을 바탕으로 한 해면고도 편차의 composite analysis에서 나타났던 중규모 소용돌이와의 연관성에 대한 연구의 출발점이 될 수 있다.

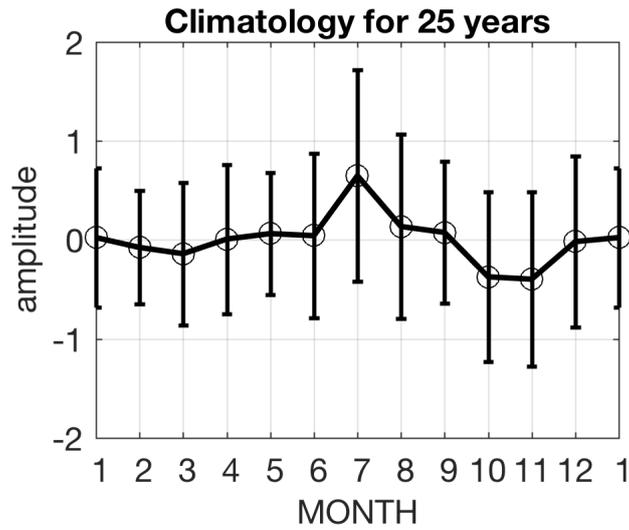


그림 3.1.52. 인공위성 해면고도차로 추정된 25년 쿠로시오 수송량의 계절변동성. 수직 실선은 각 월 자료의 경년 표준편차를 나타냄.

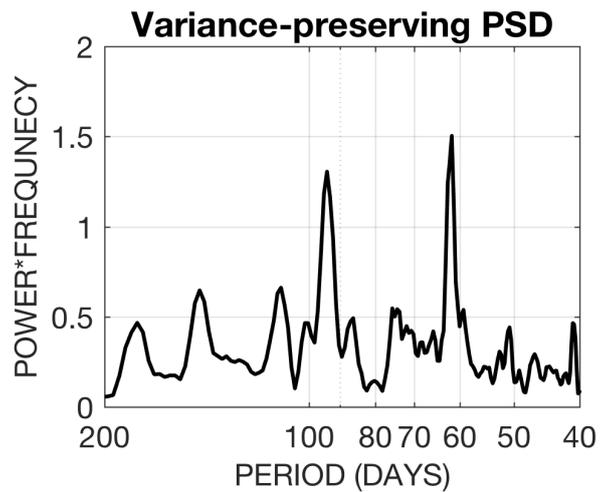


그림 3.1.53. 인공위성 해면고도차로 추정된 25년 쿠로시오 수송량 시계열의 주기분석 결과.

제 2 절 동중국해 동북부역 관측

동중국해 동북부역 하계 해수물성의 분포 특성과 미세구조 특성의 파악을 위하여 해양관측 자료를 확보하였다. 관측은 2016년 및 2017년 2회에 걸쳐 일본의 대학(큐슈대, 도야마대, 나고야대 등) 연구팀 주관으로 수행되었으며 2명의 KIOST 연구원이 참여하였다. 다음에 각 관측별로 관측 결과를 설명하였고, 2017년 항차보고서는 부록에 첨부하였다.

1. 2016년 해양 조사

가. 관측 개요

관측은 나가사키대학 실습선인 나가사키마루를 이용하여 2016년 7월 19일~28일 기간에 수행하였다. Leg-I, II로 구분하여 Leg-I(7월 20~21일)에서는 일본 EEZ 내의 해역 쓰시마해류 통과역 2개 라인의 9개 정점에서 CTD 및 TurboMAP 단면조사를 실시하였고 Leg-II(7월 21~27일)에서는 미세구조 변동 및 내부파 관측을 위한 조사를 수행하였다(그림 3.2.1). Leg-II의 관측은 2~4시간의 CTD 반복 관측, 1시간 간격의 TurboMAP 반복 관측, TRBM-ADCP 2기의 단기 계류조사 및 ADCP 계류 지점 주변의 반복 순환조사를 실시하였다.

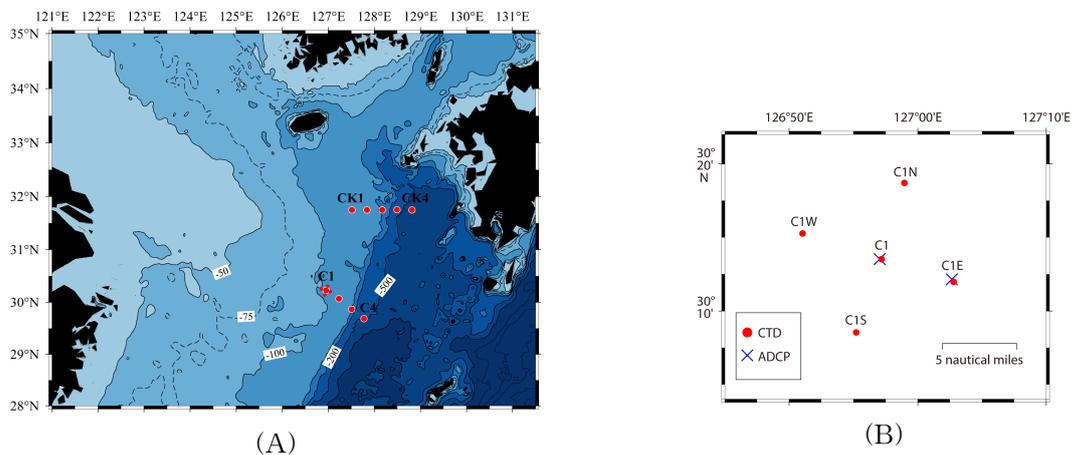


그림 3.2.1. 2016년 7월 쓰시마 해류가 통과하는 동중국해 북부의 해양조사 정점 (A) 및 정점 C1 부근의 미세구조 변동 및 내부파 관측을 위한 CTD, TurboMAP, TRBM-ADCP 정점 위치도(B).

나. 쓰시마해류 통과 해역 관측 결과(Leg-I)

그림 3.2.2에 쓰시마 해류가 통과하는 동중국해 북부 해역 표층(4 m)과 50 m, 100 m 층의 수온 및 염분의 수평분포를 나타내었다. 표층 수온은 28~30°C 범위의 고수온을 보이며 염분은 서쪽에 31 이하의 상대적으로 저염인 해수가 분포하고 있다. 50 m 및 100 m 층에는 동쪽에 고온·고염의 쓰시마해류가 통과하고, 서쪽에는 여름철 남쪽으로 확장하는 저온·저염의 황해 냉수의 영향으로 동고서저형 수평분포를 보인다. 물성 분포의 형태가 표층 수온을 제외하고 전반적으로 흐름장과 유사함을 나타내고 있다.

그림 3.2.3에 남쪽(C-라인)과 북쪽(CK-라인) 동서 단면의 수온, 염분, 난류운동에너지 소산을 수직구조를 나타내었다. TurboMAP에서 측정된 연직유속변형(shear (du/dz)) 자료로부터 아래의 식으로 난류운동에너지소산율(dissipation rate of turbulence kinetic energy; ϵ)을 계산하였다.

$$\epsilon = \frac{15}{2} \nu \overline{\left(\frac{\partial u'}{\partial z}\right)^2} = \frac{15}{2} \nu \int_{k_1}^{k_2} \Phi(k) dk$$

(ν : kinematic viscosity, $(du'/dz)^2$: variance of vertical velocity shear, $\Phi(k)$: shear spectrum)

단면 C와 CK의 수직분포에서는 표층에서 약 20 m 층까지 서쪽에서 대륙붕단 정점(C3, CK3)으로 확장한 저염수 영향이 보이며, 수심 50~150 m 사이에서 염분 최대층(>34.6)이 나타나고 있다. 대륙붕단(C3, CK3) 저층에서 저온수(염분 34.4 정도의 쿠로시오 기원 해수)가 동중국해 대륙사면역으로 용승 형태로 공급되고 있으며, 난류 소산율도 높은 점(정점 C3에서 10^{-5} ~ 10^{-6} W/kg)으로 보아 이 해역 저층 혼합이 활발한 것으로 판단된다.

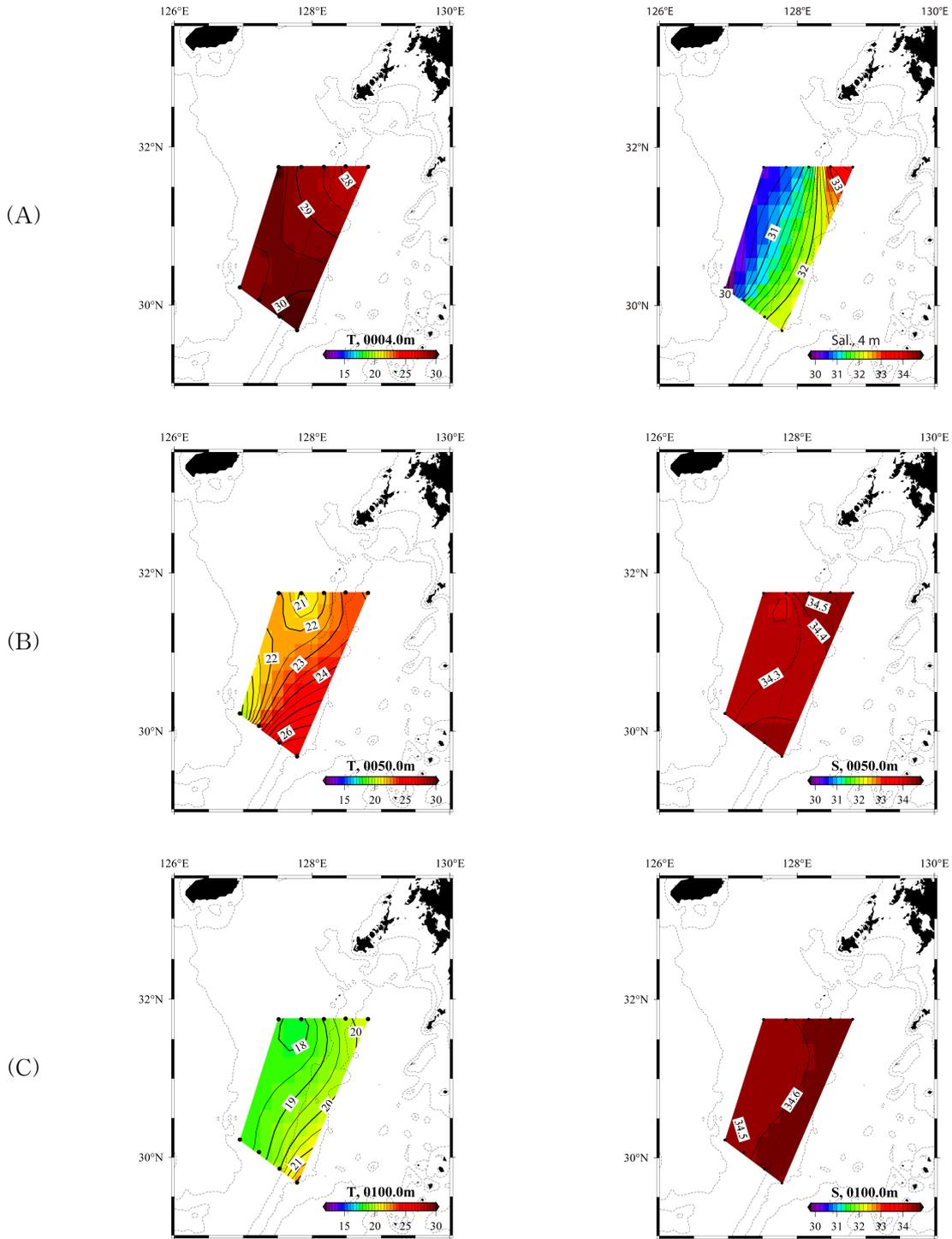


그림 3.2.2. 2016년 7월 수온(상), 염분(하)의 수평 분포도. 분포도 수심은 각각 표층(4 m)(A), 50 m(B), 100 m(C). 실선은 수온 0.5°C, 염분 0.2 간격이며, 점선은 등수심선(100, 200, 500, 1000 m)을 나타냄.

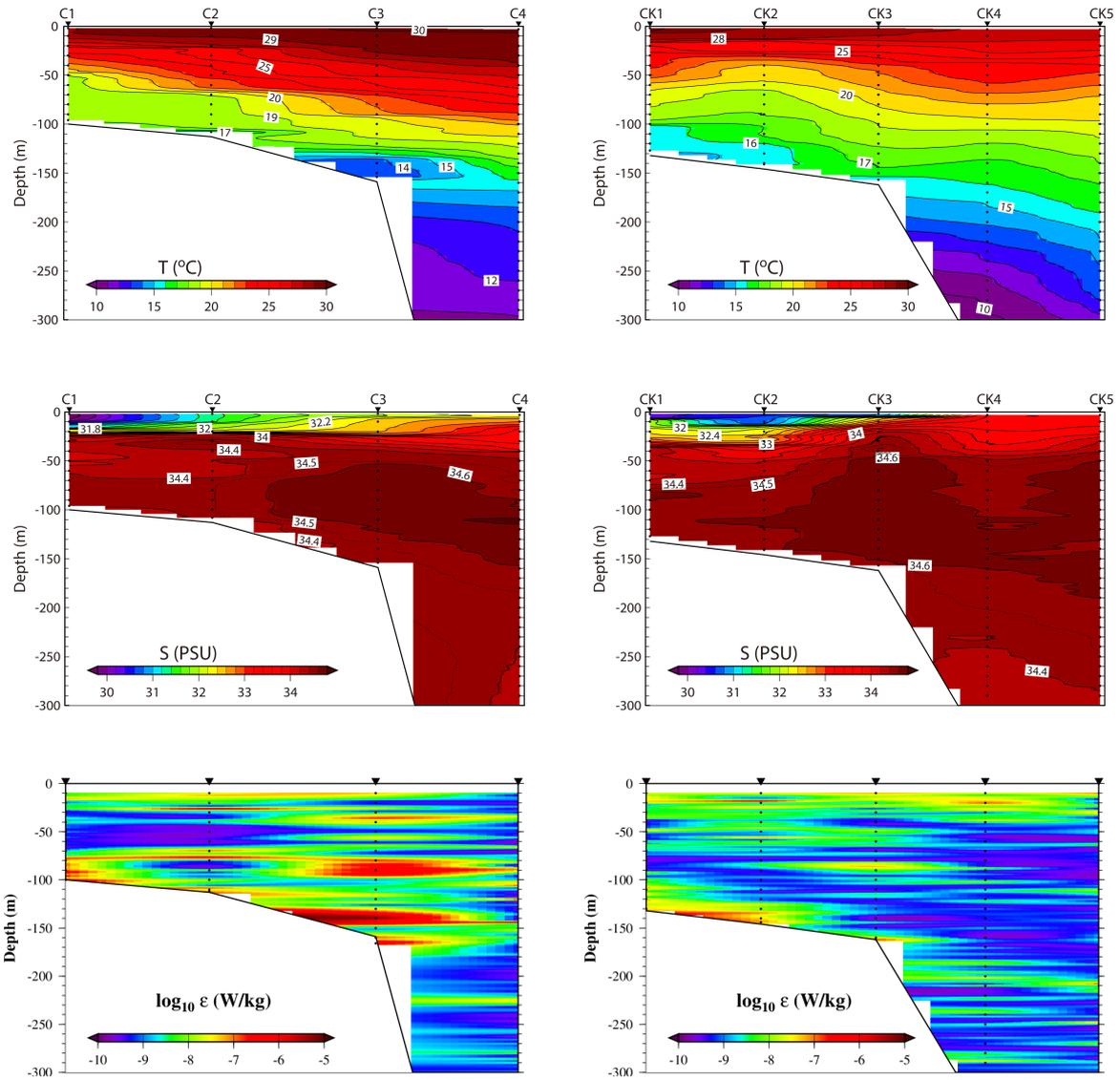


그림 3.2.3. 2개 단면(C(좌), CK-라인(우))의 수온(상), 염분(중), 난류운동 에너지 소산율(하) 수직 분포. 분포는 수심 300 m까지 나타냄. 실선은 수온 1°C, 염분 0.2 간격을 나타내며 소산율은 로그스케일임.

다. 고정점(C1) 미세구조 변동 및 내부파 관측 결과(Leg-II)

그림 3.2.4에 정점 C1에서 반복 관측한 CTD와 TurboMAP의 수온, 염분, 난류운동에너지 소산율 시계열(7월 21~26일) 수직구조 변화를 나타내었다. 조밀하게 관측한 시기에는 내부파 영향으로 보이는 성층의 시계열 변동이 나타났으며, 7월 26일에는 수온약층에서 높은 소산율을 보였고, 성층 하부에는 약하였으나, 저층에는 $10^{-5}\sim 10^{-6}$ W/kg 정도로 높은 소산율이 지속적으로 나타나 강한 저층 혼합이 있음을 알 수 있다.

그림 3.2.5에 CTD와 TurboMAP 동시 관측 기간 중 7월 25일 17:55부터 7월 26일 17:55까지 수온, 염분 및 난류소산율을 도시하였고 그림 3.2.6에 ADCP 자료의 예를 도시하였다. CTD는 2~4시간, TurboMAP은 1시간으로 관측하였고, ADCP는 10초 간격으로 측정된 것이다. ADCP 자료는 여러 차례 내부파가 있었음을 뚜렷하게 보여주고 있다. 강한 내부파는 약 2시간(7월 26일 08:30~11:30) 동안 나타났으며, 처음 강한 내부파가 발생 후 약 10~15개의 내부파가 패치(patch) 형태로 발생하고, 첫 번째 내부파 통과 후 두 번째 파가 도달하는 시간은 약 20분 정도이며, 이후 발생 주기가 점차 줄어들었음을 보여준다. 내부파가 통과하는 동안(7월 26일 08:30~11:30) 성층 내부 혼합이 강해졌으나(높은 소산율), 저층 혼합은 약화되었으며, 통과 후 성층이 깊어졌음을 알 수 있다.

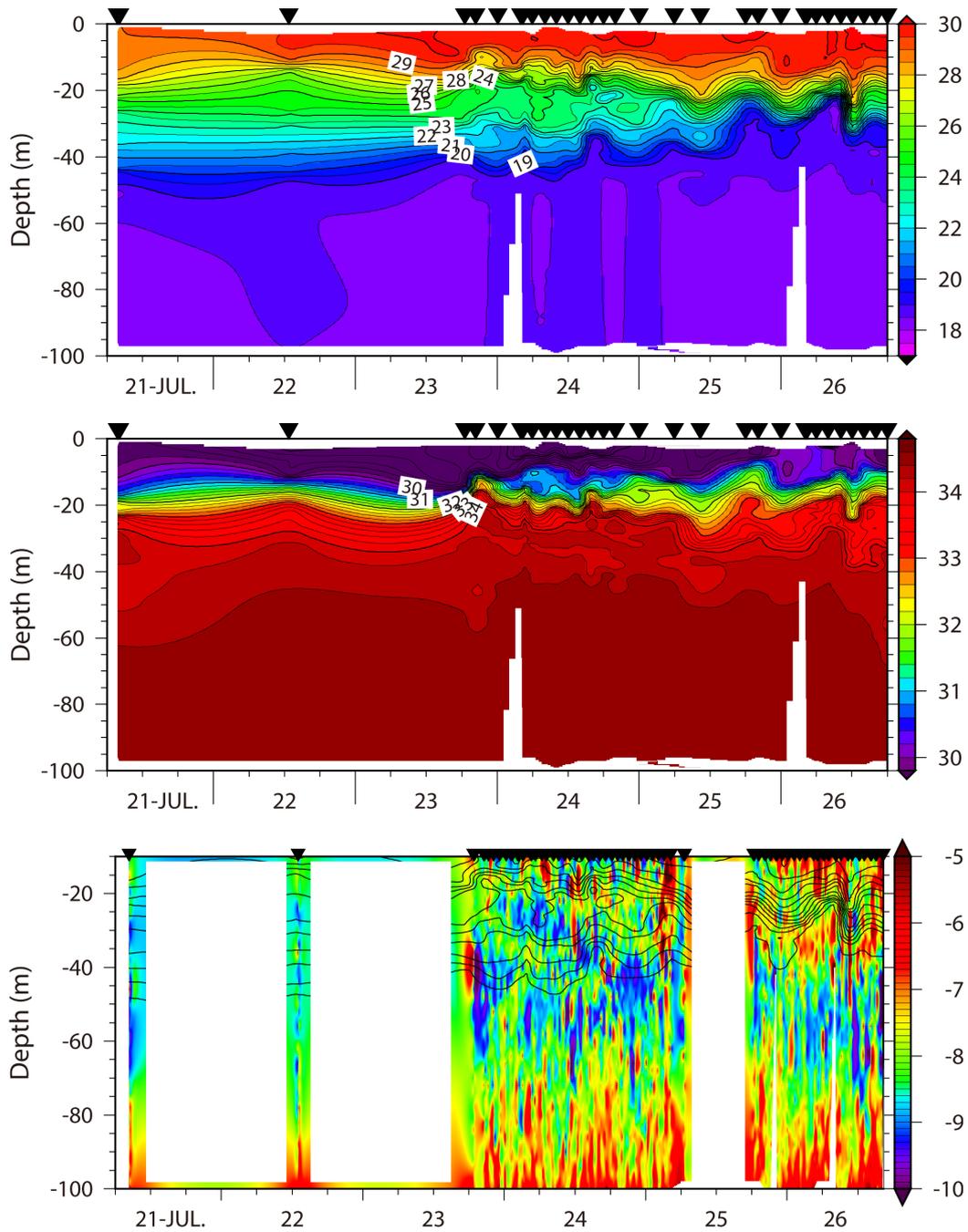


그림 3.2.4. 정점 C1에서 2016년 7월 21일 06:00부터 7월 26일 18:00까지 CTD와 TurboMAP 반복 관측하여 얻은 수온, 염분, 난류운동에너지 소산율(로그스케일)의 시계열 수직구조 변화. 가로축은 시간, 세로는 수심을 나타냄. 수온 실선은 0.5°C, 염분은 0.2 간격이며, 소산율 실선은 수온을 나타냄.

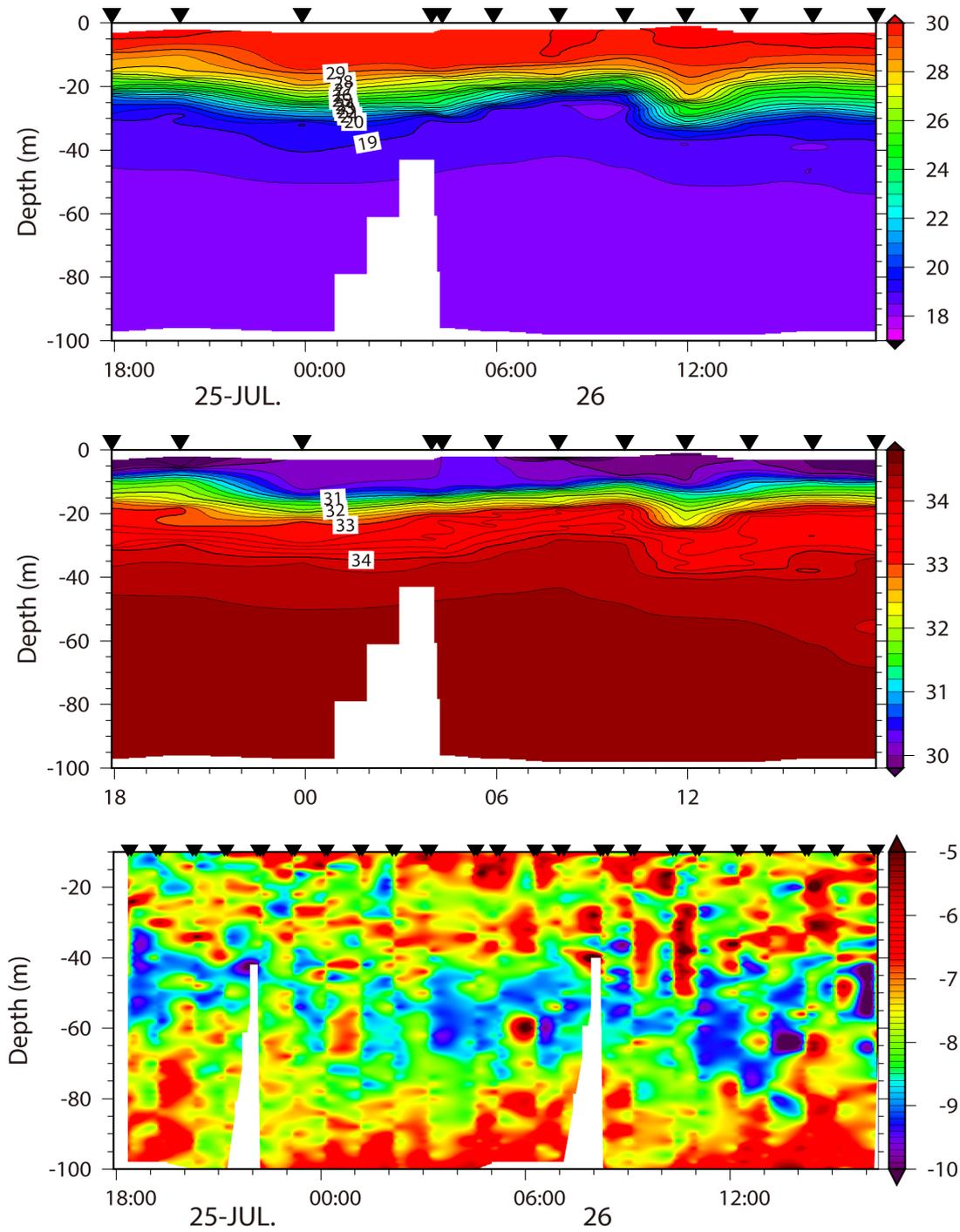


그림 3.2.5. 내부파 관측 예시(2016/07/25, 17:55~7/26, 17:55). 수온, 염분, 난류 소산율 시계열 변화.

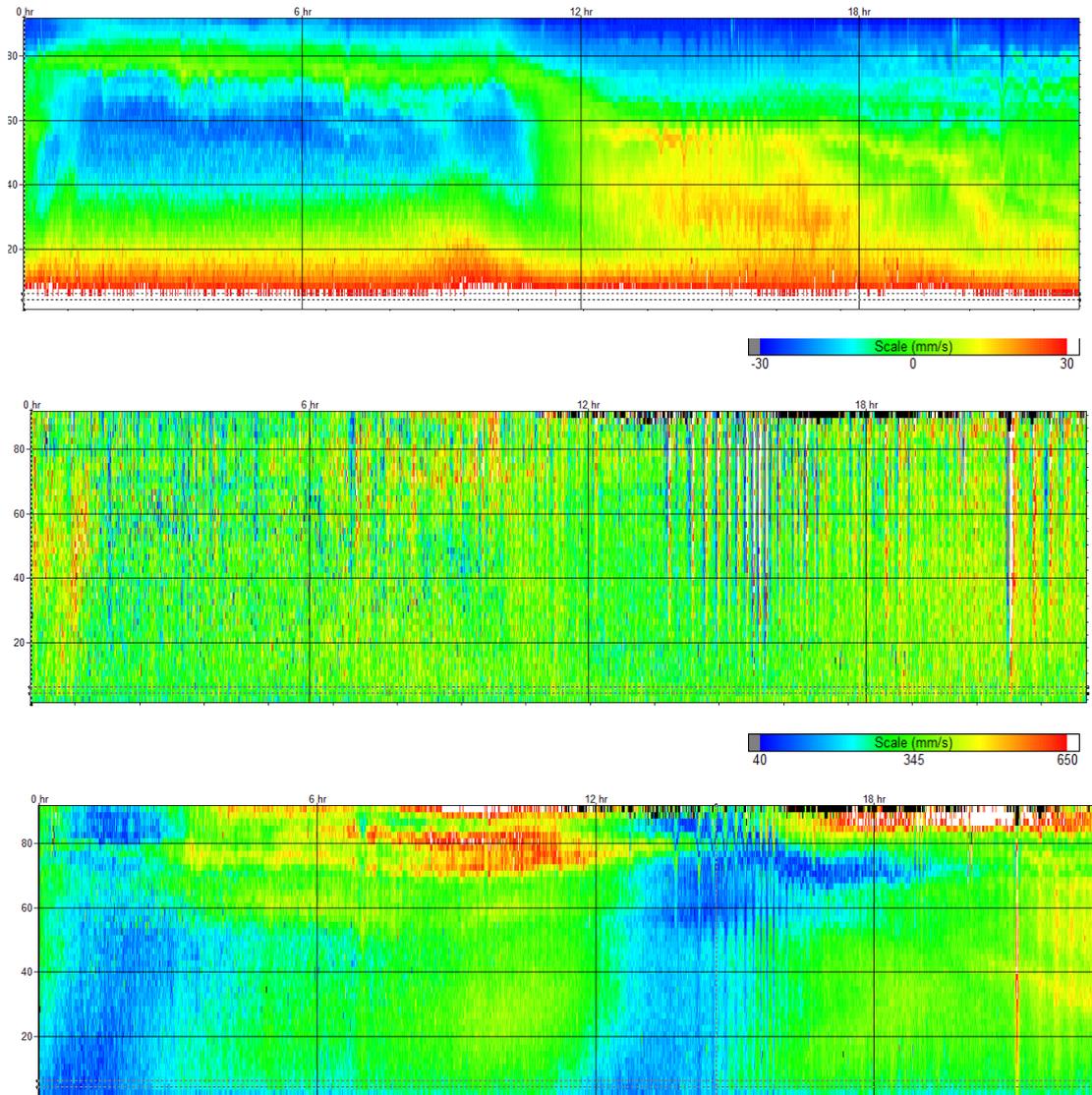


그림 3.2.6. 내부파 관측 예시(2016/07/25, 17:55~7/26, 17:55). ADCP의 음파 산란강도, 수직유속, 수평유속크기. 산란 강도와 수평유속은 빨간색 일수록 강하며, 수직유속은 빨간색(+)은 위쪽방향, 파란색(-)은 아래쪽방향 유속세기를 의미함.

라. 내부파 특성

그림 3.2.7은 2016년 7월 21~27일 기간 동안 정점 C1 해저면에 계류한 ADCP의 관측 결과로부터 전 수층 수직방향 유속 시계열을 나타낸 것이다. 내부파 통과에 의한 것으로 판단되는 유속구조의 변화가 전 기간에 걸쳐 뚜렷하게 관측되었다. 동중국해 대륙붕단 부근의 내부파 발생은 태평양으로부터 전달되는 내부조석 에너지의 분산 과정으로 이해되기 때문에 발생 주

기가 조석주기를 따르는 것이 일반적이다. 그림 3.2.7에서도 매 주기마다 관측되고 있지는 않지만 반일주조 또는 일주조 주기로 내부파가 나타나고 있음을 보여준다. 전반적으로 내부파는 하강유속이 먼저 발생하여 2층 구조의 밀도분포에서 하층이 상층보다 두꺼운 경우에 나타나는 내부파 특성과 일치하고 있다(Liu *et al.*, 1998). 내부파 주기와 유속 변화의 특성에 따라 5~10분 단주기 형태의 비선형 내부파와 15분 이상의 Solitary파 형태의 내부파가 나타났다.

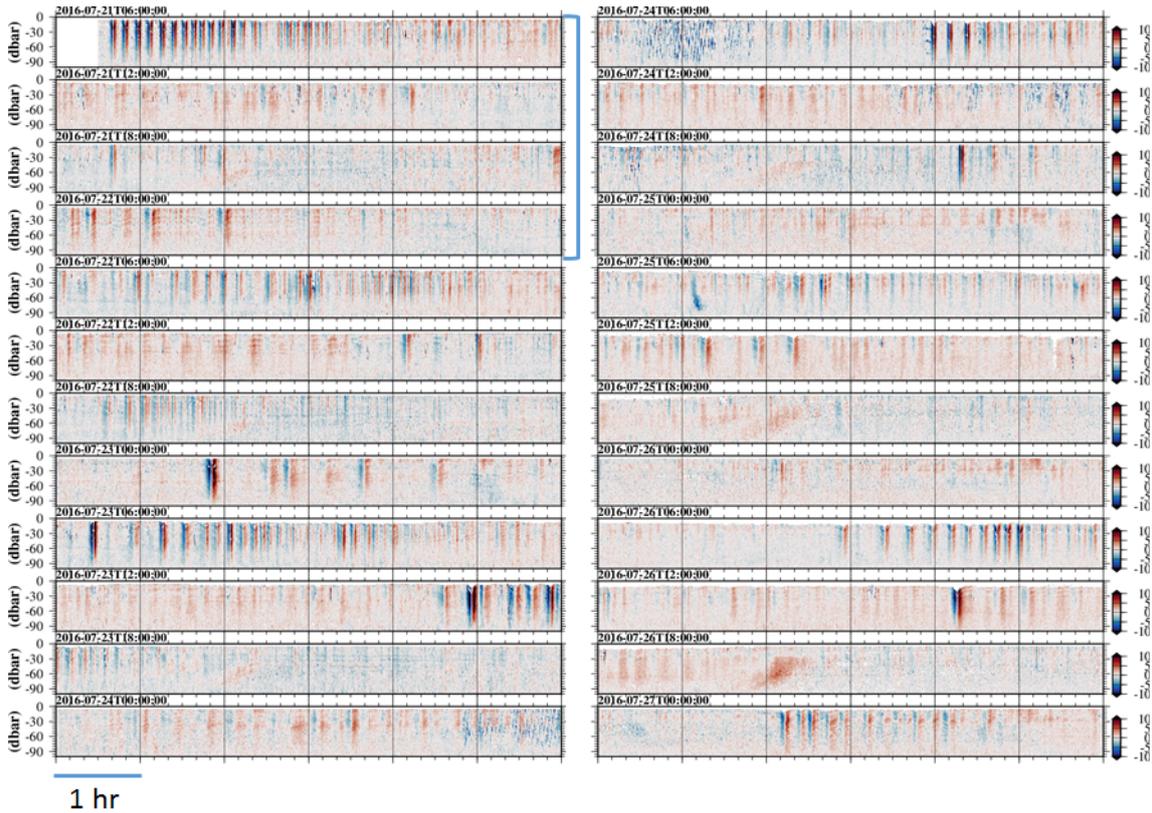


그림 3.2.7. 2016년 7월 21~27일 기간 동안 정점 C1의 수직방향 유속 시계열.

그림 3.2.8은 7월 21~22일 사이의 24시간 동안 수직 및 동서방향 유속 시계열을 도시한 것으로 단주기 형태 내부파(그림에서 1로 표시)와 장주기 형태 내부파(그림에서 2로 표시)가 뚜렷하게 구분된다. 단주기 내부파는 약 8분 주기로 반복되어 나타나다가 5분 이하의 보다 짧은 주기로 변화되는 전형적인 비선형 내부파임을 보여주고 있다. 장주기 내부파는 30분에서 1 시간 간격으로 출현 간격이 벌어지는 특성을 보여주고 있다(그림에서 노란 화살표). 단주기 내부파는 해저면 부근에서 약하긴 하지만 거의 전 수층에 걸쳐 수직 유동이 있는 반면 장주기 내부파는 보다 상층에 국한되고 있는 것으로 판단된다. 동서 방향 유속은 밀도약층을 경계로 상하층의 유속 방향이 다름을 볼 수 있다.

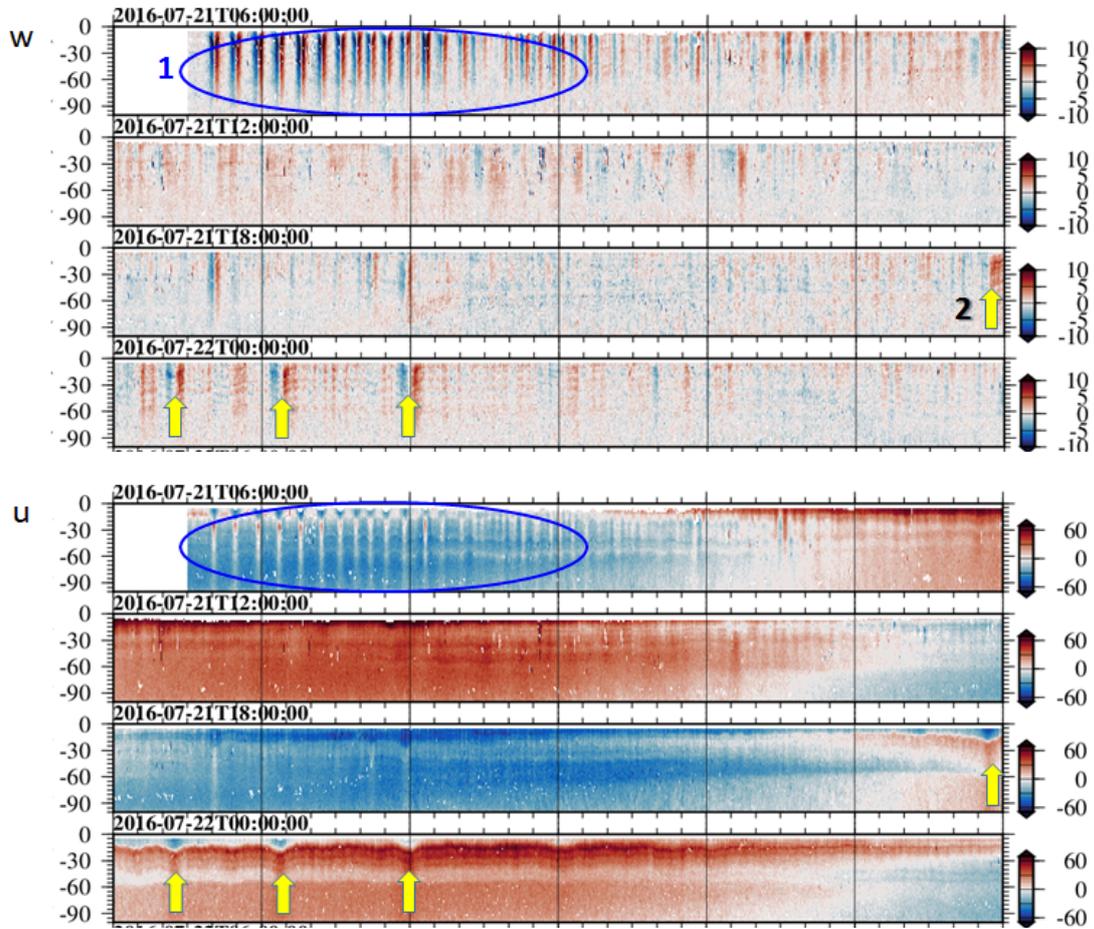


그림 3.2.8. 2016년 7월 21~22일 사이 24시간 동안의 수직 및 동서방향 유속 시계열.

2. 2017년 해양 조사

가. 관측 개요

관측은 나가사키대학 실습선인 나가사키마루를 이용하여 2017년 7월 19일~28일 기간에 수행하였다. 일본 EEZ 내의 해역 쓰시마해류 통과역 3개 라인(대륙사면을 가로지르는 2개 라인(C, CK)은 2016년 조사와 동일함)의 12개 정점에서 CTD 및 TurboMAP 단면조사를 실시하였고, 관측점 C1 주변에서 내부파 관측을 위한 집중 조사를 수행하였다(그림 3.2.9). 내부파 집중 관측은 2~4시간의 CTD 및 XBT 반복 관측, 1시간 간격의 TurboMAP 반복 관측, 3개 정점에서 TRBM-ADCP 단기 계류조사 및 ADCP 계류 지점 주변의 반복 순환조사를 실시하였다.

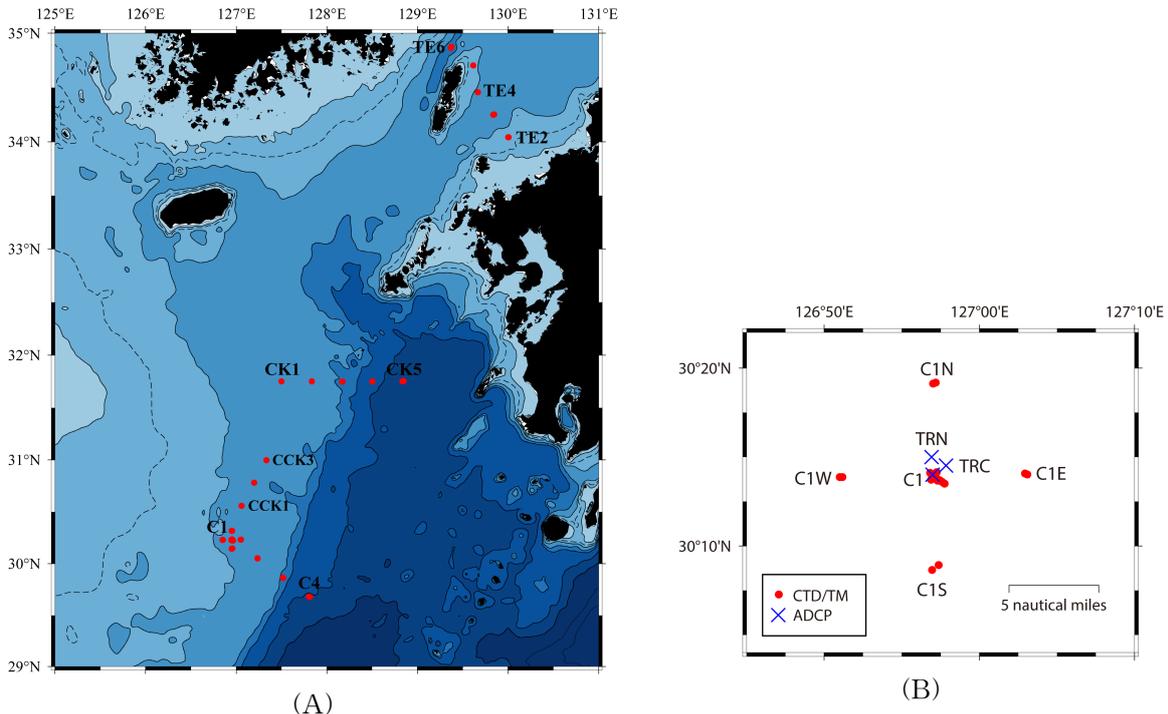


그림 3.2.9. 2017년 7월 쓰시마 해류가 통과하는 동중국해 북부의 해양조사 정점 (A) 및 정점 C1 부근의 미세구조 변동 및 내부파 관측을 위한 CTD/XBT, TurboMAP, TRBM-ADCP 정점 위치도(B).

나. 쓰시마해류 통과 해역 관측 결과

그림 3.2.10에 쓰시마 해류가 통과하는 동중국해 북부 해역 표층(4 m)과 50 m, 100 m 층의 수온 및 염분의 수평분포를 나타내었다. 표층 수온은 29.5~30°C 범위의 고수온을 보이며 염분은 서쪽에 상대적으로 저염의 해수가 분포하고 있다. 2016년도 조사 시기와 비교하여 수온은 0.5°C 정도 높고 염분은 1~2 정도 높은 값을 보여준다. 50 m 및 100 m 층에는 동쪽에 고온·고염의 쓰시마해류가 통과하고, 서쪽에는 여름철 남쪽으로 확장하는 저온·저염의 황해 냉수의 영향으로 동고서저형 수평분포를 보인다. 이들의 수심에서도 대륙붕 해역에서 2016년도 조사 시기보다 수온과 염분 모두 높은 값을 보여주고 있어 조사해역(또는 동중국해 대륙붕해역 전체) 해수 물성 분포의 하계 연변화가 있음을 시사하고 있다.

그림 3.2.11에 남쪽(C-라인)과 북쪽(CK-라인) 동서 단면의 수온, 염분, 난류운동에너지 소산을 수직구조를 나타내었다. 단면 C와 CK의 수직분포에서는 표층에서 대륙붕상 정점 C1을 제외하고 저염수 영향은 나타나지 않고 있으며, 수심 50~150 m 사이에서 염분 최대층(>34.6)이 나타나고 있다. 염분최대층의 해수는 2016년에 비하여 전 조사해역의 80 m보다 깊은 해저에 분포하여 쿠로시오중층수 영향이 커졌음을 보이고 있다. 단면 C의 대륙사

면역(C3~C4) 200~300 m의 수온과 염분은 2016년 조사 시기와 유사한 반면 단면 CK의 대륙사면역(CK4~CK5) 200~300 m에서는 2016년보다 수온과 염분 모두 높아져 큐슈 서쪽 오키나와해구 북쪽까지 쿠로시오중층수 세력이 커졌을 가능성이 높다. 대륙붕단(C3, CK3) 저층에서 저온수(염분 34.6 정도의 쿠로시오 기원 해수)가 동중국해 대륙사면역으로 용승 형태로 공급되고 있는 것은 2016년과 유사하지만, 난류 소산율은 낮아 조사 시기에 쿠로시오 기원해수의 해저면층 공급이 오래 지속되었을 가능성이 있다. 단면 CK의 상층 수온과 염분 수직 분포 구조를 보면 정점 CK2의 20~30 m 수심에서 염분의 수직변화가 작고 정점 CK3의 30~50 m에서는 수온의 수직변화가 작은 형태를 보이고 있는데 난류 소산율은 CK2의 20~30 m에서는 작은 반면 CK3의 40~50 m에서 $O(10^{-6} \text{ W/kg})$ 으로 국지적으로 높게 나타나고 있다. 이는 대륙붕단 해역의 수온약층대 해수 혼합과정은 이해하는데 의미 있는 부분으로 판단되며 지속적인 분석이 필요하다.

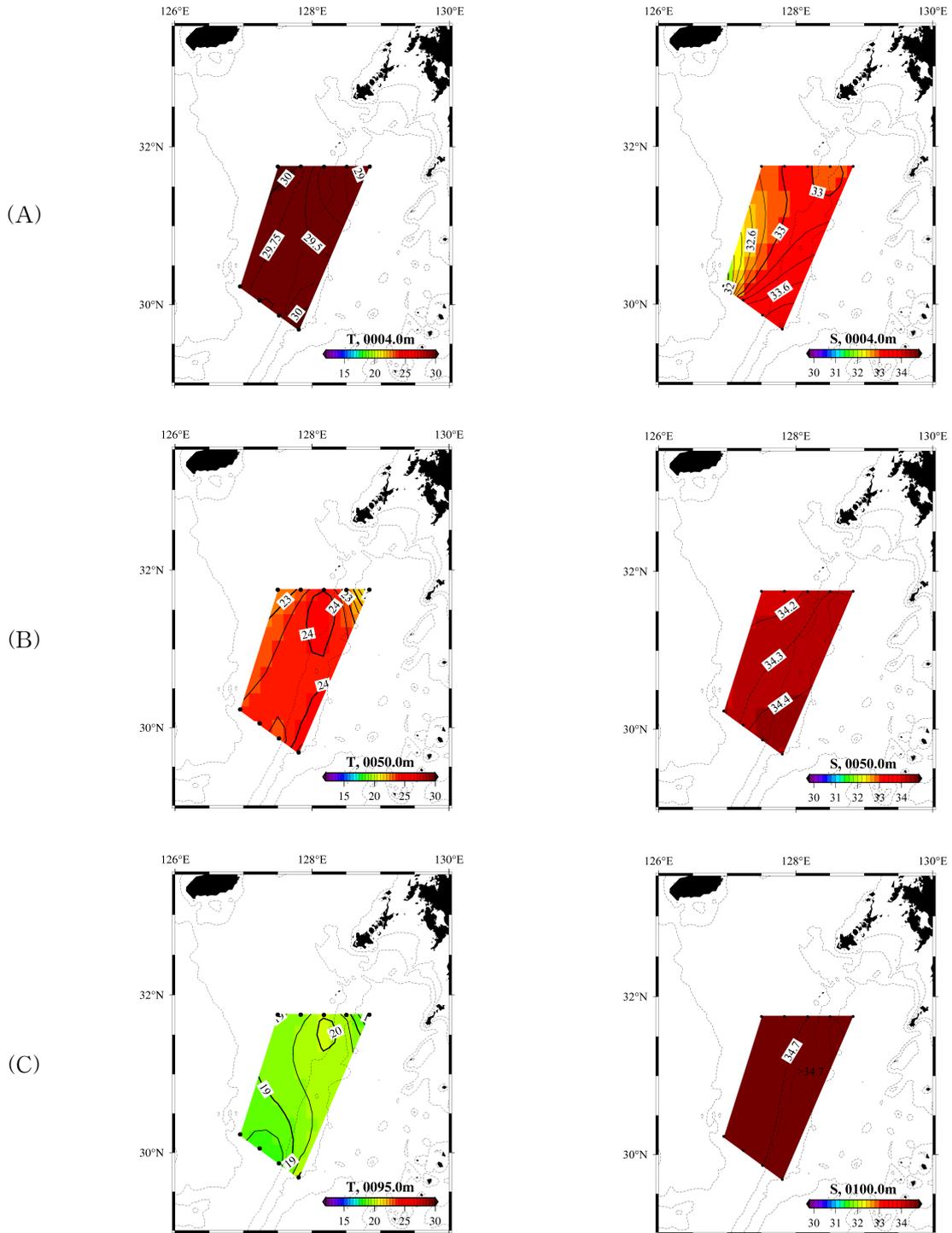


그림 3.2.10. 2017년 7월 수온(상), 염분(하)의 수평 분포도. 분포도 수심은 각각 표층(4 m)(A), 50 m(B), 100 m(C). 실선은 수온 0.5°C, 염분 0.2 간격이며, 점선은 등수심선(100, 200, 500, 1000 m)을 나타냄.

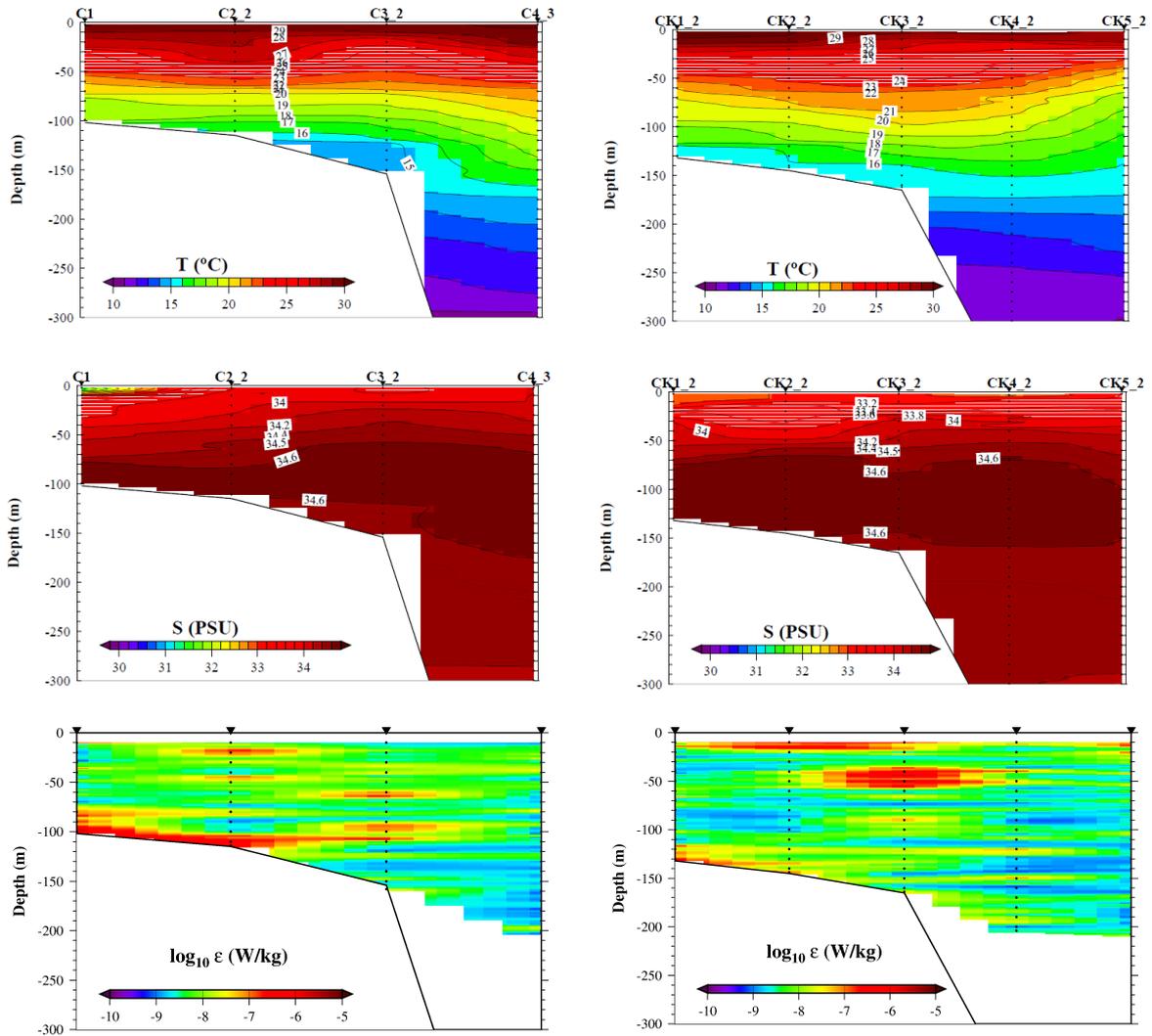


그림 3.2.11. 2017년 7월 2개 단면(C좌), CK-라인(우)의 수온(상), 염분(중) 및 난류운동에너지 소산율(하) 수직 분포. 분포는 수심 300 m까지 나타냄. 실선은 수온 1℃, 염분 0.2 간격을 나타내며 소산율은 로그스케일임.

다. 내부파 관측 결과

그림 3.2.12는 2017년 7월 22~26일 기간 동안에 정점 C1 해저면에 계류한 ADCP의 관측 자료로 부터 산출한 전수층의 유속 시계열을 나타낸 것이다. 전반적인 유속 변화의 형태는 조석주기와 일치함을 보이고 있다. 2016년도 관측에 비하여 내부파는 자주 나타나지 않았으며 7월 24일 이후에 관측되었으며 비선형 내부파 형태가 지배적이며 2016년도 경우와 같은 Solitary파 형태의 내부파는 뚜렷하게 나타나지 않았다. 부록의 항차보고서에 관측된 내부파의 특징적인 사항이 기술되어 있다.

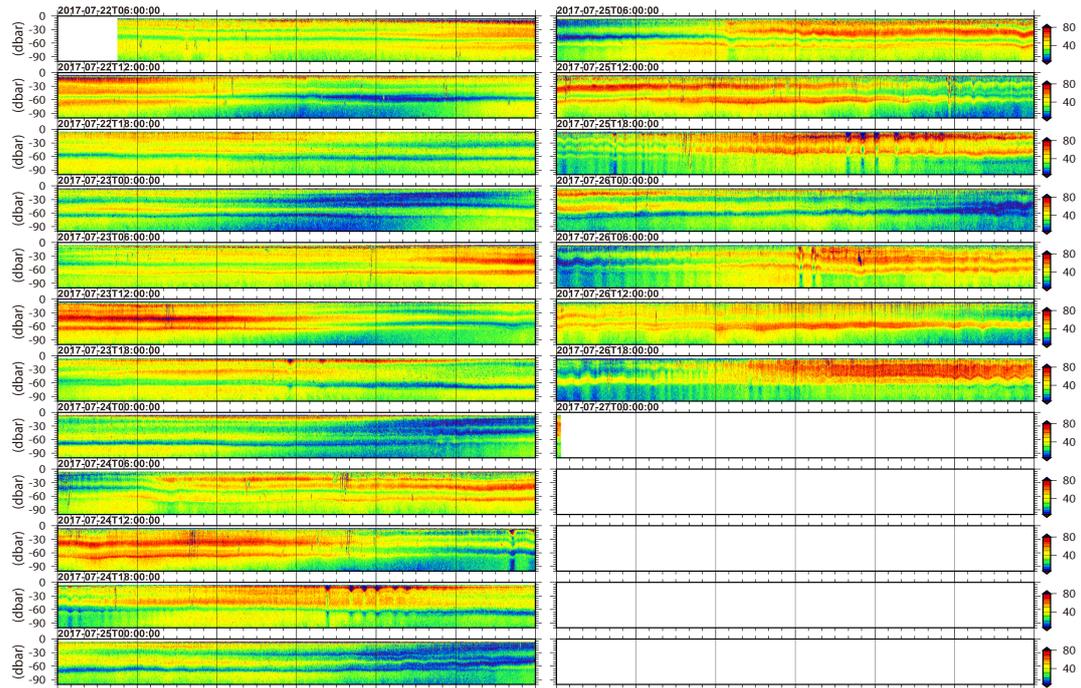


그림 3.2.12. 2017년 7월 22~26일 기간 동안 정점 C1의 ADCP 계류 관측 결과 전 수층의 유속 시계열.

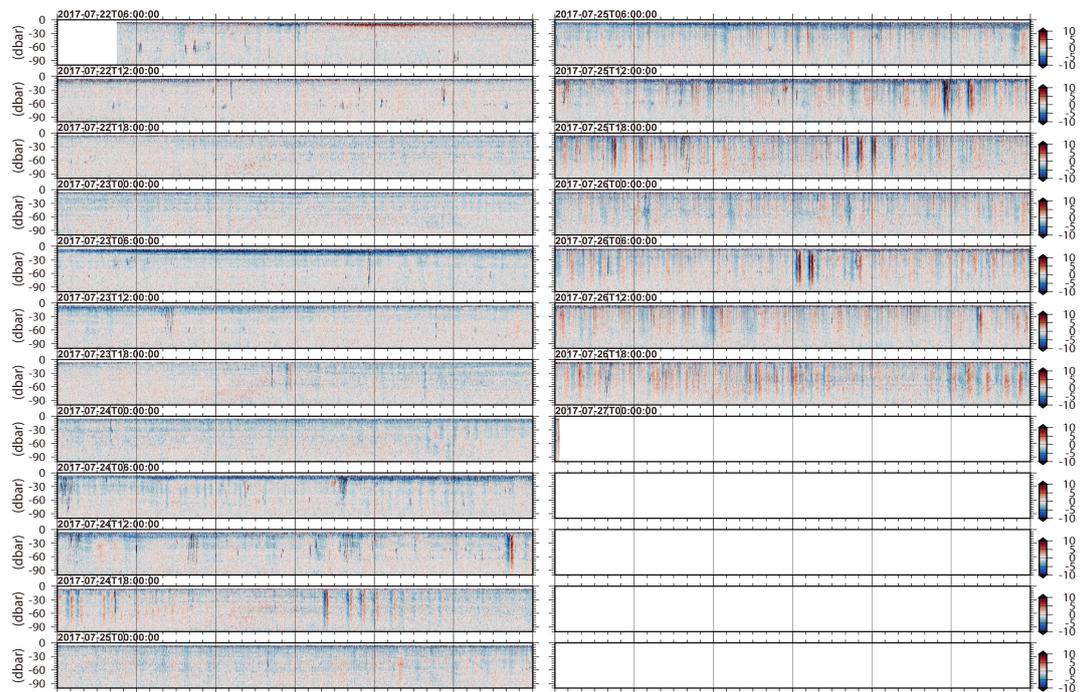


그림 3.2.13. 2017년 7월 22~26일 기간 동안 정점 C1의 ADCP 계류 관측 결과 전 수층의 연직방향 유속 시계열.

제3절 동중국해 수온과 해류 변동성

동중국해의 해양환경에 대한 현장관측을 수행하기 위해서는 많은 시간과 비용이 요구된다. 또한 동중국해는 한국과 중국, 일본의 배타적경제수역으로 나뉘어 있어 동중국해 전체에 대한 동시간대 자료를 획득하기가 상당히 어렵다. 현장관측의 어려움을 피하면서 해양환경 자료를 획득하는 방법으로 해양환경이 동화된 자료동화 모형의 결과를 준현장관측 자료처럼 활용하는 방법이 있다.

비록 현장관측 자료를 이용하여 쿠로시오 변동성을 조사한 연구도 수행된 바 있기는 하지만(Zhang *et al.*, 2001; Jan *et al.*, 2015) 대부분 대만 동부에 국한되었다. 또 해면고도계 자료를 이용하여 동중국해나 쿠로시오의 변동성을 조사한 바도 있으나 자료의 특성상 표층에 국한되었다(Liu and Gan, 2012, Wang and Oey, 2014). 자료동화 모형 자료는 공간적 제약이 없고 동시간대의 환경 정보를 제공하기 때문에 동중국해의 해양환경과 쿠로시오 변동성을 연구하는 데 이용하기에 용이하다. 자료동화 모형 자료를 이용한 동중국해 연구나 쿠로시오 변동 연구는 이미 여러 연구진에 의해 수행된 바 있다(Soeyanto *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2016).

동중국해와 쿠로시오 연구에 이용된 자료동화 모형 자료 중 대표적인 것이 Hybrid Coordinate Ocean Model(HYCOM; <https://hycom.org>)과 Japan Coastal Ocean Predictability Experiments 2(JCOPE-2; <http://www.jamstec.go.jp/e/>)이다. JCOPE는 일본 해양연구개발기구(JAMSTEC)에 의해 개발된 모형이고 HYCOM은 미국 대학, 해군, NOAA 산하 기구 및 기업들에 의해 프로 공동 개발된 모형으로 여기서는 HYCOM으로 계산된 자료동화 자료를 이용하였다.

전지구 해양모형인 HYCOM은 세가지 종류의 연직 좌표계를 혼합하여 사용한다. 성층화된 대양에서는 밀도면을 따르는 좌표계를, 수심이 얇은 곳에서는 해저지형을 따르는 좌표계를 사용하며 혼합층이나 비성층 해양은 수심을 따르는 좌표계를 사용한다(Bleck, 2002; Chassignet *et al.*, 2003). 자료는 연직 방향으로 32개의 층에서 계산된 것을 40개 수심으로 내삽되어 제공되며, 수평 방향으로는 위도와 경도 각각 동일하게 0.08도, 즉 약 1/12.5도 간격으로 내삽되어 제공된다. 자료동화에는 위성에서 관측한 해수면 수온과 해수면 고도 자료가 사용되며, XBT, Argo 뜰개, CTD, 부이 등의 연직 관측자료도 사용된다. 표층 외력에는 바람응력이나 바람세기, 열수지 등 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) 자료가 사용되었다.

HYCOM을 이용한 자료동화 자료(이후 HYCOM 자료)는 기간마다 다른 실험 자료가 있

는데 여기서는 2012년까지는 HYCOM + Navy Coupled Ocean Data Assimilation (NCODA) Global 1/12° Reanalysis 실험 중 GLBu0.08의 expt_19.0과 expt_19.1 자료를 이용하였고 2013년 이후는 HYCOM + NCODA Global 1/12° GLBu0.08 Analysis 실험 중 GLBu0.08의 expt_90.9, expt_91.0, expt_91.1, expt_91.2 자료를 이용하였다.

1. HYCOM 자료의 쿠로시오 해류 재현 검증

자료동화 모형 자료를 이용하기 위해서는 먼저 자료동화 모형 자료를 검증해야 하는데 HYCOM 자료는 여러 연구자에 의해 검증되고 이용되어 왔다. 민 등(2011)은 대한해협 서수도에서 CTD로 관측한 해수물성 자료와 HYCOM 자료를 비교하여 HYCOM 자료가 대한해협저층냉수의 발달을 어느 정도 표현한다고 주장하였고, 서 등(2013)은 부산과 일본 하카타를 왕복하는 CamelliaLine에 장착된 유속계로 관측한 유속과 HYCOM 자료의 유속을 비교하여 대한해협을 통과하는 해류나 연안류가 HYCOM 자료에 잘 모의된다고 검증하였다. 또한 홍 등(2016)은 PIES 관측으로 산출된 울릉분지 수온장과 HYCOM 자료의 수온장을 비교하여 HYCOM 자료에 울릉분지 순환이 잘 표현된다고 하였다.

HYCOM 자료를 우리나라 주변 해역의 관측 자료와 비교한 연구는 있었으나 동중국해의 해양환경에 큰 영향을 미치는 쿠로시오의 경로인 동중국해 대륙사면에서 직접 관측한 해류와 비교한 조사는 없었다. 따라서 HYCOM 자료에서 동중국해 대륙사면을 따라 흐르는 쿠로시오가 모의되는 수준을 현장 관측된 2년 기간의 유속 시계열과 HYCOM이 모의한 유속을 비교하여 검증하였다.

2016년 6월~2018년 6월 기간에 쿠로시오 주축인 KCM1과 KCM1에서 남동쪽으로 약 30 km 떨어진 KCM2에서 ADCP로 관측된 유속과 같은 지점의 HYCOM 자료의 유속을 비교하였다(그림 3.3.1). KCM1에서는 HYCOM 자료와 관측 자료의 유속의 크기가 매우 유사하면 강한 유속이 나타난 시기도 유사하여 시간 변동성이 유사함을 알 수 있다. 또한 강한 유속이 보이는 수심이 약 400 m까지 도달하는 모습도 유사하다. 유속을 연직 적분한 값의 시간 변동성을 비교하면 관측과 HYCOM 자료의 변동성이 매우 유사함을 알 수 있다(그림 3.3.2).

한편 쿠로시오 주축에서 떨어진 KCM2에서는 관측 자료와 HYCOM 자료의 유속 변동이 차이가 난다. KCM1과 달리 KCM2에서 유속 구조와 변동 패턴이 관측 자료와 HYCOM 자료에서 차이가 나는 것은 해류의 크기가 작은 지점이기 때문으로 보인다. 비록 KCM2에서 관측과 HYCOM의 차이가 있어도 KCM1의 유속이 KCM2보다 매우 커서 쿠로시오 수송량

에 기여하는 정도를 고려할 때 HYCOM 자료에서 쿠로시오 수송량이 재현되는 정도는 관측과 매우 유사할 것으로 판단된다. KCM1 지점에서 유속을 연직 적분한 값의 시간변동과 단면을 가로지르는 수송량의 시간변동 패턴이 매우 유사한 그림 3.3.3이 이를 뒷받침한다.

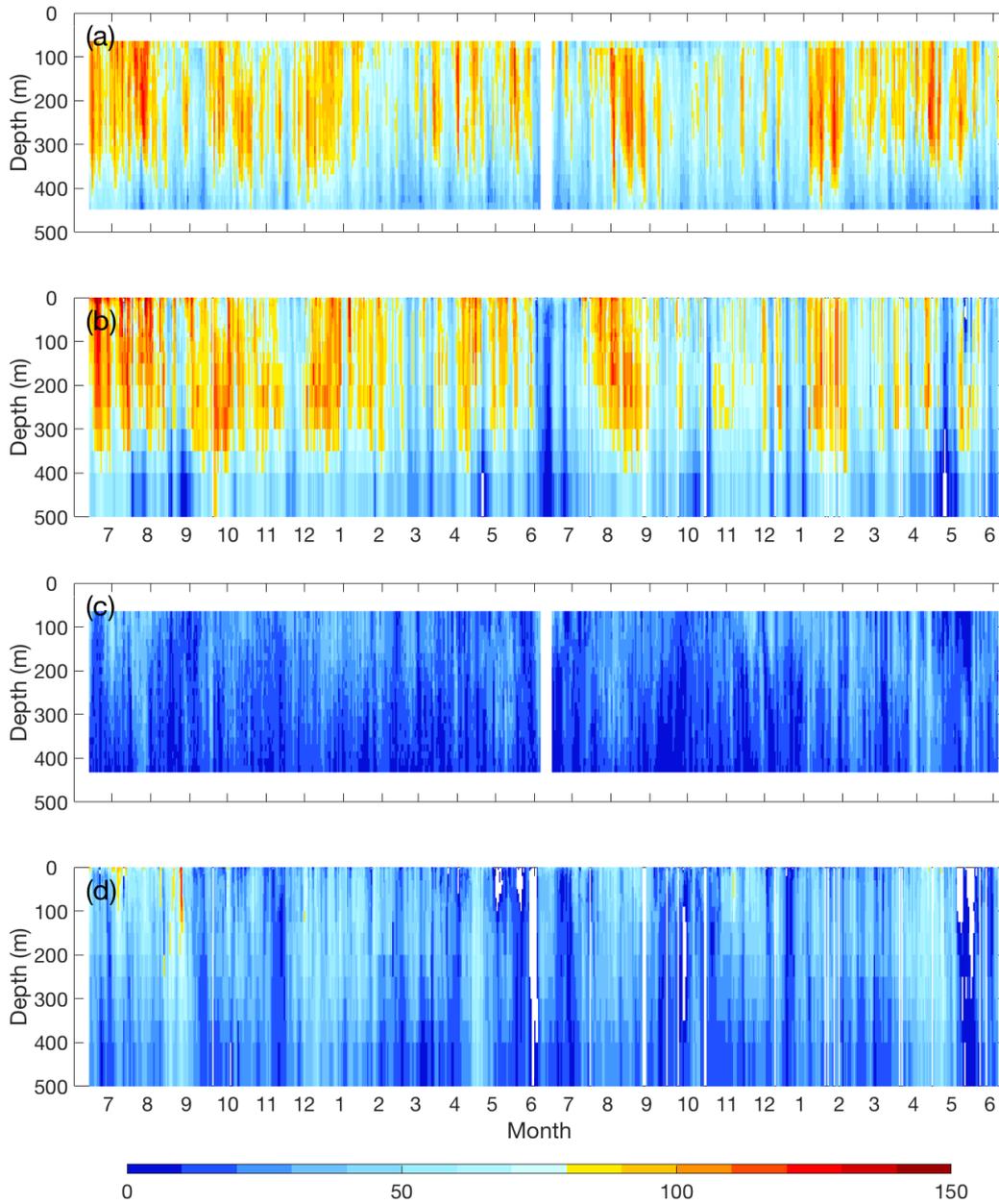


그림 3.3.1. 2015년 6월~2017년 6월 기간 동안 KCM1(a)과 KCM2(c)에서 관측한 유속과 같은 지점에서 HYCOM 자료의 유속(b, d) 비교(유속은 쿠로시오 진행방향과 평행한 유속 성분).

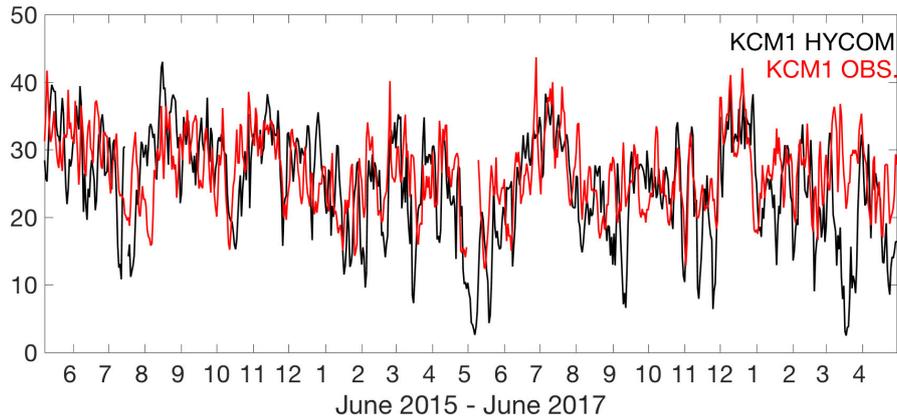


그림 3.3.2. 2015년 6월~2017년 6월 기간 동안 KCM1에서 관측한 유속을 수심 적분한 쿠로시오 수송량지수와 HYCOM 자료의 수송량지수 비교.

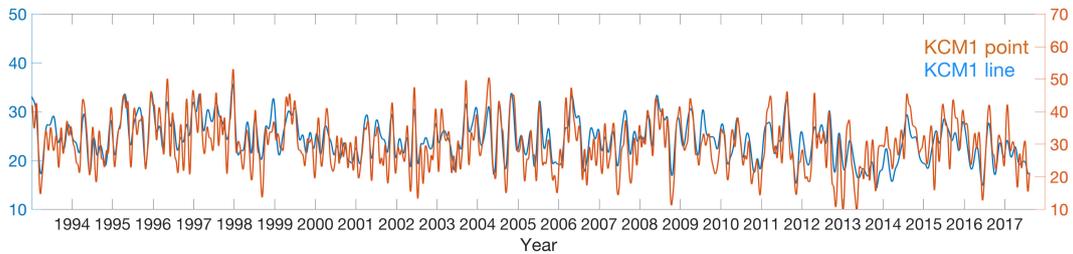


그림 3.3.3. KCM1 지점에서의 수송량지수(주황색)와 KCM1을 지나는 횡단면을 가로지르는 수송량(하늘색)의 시간변동성 비교.

쿠로시오 변동은 여러 주기대의 변동이 합쳐 있고 주기대에 따라 그 변동 원인이 다를 수 있다. Andres *et al.* (2009)은 동중국해의 쿠로시오 수송량과 PDO (Pacific Decadal Oscillation)의 연관성이 매우 높다고 주장하였고, Yan *et al.* (2016)은 대만 동쪽의 쿠로시오 수송량이 중규모 에디의 영향을 받는다고 주장하였다. 또한 Zhang *et al.* (2001)은 대만 동쪽 해역에서 획득한 해류계 계류 자료에서 쿠로시오 수송량의 변동이 18일, 40일, 100일 주기 부근에서 우세한 신호가 있음을 제시하였다. 서로 다른 주기대에서 우세한 신호가 있음은 쿠로시오 수송량 변동 원인이 다를 수 있음을 의미하며 이와 연관된 동중국해의 해양 환경 변동도 다를 수 있다. 따라서 쿠로시오 변동을 주기대별로 분리하여 분석할 필요가 있어서 60일 high-pass, 60~150일 band-pass, 150일 low-pass 필터링을 하여 각 주기대별 쿠로시오 변동성과 동중국해 해양환경의 상관성을 조사하였다.

2. 장주기 쿠로시오 변동성과 동중국해 해양환경

150일 이상의 장주기 변동성을 조사하기 위해 KCM1을 지나는 횡단면을 가로지르는 쿠로시오 수송량을 구하여 선형추세를 제거하고 평균적인 계절변동도 제거한 후 150일 low-pass 필터링을 하였다(그림 3.3.4). 쿠로시오 수송량의 변동에서 가장 큰 신호가 계절 변동이기 때문에 필터를 적용하기 전에 계절변동을 제거하였다.

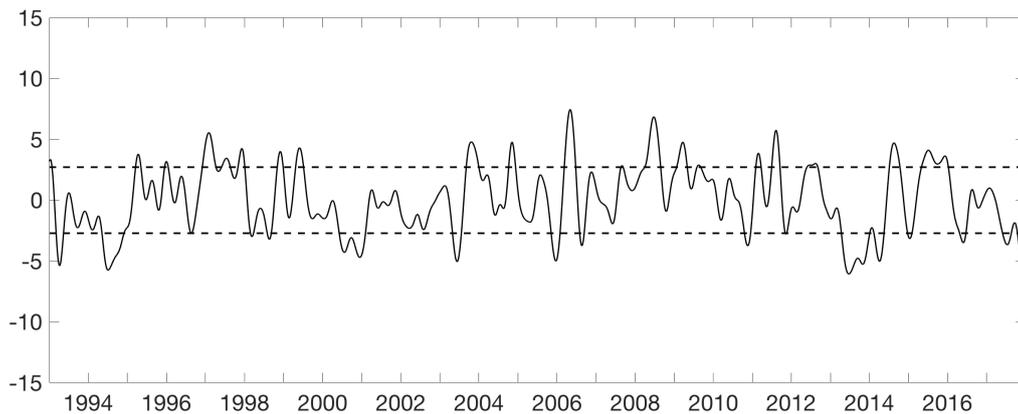


그림 3.3.4. 150일 low-pass 필터를 적용한 쿠로시오 수송량. 점선은 1 표준편차를 나타냄.

150일 low-pass 필터링한 쿠로시오 수송량 변동에서 평균보다 1 표준편차 이상 수송량이 큰 시기와 1 표준편차 이상 수송량이 작은 시기를 구하여 각 시기에 해당하는 다른 변수의 값을 합성하여 해당 변수의 분포를 구하였다. 그림 3.3.5~3.3.7은 수온 합성장으로 적색 계열로 표시된 부분은 표층수온이 다른 시기에 비해 높음을, 청색 계열로 표시된 부분은 낮음을 의미하고 실선은 신뢰도 95%를 나타낸다.

쿠로시오 수송량이 큰 시기와 작은 시기에 표층 수온 분포가 뚜렷한 대조를 보이는 해역은 규슈 서쪽 해역으로 쿠로시오 수송량이 클 때는 이 해역의 표층 수온이 낮고 수송량이 작을 때는 표층 수온이 높다(그림 3.3.5). 또 다른 대조를 보이는 해역은 쿠로시오 경로에 해당하는 영역 중 동중국해 대륙사면 동쪽, 오키나와 서쪽부터 도카라 해협 남부역에 해당하는 해역이다. 이 해역의 표층 수온은 쿠로시오 수송량이 클 때 높고 작을 때 낮다. 한편 오키나와 남서쪽의 쿠로시오 상류역에서는 쿠로시오 수송량이 큰 시기의 표층 수온 합성장에서는 유의미한 차이가 보이지 않지만 쿠로시오 수송량이 작은 시기의 표층 수온 합성장에서는 쿠로시오 축 부근(주로 축의 외해쪽)에서 표층 수온이 낮은 형태가 뚜렷하게 보인다.

50 m에서 쿠로시오 수송량이 큰 시기와 작은 시기의 수온 차이는 표층에서 수온 차이보

다 더 크다(그림 3.3.6). 표층 수온 분포에서는 다소 흐릿하게 보이던 쿠로시오 수송량이 작은 시기에 북위 30도를 경계로 북쪽은 수온이 높고 남쪽은 수온이 낮은 양상이 50 m에서는 매우 뚜렷하게 보인다. 수온이 낮은 30도 이남에서 예외적으로 수온이 높은 영역은 다만 북동쪽 해역부터 동중국해 대륙사면의 대륙붕쪽 해역까지이다. 주변해역과 대비되는 이러한 특징은 쿠로시오 수송량이 큰 시기에는 주변해역과 달리 수온이 낮은 형태로 나타난다. 한편, 큐슈 서쪽 해역에서 쿠로시오 수송량이 큰 시기에는 수온이 낮고 작은 시기에는 수온이 높은 경향은 표층과 유사하나 제주도 부근에서는 쿠로시오 수송량이 작은 시기에 표층 수온은 높은 분포를 보이는 반면 50 m 수온은 낮은 분포를 보인다.

100 m에서 수온은 북위 29도 부근을 제외하면 쿠로시오 수송량이 큰 시기에는 동중국해 대륙사면 북서쪽 해역부터 큐슈 서쪽해역까지 전체적으로 낮고 쿠로시오 수송량이 작은 시기에는 전체적으로 높은 경향이 있다(그림 3.3.7). 이와 대조적으로 동중국해 대륙사면 남동쪽 해역에서는 50 m 수온 분포에서와 마찬가지로 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 수온이 높고 작은 시기에 수온이 낮은 분포가 뚜렷하다.

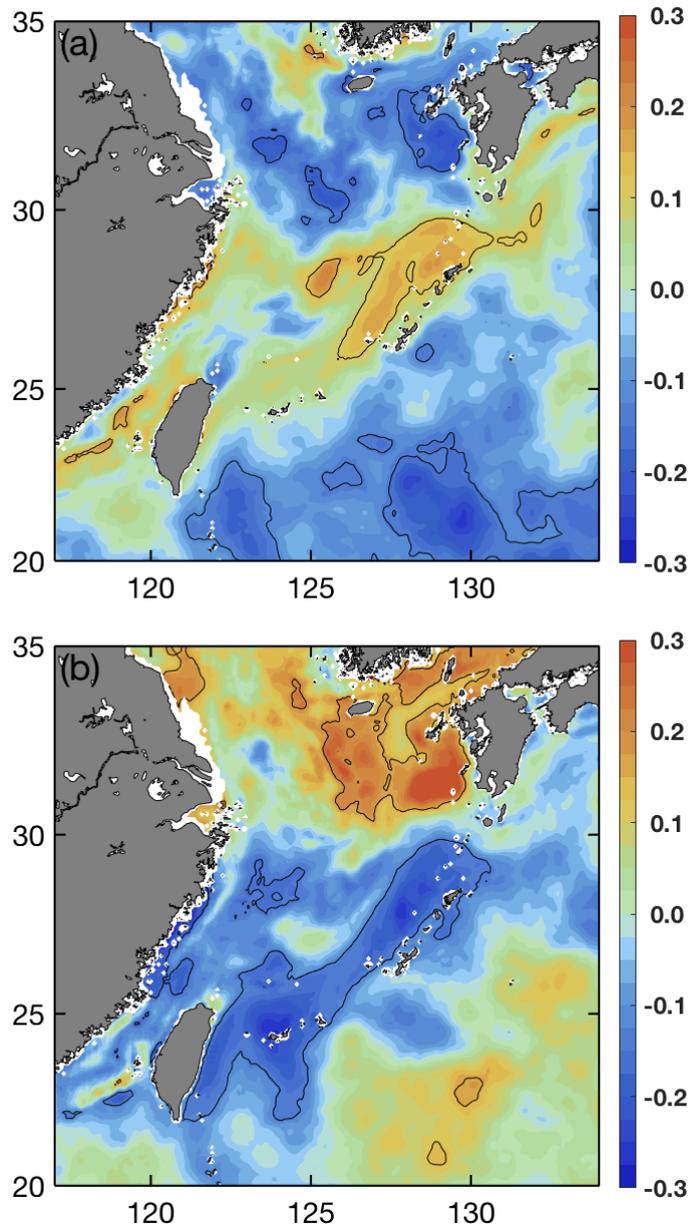


그림 3.3.5. 150일 low-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우(a)와 작은 경우(b)의 표층 수온 분포(실선은 신뢰도 95%를 나타냄).

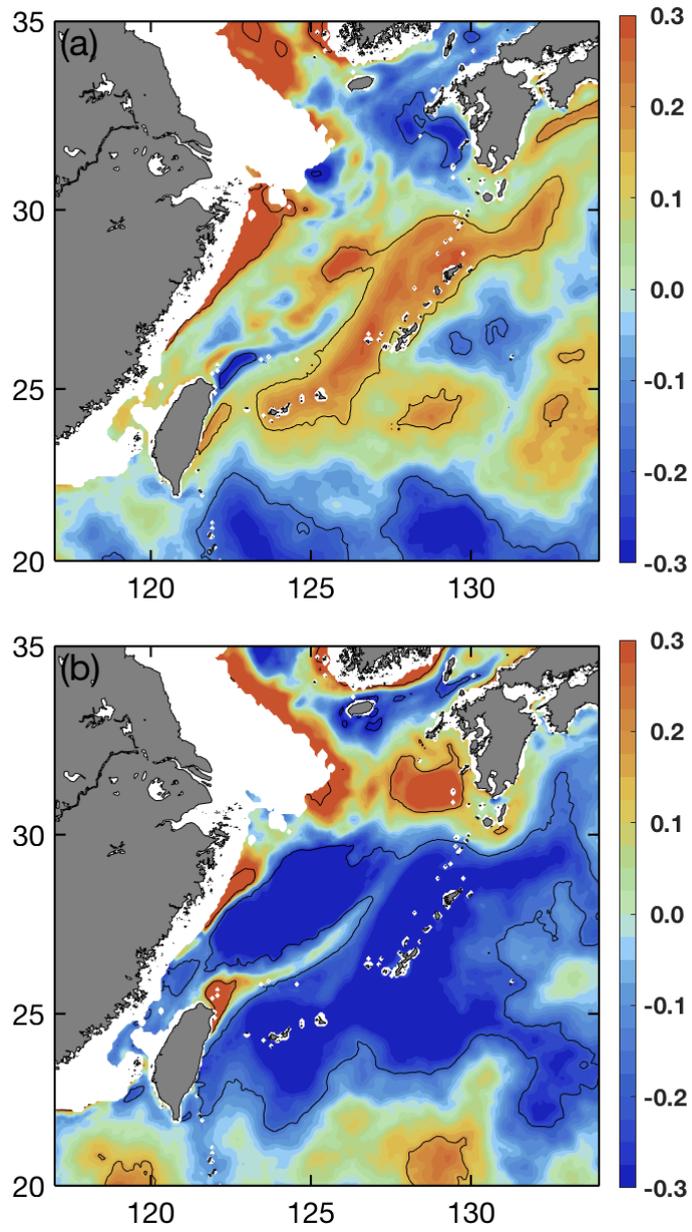


그림 3.3.6. 150일 low-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우(a)와 작은 경우(b)의 50 m 수온 분포(실선은 신뢰도 95%를 나타냄).

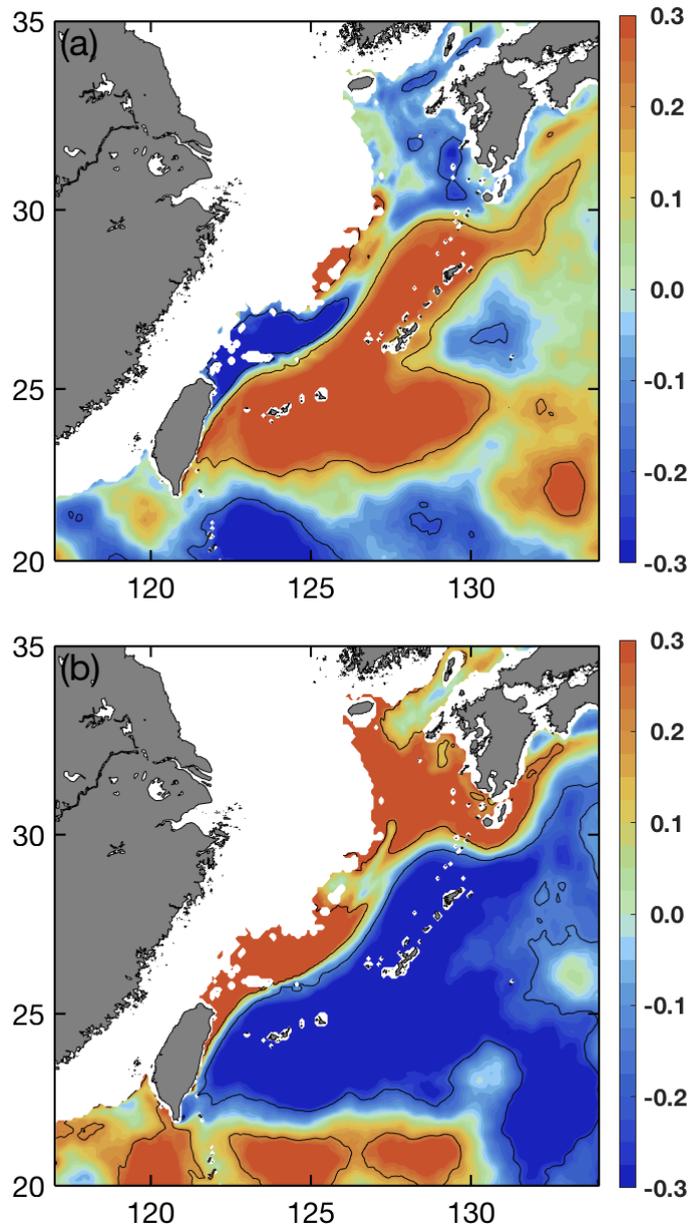


그림 3.3.7. 150일 low-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우(a)와 작은 경우(b)의 100 m 수온 분포(실선은 신뢰도 95%를 나타냄).

그림 3.3.8~3.3.10은 쿠로시오 수송량에 대한 해류 합성장으로 붉은색으로 표시된 부분은 신뢰도 95%이상인 부분이다. 0 m 해류 합성장(그림 3.3.8)에서 쿠로시오 경로의 해류가 쿠로시오 수송량이 큰 시기에는 쿠로시오 진행방향(북동향)의 편차가, 작은 시기에는 반대방향(남서향)의 편차가 있음이 뚜렷하게 보인다. 제주도 남서쪽의 해류 편차는 쿠로시오 수송량이 작은 시기에 남동향이고 큰 시기에 북서향인 대조적인 특징을 보인다. 한편, 대조적인 형태를 보이지는 않지만 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 북서향의 해류 편차가 보이는 쿠로시오 경로의 서쪽인 북위 27.5도, 동경 125.5도 부근에서 남서향의 해류 편차가 나타나는 점이 특징적이며, 쿠로시오 수송량이 작은 시기에 대만해협 북쪽에서 북위 30도, 동경 126도 부근까지 해류 편차가 남서향인 점도 매우 특징적이다.

50 m 해류 합성장(그림 3.3.9)에서 해류 편차의 분포 형태는 전체적으로 표층해류 합성장에서 해류 편차의 분포 형태와 유사하다. 그렇지만 표층해류 합성장에서보다 더 넓은 영역에서 해류 편차가 유의미하게 나타나며 특히 쿠로시오 수송량이 작은 시기에 대한 합성장에서 동중국해 대부분에서 더 유의미한 분포를 보인다. 쿠로시오 수송량이 작은 시기에 표층 해류 합성장에서는 제주도 부근에서 신뢰도가 95%이상인 영역이 남동향의 편차를 보이는 제주도 남서부 일부임에 비해 50 m 해류 합성장에서는 제주도 남서부에서 제주해협과 대한해협으로 이어지는 영역에서 신뢰도가 95% 이상이다. 50 m 해류 합성장에서 평균해류와 반대방향으로 해류 편차가 보이는 점은 쿠로시오 수송량이 작은 시기에 제주도를 돌아 제주해협을 거쳐 대한해협으로 흐르는 해류가 약함을 의미한다. 한편 큐슈 서쪽에서 대한해협 동수도까지 북향하는 해류 편차가 보이는 점은 쿠로시오 수송량이 작은 시기에 큐슈 남서쪽에서 쿠로시오에서 분지하여 대한해협으로 흐르는 해류가 강함을 암시한다.

쿠로시오 수송량이 큰 시기에 표층과 50 m 해류 합성장에서 보이는 북위 27.5도, 동경 125.5도 부근의 남서향 해류 편차는 100 m 해류 합성장(그림 3.3.10)에서도 보인다. 50 m 해류 합성장보다 신뢰도가 95%이상인 영역이 비록 좁지만 큐슈 서쪽에서 대한해협으로 이어지는 북향의 해류 편차는 100 m 해류 합성장에서도 보인다.

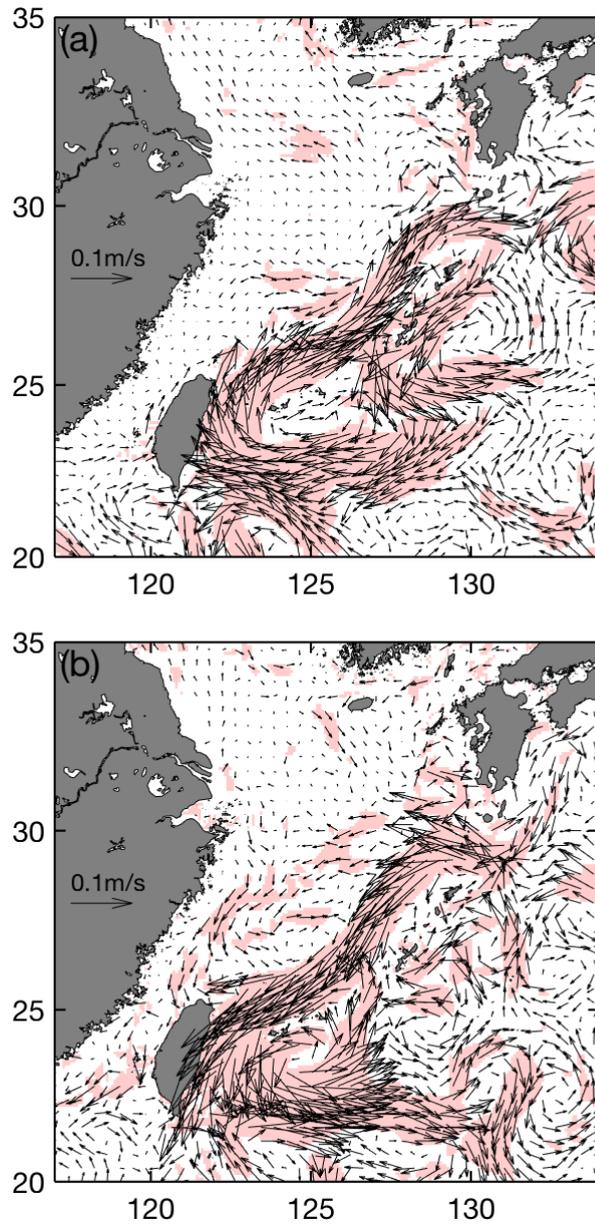


그림 3.3.8. 150일 low-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우(a)와 작은 경우 (b)의 표층 해류 분포(색칠한 부분은 신뢰도 95%이상인 부분을 나타냄).

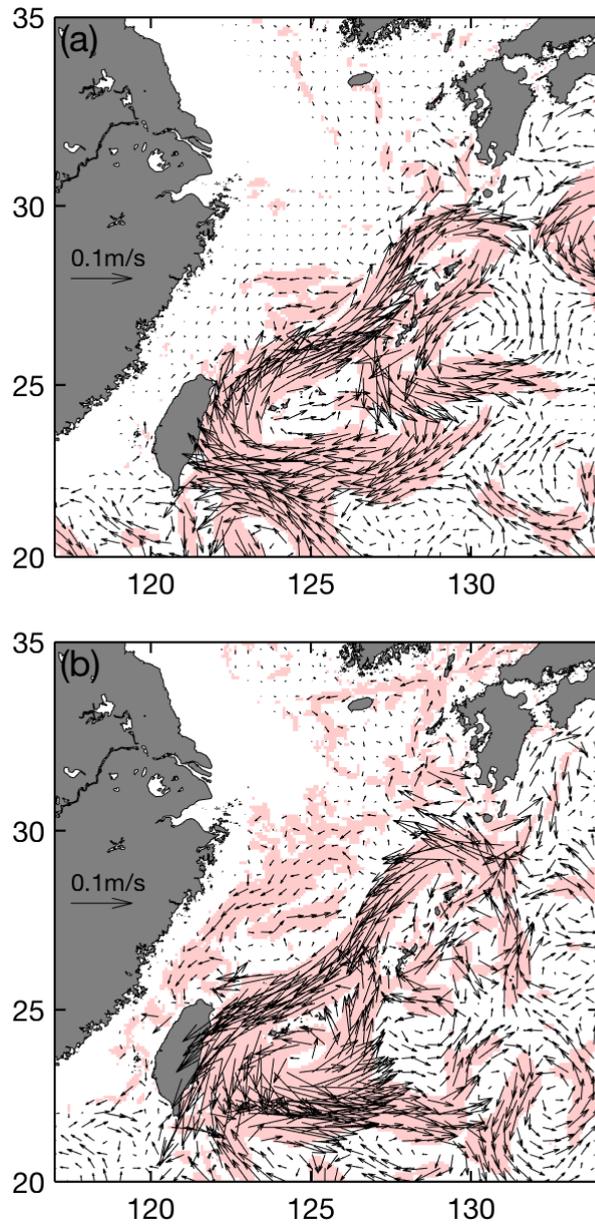


그림 3.3.9. 150일 low-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우(a)와 작은 경우(b)의 50 m 해류 분포(색칠한 부분은 신뢰도 95%이상인 부분을 나타냄).

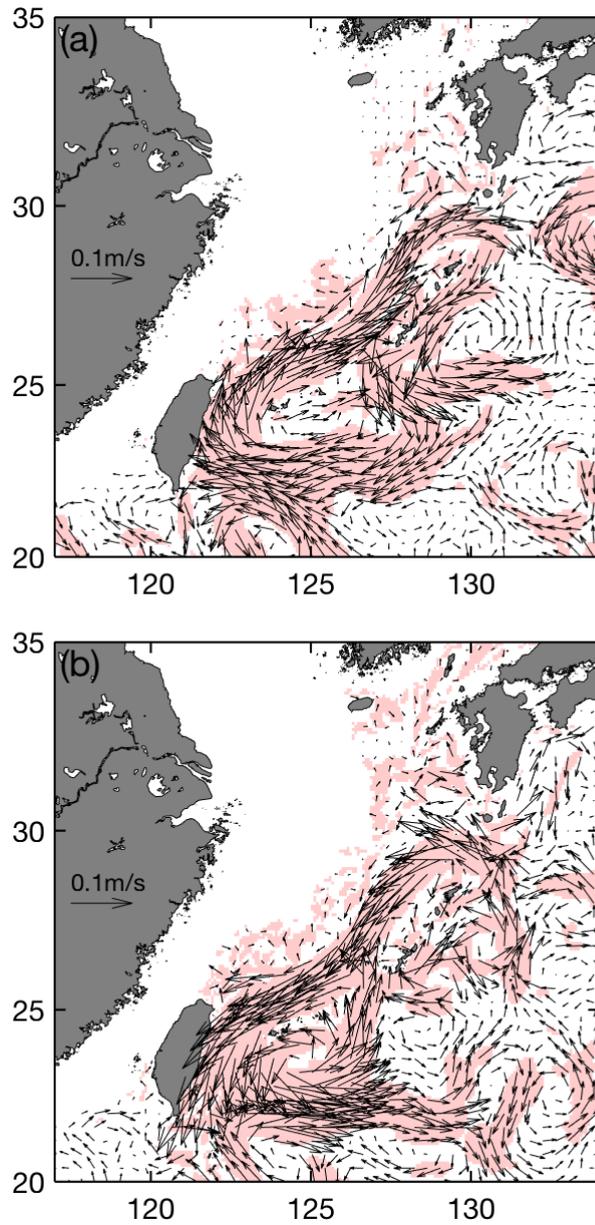


그림 3.3.10. 150일 low-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우(a)와 작은 경우(b)의 100 m 해류 분포(색칠한 부분은 신뢰도 95%이상인 부분을 나타냄).

3. 60~150일 주기 쿠로시오 변동성과 동중국해 해양환경

60~150일 주기대의 쿠로시오 변동과 관련된 동중국해의 수온과 해류 분포를 60~150 band-pass 필터링한 쿠로시오 수송량 변동에서 평균보다 1 표준편차 이상 수송량이 큰 시기와 1 표준편차 이상 수송량이 작은 시기를 구하여 각 시기에 해당하는 합성장을 구하여 조사하였다. 표층 수온 합성장(그림 3.3.11)에서는 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 남서쪽 일부 영역을 제외하면 동중국해 거의 대부분에서 높다. 특히 양쯔강 입구 부근, 제주도 남쪽 해역, 동경 125.5도, 북위 28도 부근 해역의 수온이 높다. 쿠로시오 수송량이 작은 시기에는 동중국해의 광범위한 영역에서 의미있는 고수온이나 저수온이 분포되어 있지는 않다. 다만 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 상대적으로 수온이 높지 않은 영역에서 작은 시기에 수온이 높은 양상이 있다. 쿠로시오의 주축과 류큐열도 사이에서는 수온이 작은 형태가 유의미하게 보인다.

50 m 수온 합성장(그림 3.3.12)에서 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 동중국해 중앙부부터 제주도 남쪽, 대한해협까지 이어지는 영역에서 수온이 높은 분포가 보인다. 이러한 분포 양상은 표층 수온 합성장에서 보이는 분포와 유사하나 그 크기는 50 m의 수온이 더 높다. 반면, 쿠로시오 수송량이 작은 시기에는 제주도 남서부에서 제주해협으로 이어지는 부분에서 수온이 높다. 쿠로시오 주축과 류큐열도 사이에서는 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 수온이 높고 작은 시기에 수온이 낮은 대조적인 양상이 뚜렷하고, 대만 북동쪽에서는 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 수온이 낮고 작은 시기에 수온이 높은 대조도 분명하다.

100 m 수온 합성장(그림 3.3.13)은 쿠로시오 수송량이 큰 시기와 작은 시기의 대조가 매우 뚜렷하다. 대만북동쪽에서 대륙사면 부근을 따라 북동쪽으로 수온이 낮은 형태가 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 보이고 수온이 높은 형태가 작은 시기에 보인다. 쿠로시오 주축의 남동쪽 영역에서는 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 수온이 높고 작은 시기에 수온이 낮은 양상도 매우 뚜렷하다. 또한 북위 31도 부근에서 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 수온이 낮고 작은 시기에 수온이 높은 대조도 나타난다.

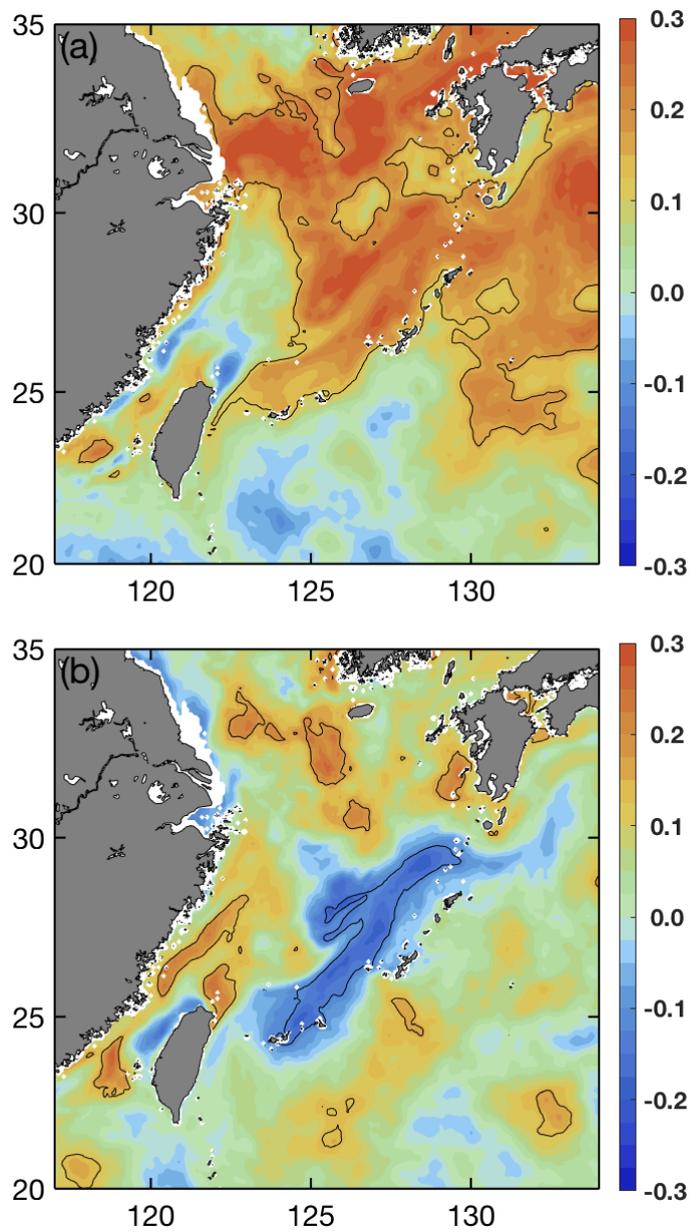


그림 3.3.11. 60~150일 band-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우(a)와 작은 경우(b)의 표층 수온 분포(실선은 신뢰도 95%를 나타냄).

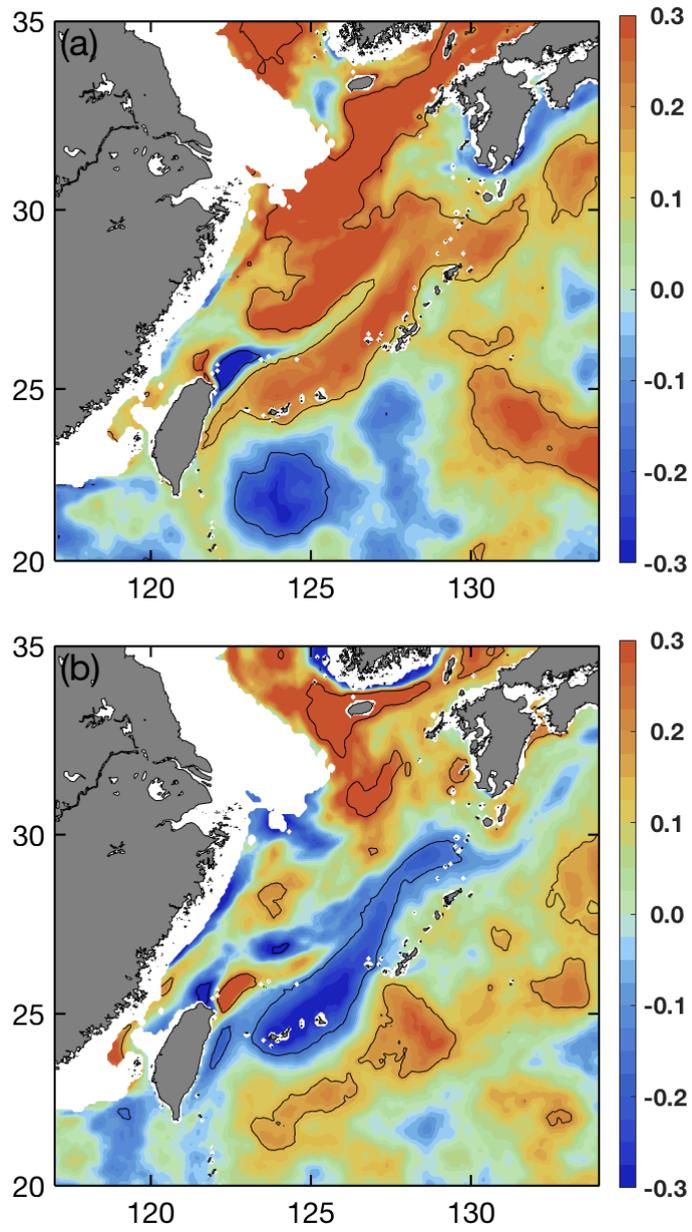


그림 3.3.12. 60~150일 band-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우(a)와 작은 경우(b)의 50 m 수온 분포(실선은 신뢰도 95%를 나타냄).

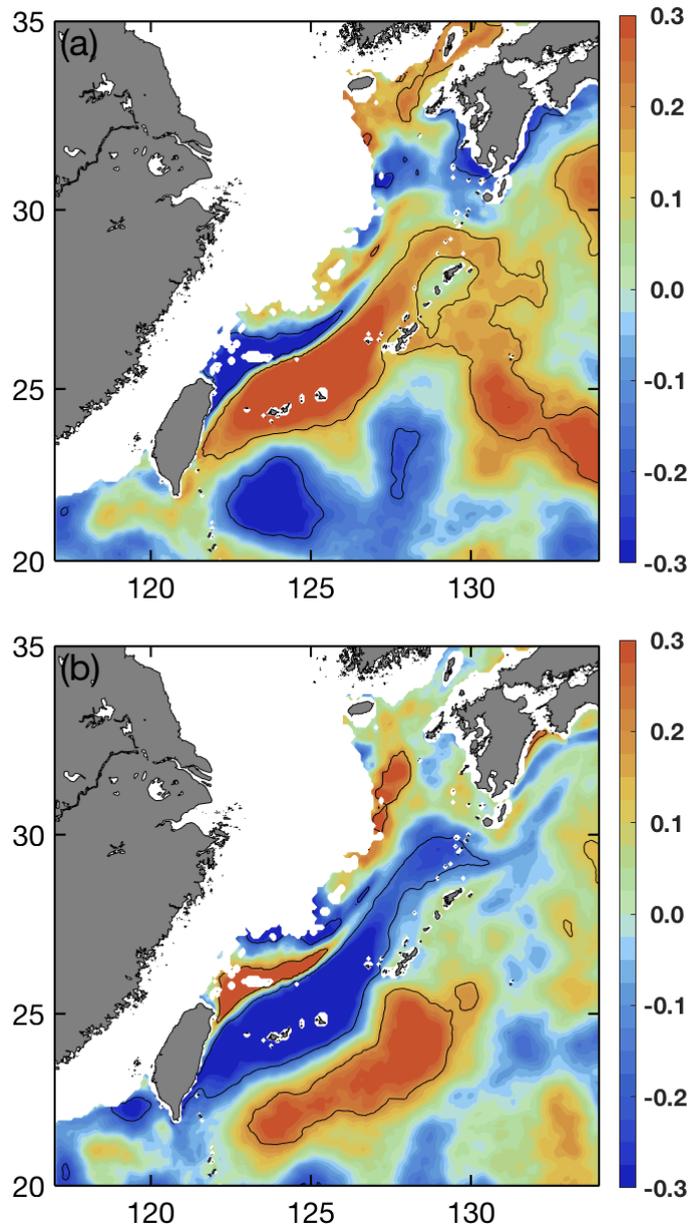


그림 3.3.13. 60~150일 band-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우(a)와 작은 경우(b)의 100 m 수온 분포(실선은 신뢰도 95%를 나타냄).

그림 3.3.14~3.3.16은 60~150일 band-pass 필터링한 쿠로시오 수송량에 대한 해류 합성장으로 붉은색으로 표시된 부분은 신뢰도 95%이상인 부분이다. 150일 low-pass 필터링한 쿠로시오 수송량과 연관된 표층 해류 합성장(그림 3.3.8)에서 쿠로시오 경로의 해류가 쿠로시오 수송량과 관련이 매우 큰 것으로 나타났다. 즉 쿠로시오 수송량이 큰 시기에는 쿠로시오 진행방향(북동향)의 편차가 크고 작은 시기에는 반대방향(남서향)의 편차가 크게 나타났다. 60~150일 band-pass 필터링한 쿠로시오 수송량에 대한 표층 해류 합성장(그림 3.3.14)에서도 이런 경향이 뚜렷하게 보인다. 그러나 150일 low-pass 필터링한 쿠로시오 수송량에 대한 표층 해류 합성장에서 쿠로시오 경로의 뚜렷한 대조가 대만 동쪽에서 토카라 해협까지 계속 연결되어 나타남에 비해 60~150일 band-pass 필터링한 쿠로시오 수송량에 대한 표층 해류 합성장에서는 그 대조가 북위 28도까지만 나타난다.

50 m 해류 합성장(그림 3.3.15)에서는 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 표층에서 뚜렷하게 보이던 제주도를 시계방향으로 돌아 대한해협 서수도로 이어지는 편차의 양상이 보이지 않는다. 또한 표층에서는 중국 동쪽의 북위 28~30도 부근에서 북향하는 형태가 북위 32도까지 연결된 형태가 나타나지만 50 m에서는 양자강퇴(Changjiang bank)남쪽 북위 30도 부근에서 동향하는 편차와 연결된 듯이 나타난다. 이는 50 m보다 얕은 양자강퇴의 수심때문인 것으로 판단된다. 쿠로시오 수송량이 큰 시기와 작은 시기 모두 제주도 남쪽 북위 31~32도 부근에서 50 m 해류는 북향하는 편차가 보이나 쿠로시오 수송량이 큰 시기에는 제주도를 시계방향으로 도는 해류 편차와 연결된 양상을 떠나 작은 시기에는 제주도 동쪽의 해류편차와 연결된 양상을 띤다. 한편, 쿠로시오 수송량이 작은 시기에 표층 해류 합성장에서는 보이지 않던 제주해협에서 대한해협 서수도까지 이어지는 해류 편차가 보이는데 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 표층 해류 합성장에서 보이던 양상과 유사하기는 하나 제주해류와 연관성이 다르다. 즉, 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 표층 해류 합성장에서 보이던 제주해협의 동향 편차와 대한해협 서수도의 북동향 편차는 제주도 서쪽에서 보이는 제주해류의 북향 편차와 연결되어 있어 제주해류가 강한 것에서 비롯된 것으로 판단되나 50 m 해류 합성장에서는 제주도 서쪽에서 제주해류의 북향 편차가 보이지 않아 제주해류의 강화에 의한 현상이 아니라 황해의 순환과 연관된 것으로 판단된다.

100 m 해류 합성장(그림 3.3.16)에서는 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 북위 27.5도, 동경 125.5도 부근에서 대륙붕 안쪽으로 향하는 서향의 편차가 보임에 반해 쿠로시오 수송량이 작은 시기에는 대륙붕 밖으로 향하는 남동향의 편차가 보인다.

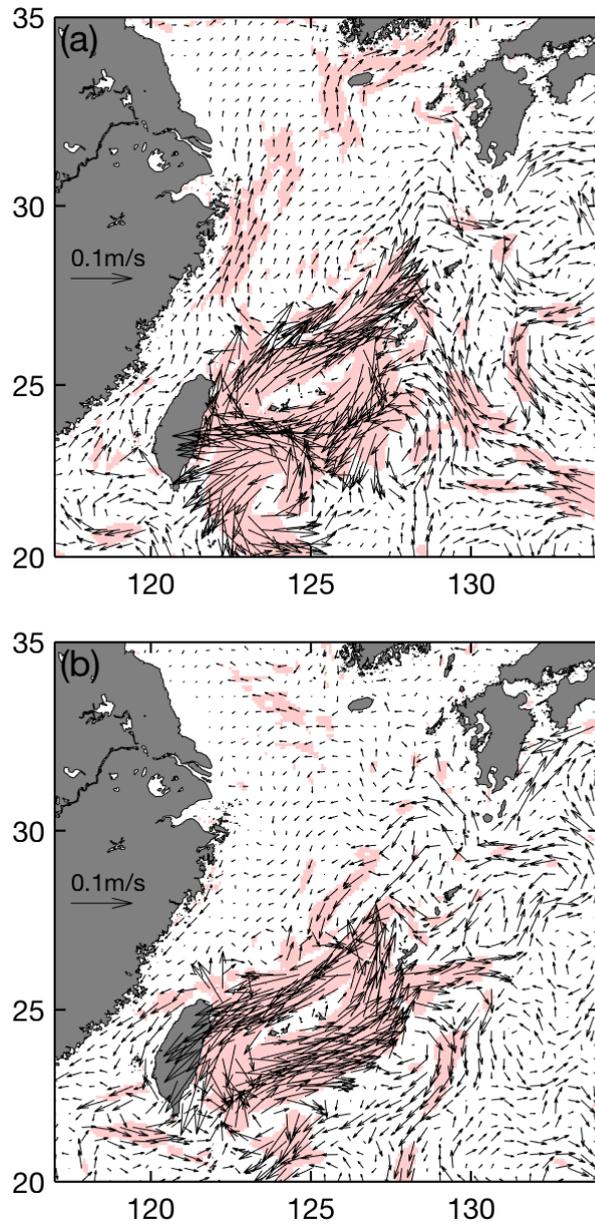


그림 3.3.14. 60~150일 band-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우(a)와 작은 경우(b)의 표층 해류 분포(색칠한 부분은 신뢰도 95%이상인 부분을 나타냄).

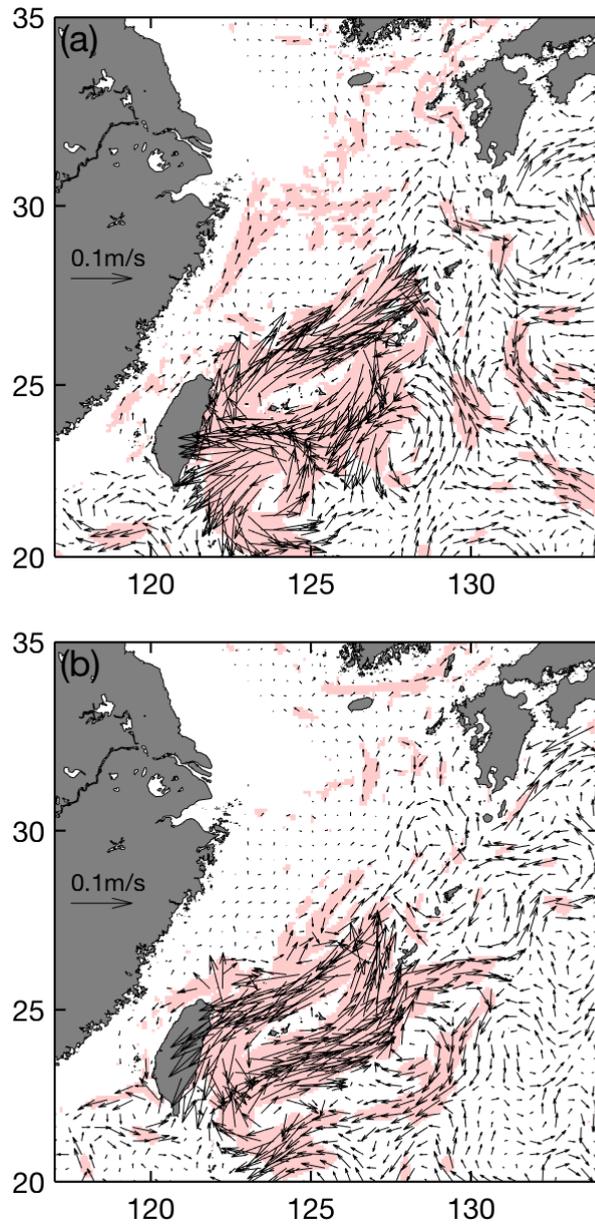


그림 3.3.15. 60~150일 band-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우(a)와 작은 경우(b)의 50 m 해류 분포(색칠한 부분은 신뢰도 95%이상인 부분을 나타냄).

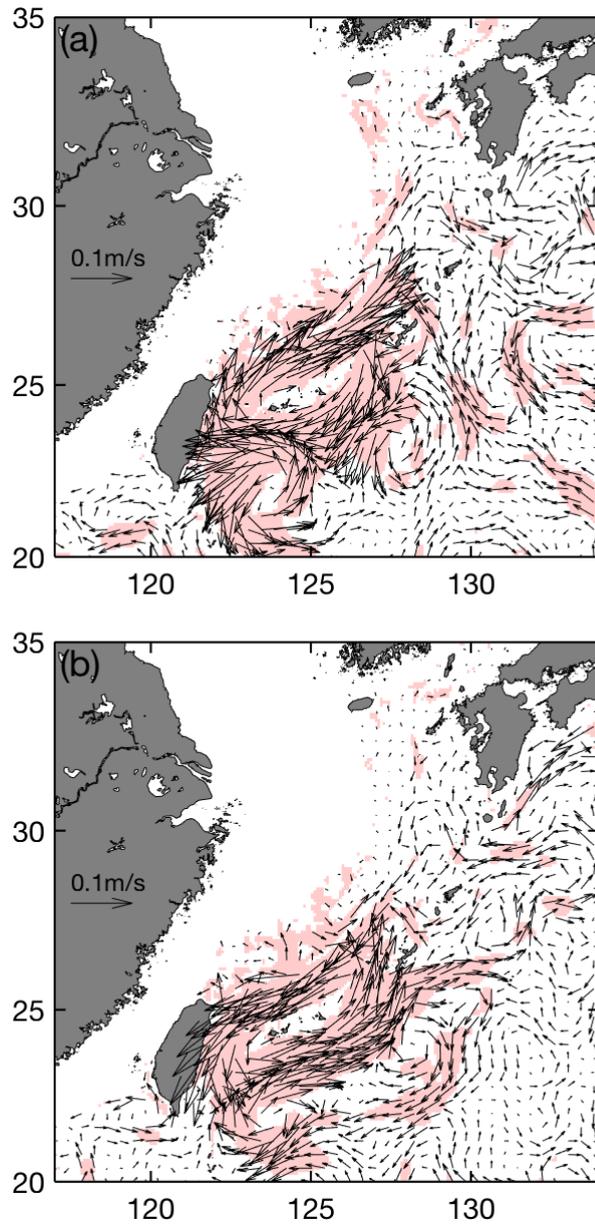


그림 3.3.16. 60~150일 band-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우(a)와 작은 경우(b)의 100 m 해류 분포(색칠한 부분은 신뢰도 95%이상인 부분을 나타냄).

4. 단주기 쿠로시오 변동성과 동중국해 해양환경

두 달 이내의 단주기 쿠로시오 변동과 관련된 동중국해의 수온과 해류 분포를 60일 high-pass 필터링한 쿠로시오 수송량 변동에서 평균보다 1 표준편차 이상 수송량이 큰 시기와 1 표준편차 이상 수송량이 작은 시기를 구하여 각 시기에 해당하는 합성장을 구하여 조사하였다. 60일 이상 장주기 쿠로시오 수송량 변동과 연관된 수온과 해류 분포가 동중국해의 상당한 영역에서 의미있는 차이를 보이는 반면 60일 이하의 단주기 변동과 연관된 수온과 해류 분포는 동중국해 전체에서 의미있는 차이를 보이기보다는 주로 동중국해 남부의 국한된 영역에서 의미있는 차이를 보이는 특징이 있다.

표층 수온 합성장(그림 3.3.17)에서는 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 대만해협 등 일부 영역을 제외하면 유의미한 양상이 보이지 않는다. 쿠로시오 수송량이 작은 시기에는 북위 27도 부근에서 수온이 낮은 양상이 보이고 북위 25~28도, 쿠로시오 주축과 류큐열도 사이 영역에서 수온이 낮은 양상이 보인다.

50 m 수온 합성장(그림 3.3.18)에서는 대만 북동쪽에서 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 수온이 낮고 작은 시기에 수온이 높은 대조가 보이고 북위 25.5도, 동경 126도 부근의 수온은 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 높고 작은 시기에 낮은 대조를 보인다. 쿠로시오 수송량이 작은 시기에 동중국해 대륙붕 북위 27도 부근에서 수온이 낮은 특징이 보이며 덜 명확하긴 하지만 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 이 영역의 수온은 높은 것으로 보인다.

100 m 수온 합성장(그림 3.3.19)에서는 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 대만 북동쪽에서 대륙사면을 따라서 수온이 낮고 쿠로시오 주축과 류큐열도 사이, 북위 25~26도 사이에서 수온이 높은 특징이 보인다. 이와 대조적으로 쿠로시오 수송량이 작은 시기에는 대륙사면을 따라서 수온이 높고 쿠로시오 주축과 류큐열도 사이에서 수온이 낮은 특징이 보인다.

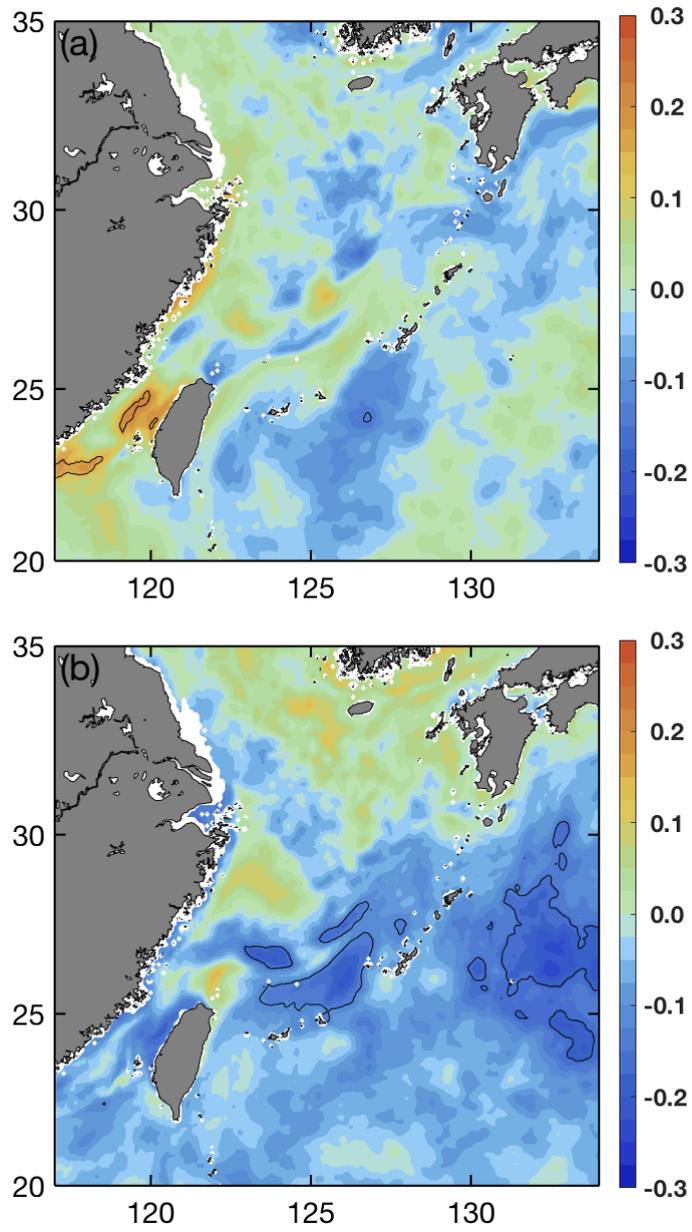


그림 3.3.17. 60일 high-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우(a)와 작은 경우(b)의 표층 수온 분포(실선은 신뢰도 95%를 나타냄).

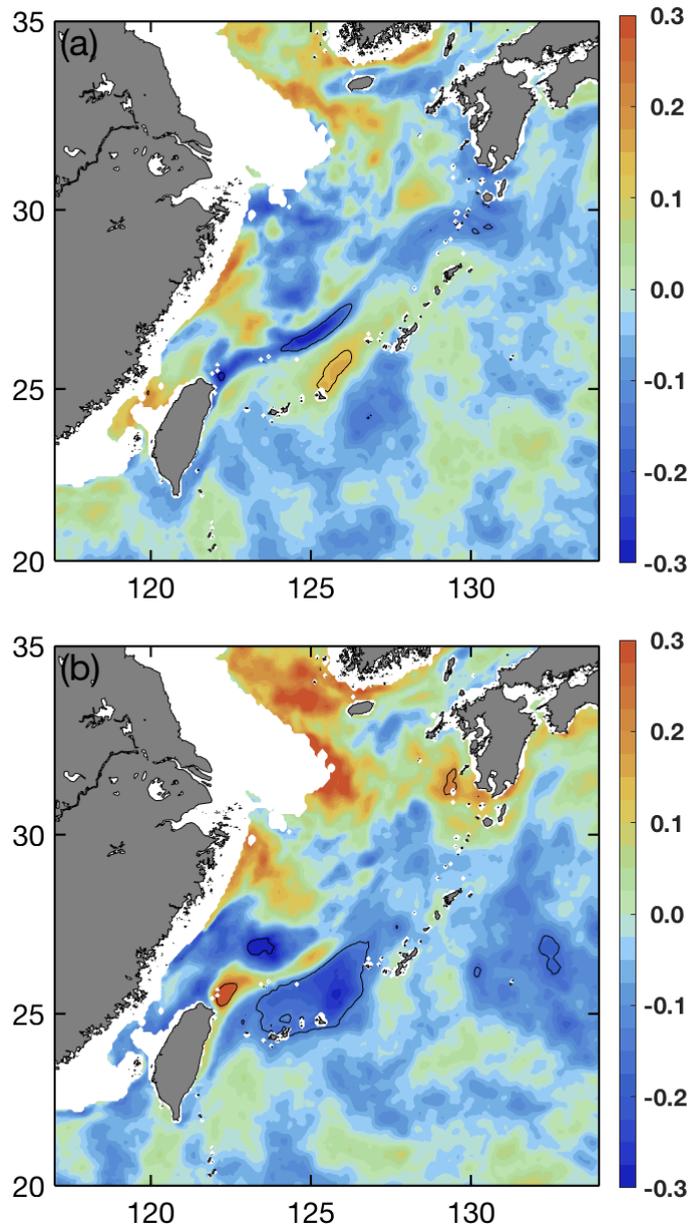


그림 3.3.18. 60일 high-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우(a)와 작은 경우(b)의 50 m 수온 분포(실선은 신뢰도 95%를 나타냄).

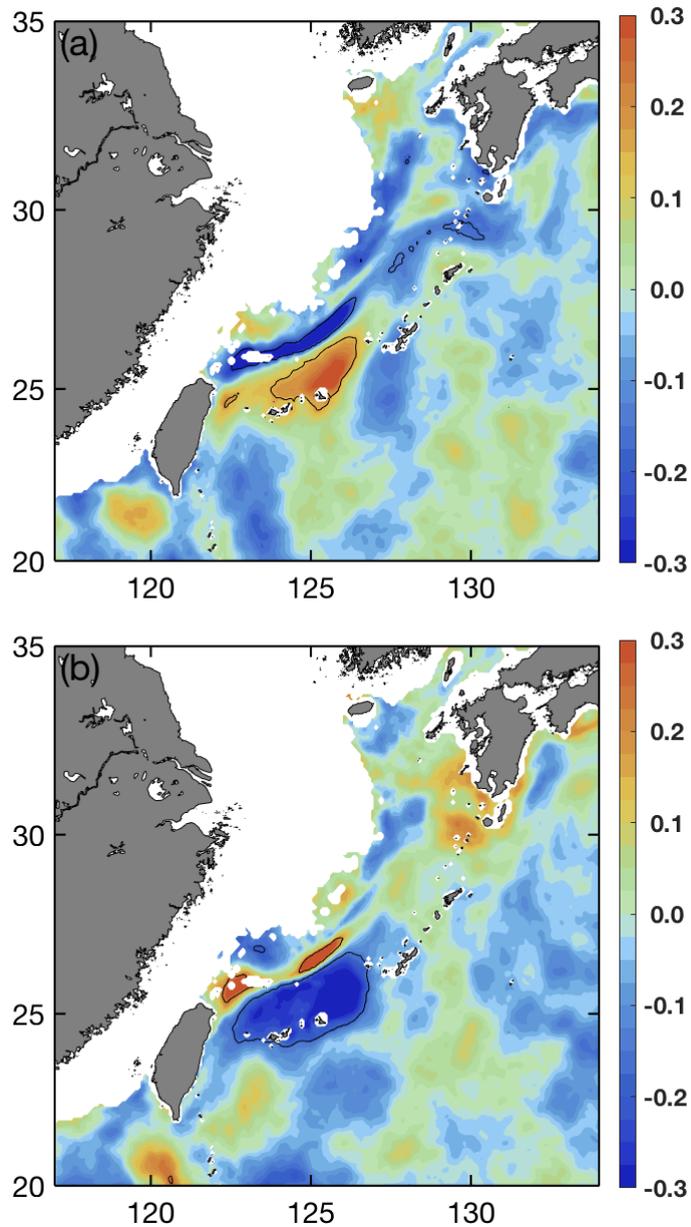


그림 3.3.19. 60일 high-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우(a)와 작은 경우(b)의 100 m 수온 분포(실선은 신뢰도 95%를 나타냄).

그림 3.3.20~3.3.22은 60일 high-pass 필터링한 쿠로시오 수송량에 대한 해류 합성장으로 붉은색으로 표시된 부분은 신뢰도 95%이상인 부분이다. 표층, 50 m, 100 m 합성장 모두에서 쿠로시오 수송량이 큰 시기에는 대만 동쪽 북위 24도 부근부터 북쪽으로 쿠로시오 흐름 방향의 편차가, 쿠로시오 작은 시기에는 쿠로시오 흐름 반대 방향의 편차가 뚜렷하다. 또한 북위 25.5도, 동경 126도를 중심으로 쿠로시오 수송량이 큰 시기에는 시계방향의 흐름 편차

가, 쿠로시오 수송량이 작은 시기에는 반시계방향의 흐름 편차가 대조적으로 나타난다. 60일 이상의 쿠로시오 수송량 변동에 대한 해류 합성장에서 동중국해 북부역의 해류가 쿠로시오 수송량이 클 때와 작을 때에 대조적인 특징을 보이는 양상이 있는 것과 달리 60일 이하의 단주기 쿠로시오 수송량 변동과 연관된 해류에서는 제주도를 포함한 동중국해 북부역에서 의미있는 차이가 보이지 않는다.

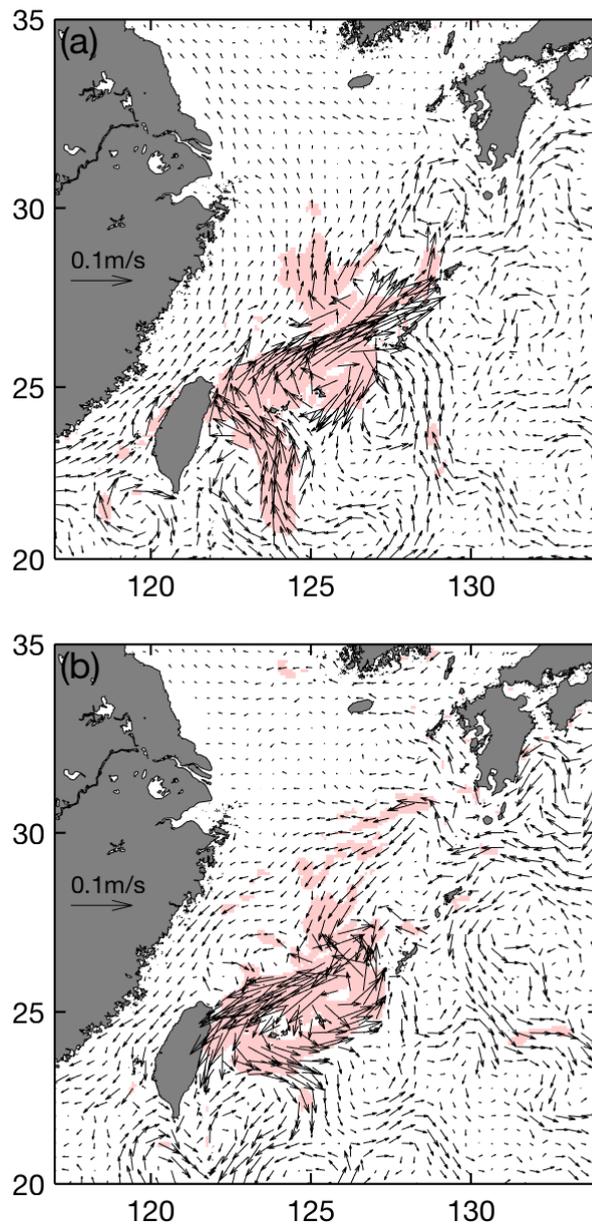


그림 3.3.20. 60일 high-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우(a)와 작은 경우(b)의 표층 해류 분포(색칠한 부분은 신뢰도 95%이상인 부분을 나타냄).

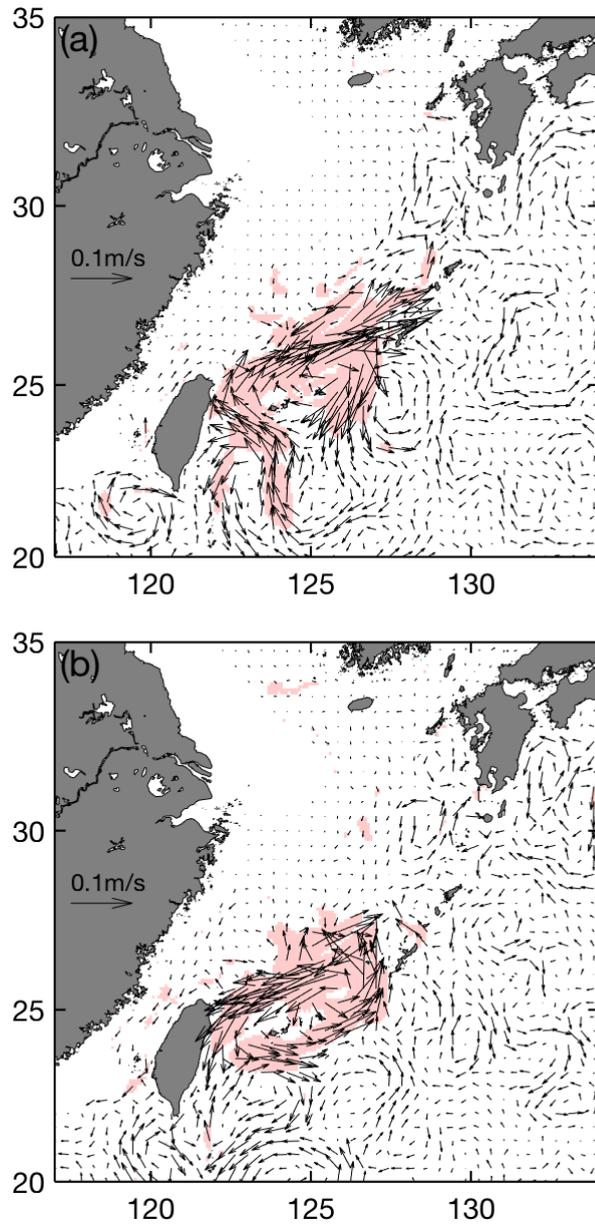


그림 3.3.21. 60일 high-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우(a)와 작은 경우(b)의 50 m 해류 분포(색칠한 부분은 신뢰도 95%이상인 부분을 나타냄).

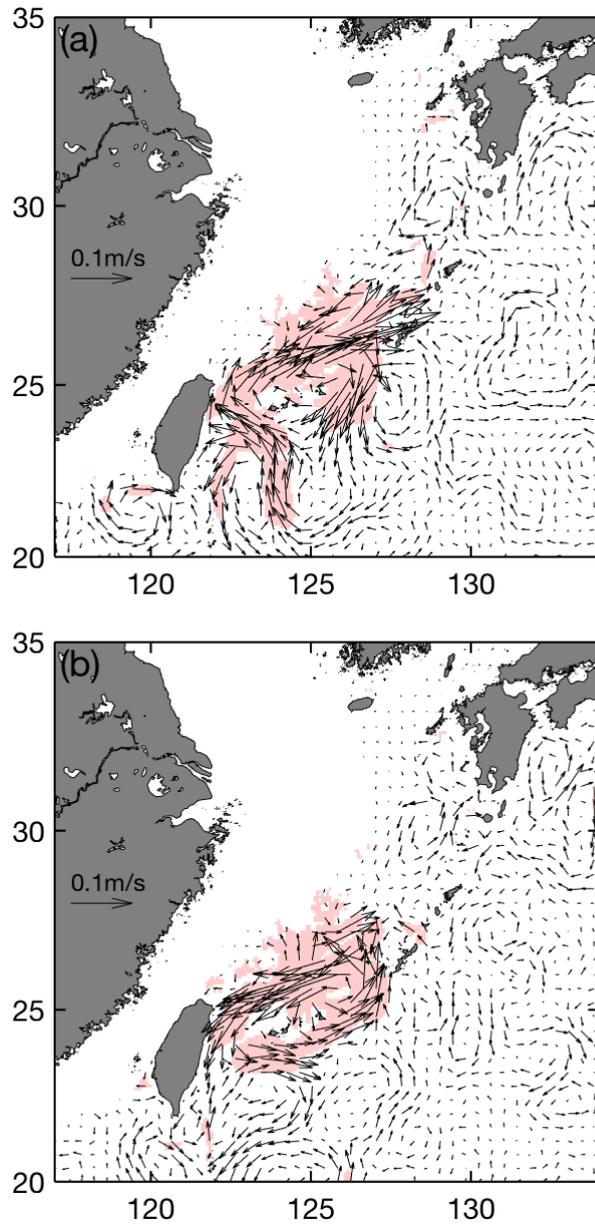


그림 3.3.22. 60일 high-pass 필터링한 쿠로시오 수송량이 큰 경우(a)와 작은 경우(b)의 100 m 해류 분포 (색칠한 부분은 신뢰도 95%이상인 부분을 나타냄).

5. 쿠로시오 변동성과 동중국해로의 유입 관계

쿠로시오 해수와 동중국해 해수의 물질교환은 쿠로시오가 흐르는 대륙사면 주변에서는 일어나는 전선작용에 의해 발생하기도 하고 쿠로시오 해수가 동중국해 대륙붕으로 직접 유입되어 발생하기도 한다. 쿠로시오 해수가 동중국해 대륙붕으로 직접 유입되는 주요 영역은 대만 북동쪽 해역이다. 쿠로시오 수송량 변동성과 동중국해로 직접 유입되는 현상의 상관성을 조사하였다.

그림 3.3.23은 150일 low-pass 필터링한 쿠로시오 수송량과 60~150일 band-pass 필터링한 쿠로시오 수송량에 대한 50 m 수온 합성장이다. 쿠로시오 축의 서쪽 대만 북동쪽 해역의 수온이 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 낮고 쿠로시오 수송량이 작은 시기에 높은 특징이 뚜렷하게 보이고 그 특징이 대륙사면을 따라 북동쪽으로 연결되어 있다. 대만 북동쪽 해역에 따뜻한 쿠로시오 해수가 많이 유입되면 수온이 높을 것이고 적게 유입되면 수온이 낮을 것이기 때문에 이러한 수온 분포의 차이는 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 비해 작은 시기에 쿠로시오 해수가 이 해역에 더 많이 유입되는 것을 암시한다.

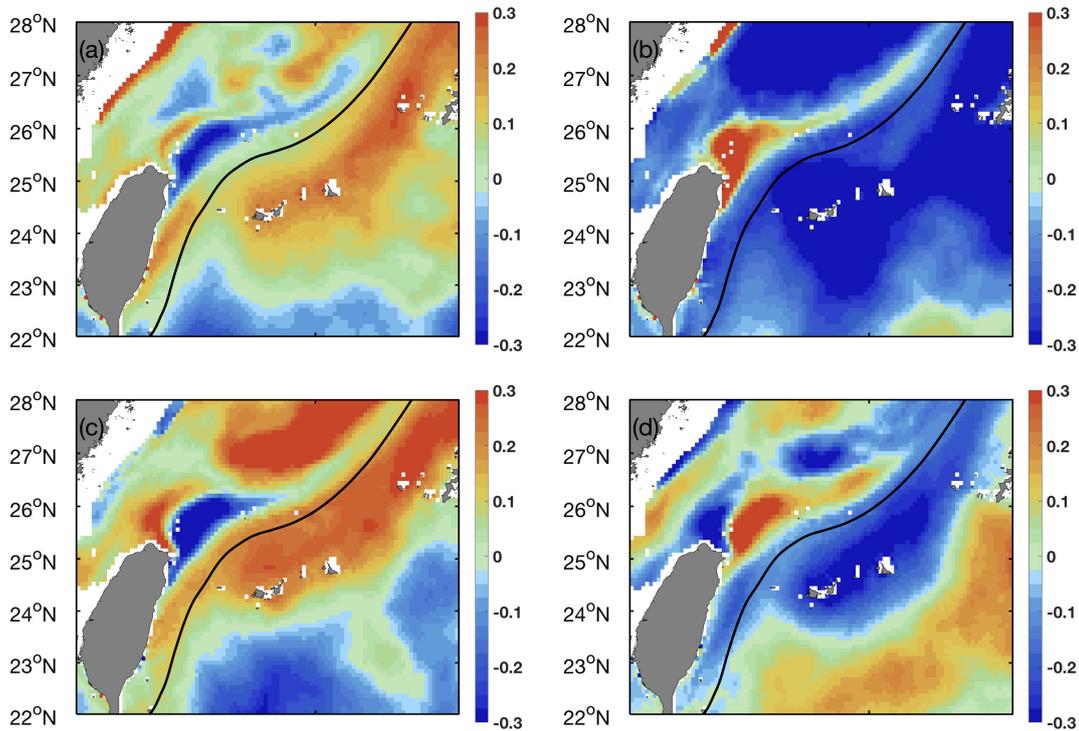


그림 3.3.23. 150일 low-pass 필터링(a, b)과 60~150일 band-pass 필터링(c, d)한 쿠로시오 수송량이 큰 경우(a, c)와 작은 경우(b, d)의 50 m 수온 분포(실선: 쿠로시오 축).

그림 3.3.24은 150일 low-pass 필터링한 쿠로시오 수송량과 60~150일 band-pass 필터링한 쿠로시오 수송량에 대한 표층 해류 합성장이다. 수온 합성장에서 유추되는 현상이 해류 합성장에 잘 나타나는데 쿠로시오 수송량이 작은 시기에 대만 북동쪽 해역에서 해류 편차가 북서~북쪽 방향임에 반해 쿠로시오 수송량이 큰 시기에는 남서~남동 방향이다. 즉, 쿠로시오 수송량이 큰 시기에 대만 북동쪽 해역에서 동중국해 대륙붕으로 유입되는 해류가 약하고 쿠로시오 수송량이 작은 시기에 유입되는 해류가 강한 특징이 잘 나타난다.

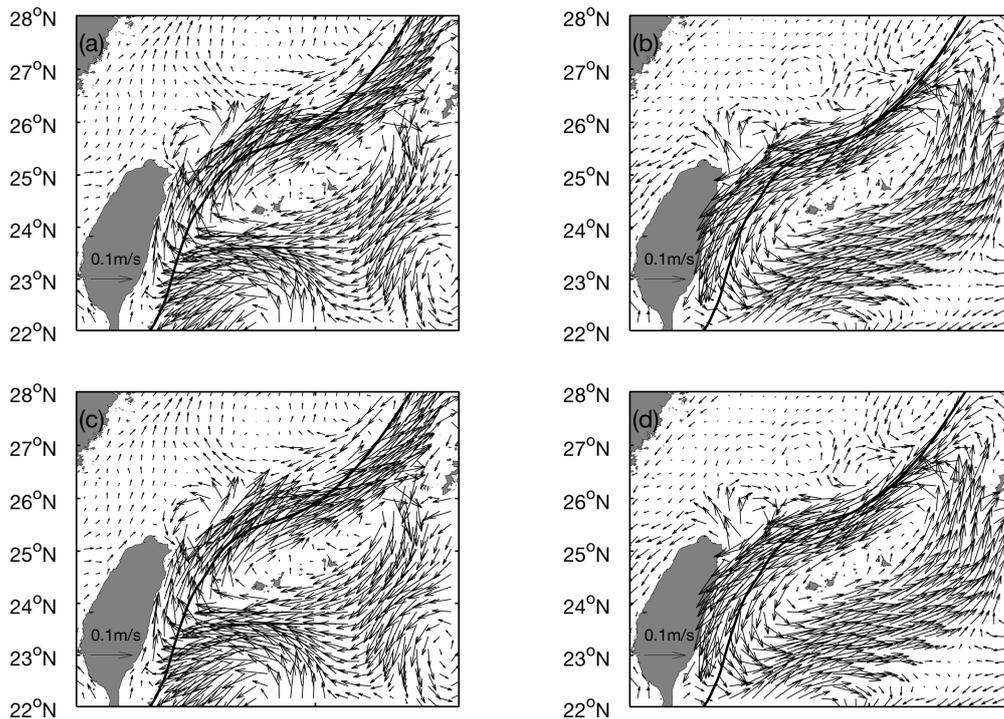


그림 3.3.24. 150일 low-pass 필터링(a, b)과 60~150일 band-pass 필터링(c, d)한 쿠로시오 수송량이 큰 경우(a, c)와 작은 경우(b, d)의 표층 해류 분포(실선: 쿠로시오 축).

제 4 절 동중국해 해수면 상승

1. 동중국해 및 주변해 조위자료 상승 특성

황동중국해는 북서태평양 대양과 인접하고 동해로 대마난류수가 통과하는 지역적 특성을 지니고 있다. 따라서 황동중국해 남부는 상대적으로 깊은 수심이 위치하고, 북측은 100 m 이하의 천해 특성을 보이기 때문에 해양학적 특성이 복잡하고, 조석/조류 특성이 지배적이다. 해수면 상승 측면에서는 대양의 수괴 특성이 나타나지 않기 때문에 밀도 변화 효과에 의한 해수면 변화가 왜곡되어 나타날 수 밖에 없다. 따라서 황동중국해에서의 해수면 상승 경향과 그 기작에 대한 이해는 흥미로운 주제이기도 하다.

그림 3.4.1a에 황동중국해 및 동해 한국과 일본의 연안 해수면 상승 특성 평가를 위해 검조자료를 수집한 검조소 위치를 나타내었다. 황동중국해(Yellow and East China Seas: YECS)와 동해(East/Japan Sea: EJS) 해역에 속하는 관측 영역을 점선으로 표기하였다. 그림 3.4.1b에 황동중국해 해역 해수특성 24년(1992~2015년)간 수온, 염분 관측 지점을 표기하였다.

황동중국해에서 1992~2016년간 한일 연안 23개 검조소에서 자료를 수집하고 연평균 해면 자료를 산정하여 황동중국해에서 해수면 상승을 추정한 수치는 2.95 mm/yr이다(그림 3.4.2). 반면 동해에서 동일시기에 수집한 상승률 자료는 그림 3.4.3에 제시한 바와 같으며, 평균 상승률은 4.29 mm/yr을 보였다. 이는 대략 알려진 전지구 평균(3.2 mm/yr)보다 황동중국해의 경우 약간 작지만, 동해의 경우 1 mm/yr보다 크다. 이 같은 차이는 황동중국해의 경우 관측점이 한반도 연안과 대한해협 한일 연안에 분포한 관측점의 영향이고, 동해의 경우 상대적으로 동해 전체 중 해수면 상승률이 큰 동해 남측 영역에 관측점이 치우친 탓으로 생각된다.

연안에 치우쳐 존재하는 검조소 자료만으로 황동중국해나 동해의 해수면의 변화를 파악할 수 없기 때문에 전지구 해양을 수백만 포인트에서 감시하는 고도 위성 자료를 활용하였다. 동해의 경우 1400여 점에 대한 정보를 알 수 있기 때문에 훨씬 신뢰성이 있는 정량적인 상승률을 산정할 수 있다는 장점이 있다.

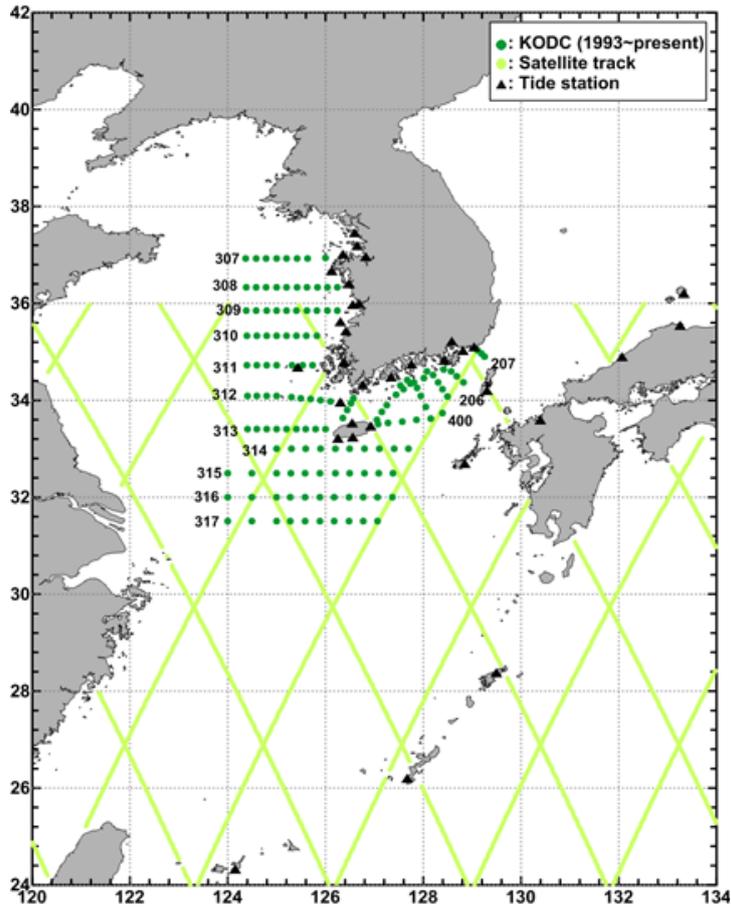


그림 3.4.1b. 황동중국해 해역 해수특성 24년('92-'15)간 관측 지점(녹색점), 위성 고도(연한 연녹색선) 및 조석 관측점(삼각형).

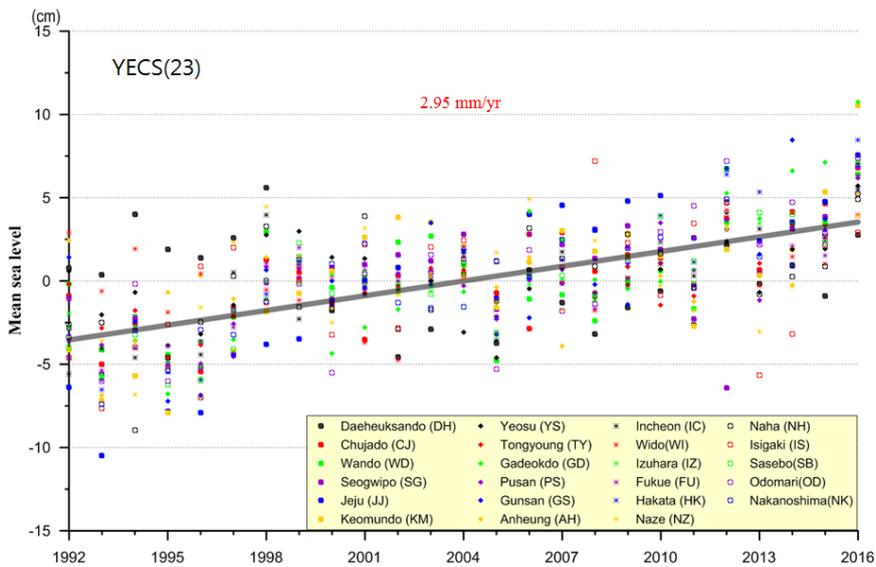


그림 3.4.2. 황동중국해 한국 및 일본 연안 23지점에서 산정한 연평균 해수면 상승 특성.

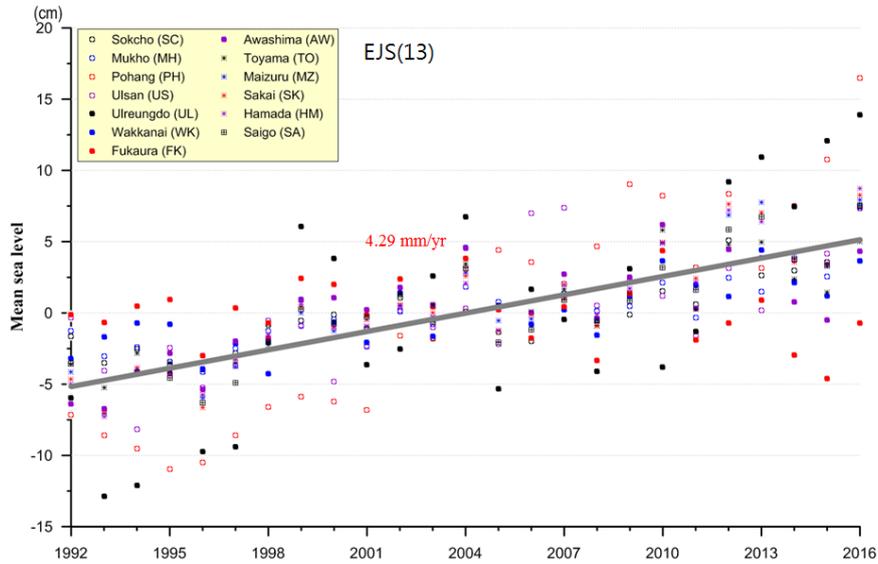


그림 3.4.3. 동해 한국과 일본 연안 13개 지점에서의 연평균 해수면 상승 특성.

2. 동중국해 및 주변해 고도위성자료 해수면 상승 특성

황동중국해는 북서태평양 대양과 인접하고 동해로 대마난류수가 통과하는 지역적 특성을 지니고 있다. 따라서 황동중국해 남부는 상대적으로 깊은 수심이 위치하고, 북측은 100 m 이하의 천해 특성을 보이기 때문에 해양학적 특성이 복잡하고, 조석/조류 특성이 지배적이다. 해수면 상승 측면에서는 대양의 수괴 특성이 나타나지 않기 때문에 밀도변화 효과에 의한 해수면 변화가 왜곡되어 나타날 수 밖에 없다. 따라서 황동중국해에서의 해수면 상승 경향과 그 기작에 대한 이해는 흥미로운 주제이기도 하다.

그림 3.4.4~그림 3.4.7에서 계절변화를 제거한 자료 분석 결과이며, TOPEX/ POSEIDON, Jason-1, Jason-2, Jason-3 고도위성 자료를 연결한 자료 특성이다. 동중국해와 동해의 해수면 상승 시계열 자료로부터 선형 기울기를 산정한 결과는 그림 3.4.8에 제시한 바와 같이 NOAA에서 산정한 상승률 수치와 유사하다.

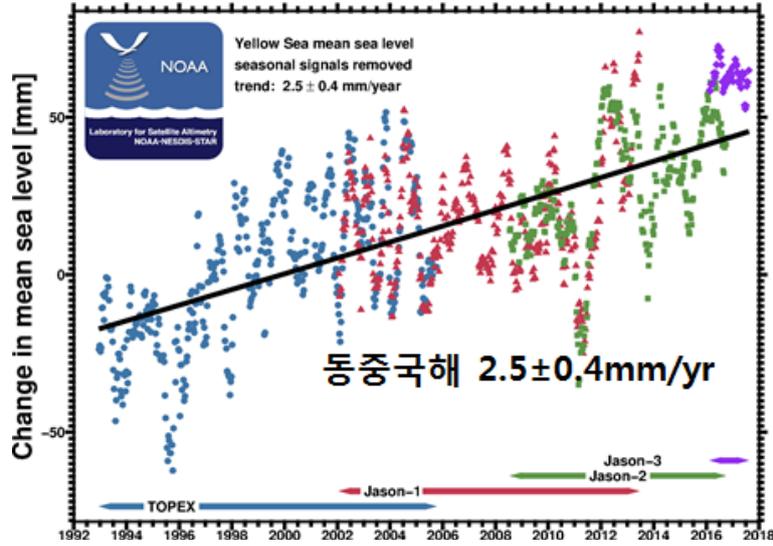


그림 3.4.4. 계절변화를 제거한 동중국해 고도위성 해수면 상승 특성.

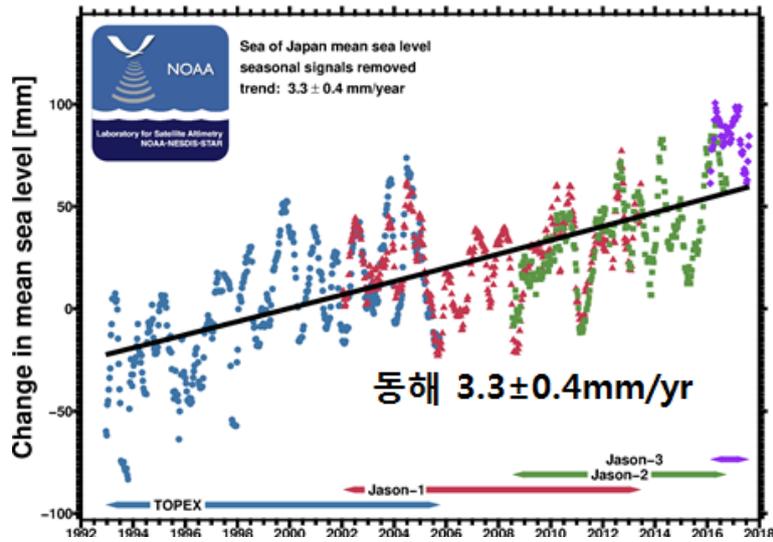


그림 3.4.5. 계절변화를 제거한 동해 고도위성 해수면 상승 특성.

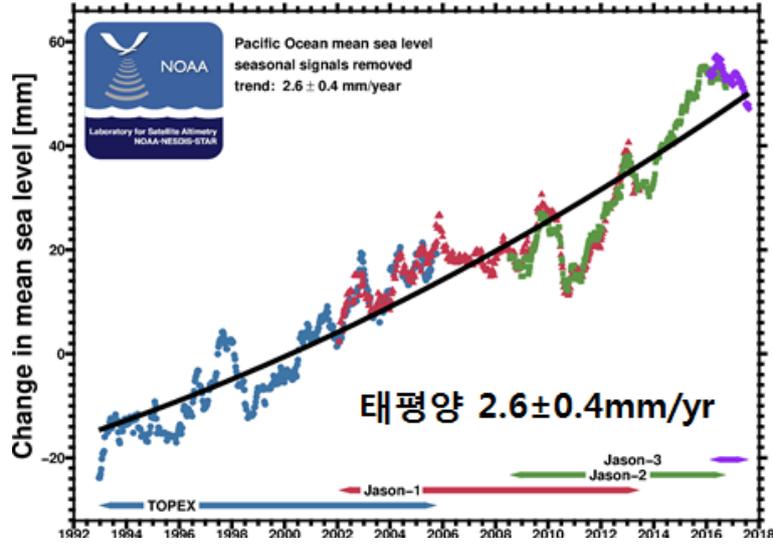


그림 3.4.6. 계절변화를 제거한 태평양 고도위성 해수면 상승 특성.

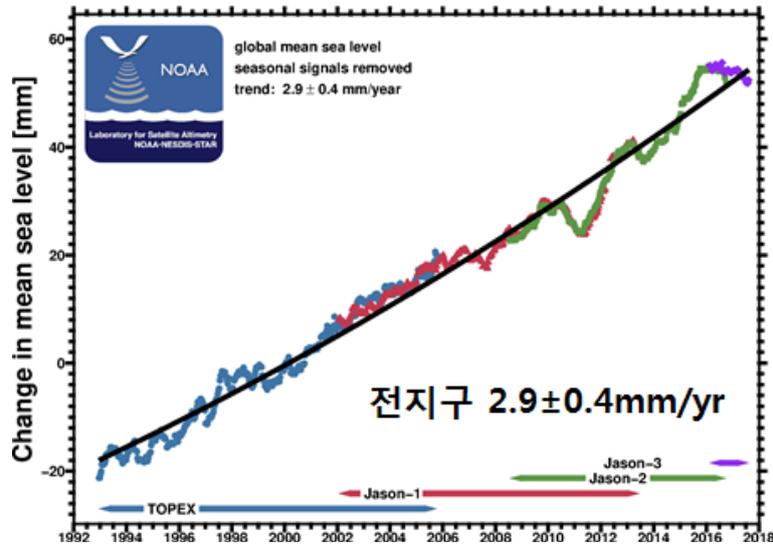


그림 3.4.7. 계절변화를 제거한 태평양 고도위성 해수면 상승 특성.

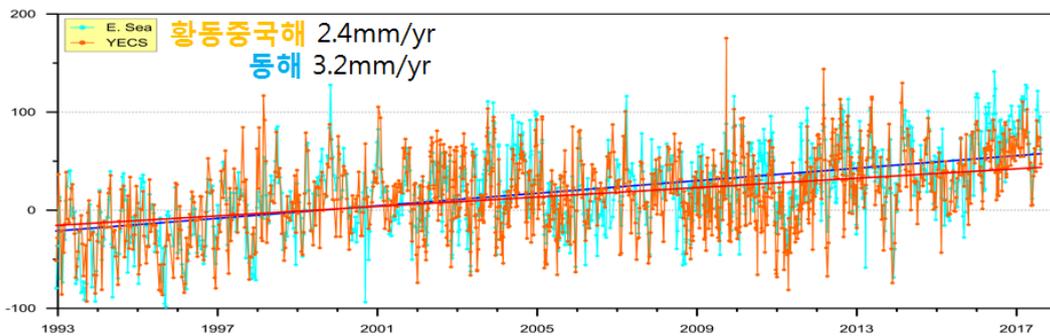


그림 3.4.8. 동중국해와 동해의 시계열 자료로부터 산정한 선형 상승률.

그림 3.4.4~그림 3.4.7에 동중국해, 동해, 태평양, 전지구의 해수면 상승 특성을 각각 제시하였으며, NOAA에서 제시하는 상승률은 2.5 ± 0.4 mm/yr, 3.3 ± 0.4 mm/yr, 2.6 ± 0.4 mm/yr, 3.2 ± 0.4 mm/yr이다. 경향적으로 동해와 황동중국해에 상승 특성이 황동중국해가 동해보다 작게 나타난다. 이는 황동중국해 특성상 대양의 수온, 염분 변화 효과 특성이 두드러지게 나타나지 않기 때문에 나타나는 특성으로 판단된다.

3. 동중국해 및 주변해 해수면 상승 기작

황동중국해에서 보이는 해수면 상승 특성에 대한 기작 이해를 위하여, 그림 3.4.1b에 표기한 관측점에서 황동중국해에서의 24년간(1992~2015년) 해수특성 자료를 수집하여 해수면 상승에 밀도 변화 효과가 미치는 영향을 분석하였다.

그림 3.4.9와 그림 3.4.10은 각각 밀도 변화와 염분 변화에 의한 황동중국해 중부해역(그림 3.4.1b)에서 해수면 변화 특성이다. 밀도 변화에 의한 상승률은 0.58 mm/yr이고, 염분 변화에 따른 상승률은 0.53 mm/yr로서 밀도 변화에 의한 해수면 상승률은 염분 변화에 의한 상승임을 시사하고 있다. 황동중국해 2.5 mm/yr 상승률 중에서 밀도 변화에 의한 상승치가 0.6 mm/yr 임을 감안하면, 나머지 효과는 해빙 요인과 역학적 요인 등에 의한 상승일 가능성이 높다. 해수면 상승 요인으로 대체로 해빙에 의한 상승과 밀도에 의한 상승과 역학적 요인이 대부분 효과를 설명한다고 보면, 전 대양에서 [해빙+역학적 요인]의 기여 예상치는 대략 1.9 mm/yr(2.5 mm/yr \sim 0.6 mm/yr)이다. 이중 해빙에 의한 상승률은 대략 1.5 mm/yr 정도로 알려져 있으므로, 이와 유사한 수치이다.

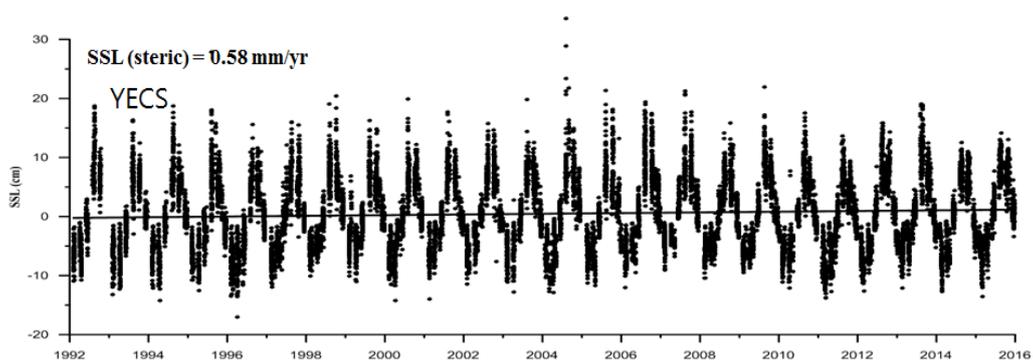


그림 3.4.9. 황동중국해 중부 관측점(그림3.4.1b)에서 밀도 변화에 의한 해수면 변화 특성.

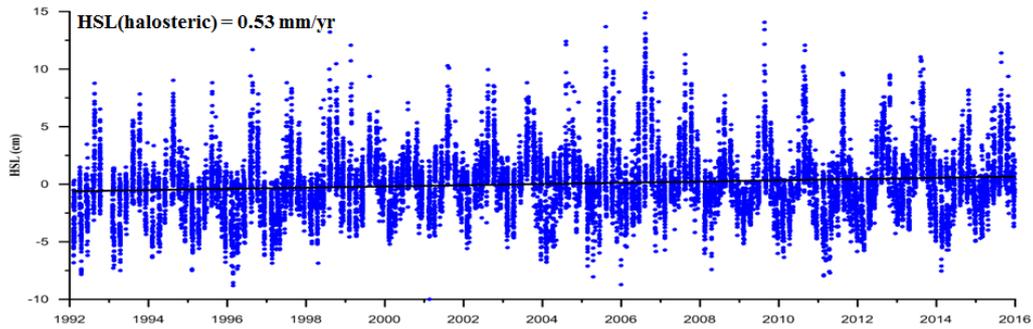


그림 3.4.10. 황동중국해 중부 관측점(그림3.4.1b)에서 염분 변화에 의한 해수면 변화 특성.

0.6 mm/yr 정도의 밀도변화로 인한 상승률이 지역적인 특성인지 아니면 대양에서의 영향인지를 파악하기 위하여 기존 자료(Roemmich *et al.*, 2015)의 연구 결과를 참조한다. 그림 3.4.11은 최근 8년간 전세계 해양에서의 밀도 변화에 의한 상승 분포이다. 대략 동중국해 외해측에서의 밀도 변화에 의한 상승률은 0.0 mm/yr보다 작은 상승치를 보여주고 있다. 즉 동중국해 외양인 북서태평양 해역에서 밀도 변화에 의한 해수면 상승률이 작은 환경에 놓여있음을 알 수 있다. 즉 동중국해의 밀도 변화 상승(Steric sea level)은 필리핀 동측 쿠로시오 상류의 낮은 특성과 관련이 있음을 알 수 있다.

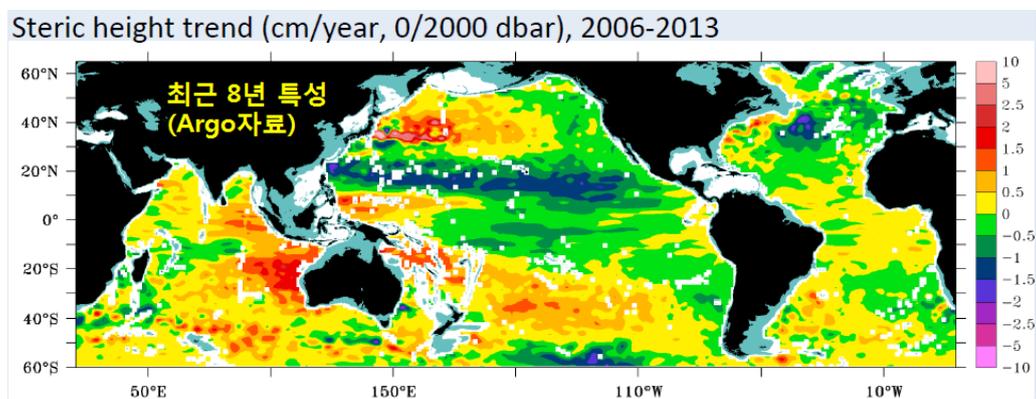


그림 3.4.11. 최근 8년간 밀도변화에 의한 전지구 해양 해수면 상승 공간 분포 (Roemmich *et al.*, 2015).

해수면 상승 요인은 밀도 변화, 역학적 요인, 해빙 유입 요인에 의한 것이라고 할 때, 황동중국해 [역학적요인+해빙요인]의 기여는 앞서 검토한 바와 같이, 1.9 mm/yr로서 대략 해빙에 의한 해수면 변화로 설명되며, 정량적인 상승 크기는 태평양 상승치와 유사하여, 황동중국해의 해수면 상승치는 인접 대양인 태평양의 지배를 받고 있음을 알 수 있다.

이러한 황동중국해와 동해 해수면 경향으로부터 동해에서의 상승은 태평양 인접해임에도 불구하고, 3.3 mm/yr로 크게 나오는 점이 오히려 특징적이다. 동해남서부 해역에서 밀도 변화에 의한 해수면 상승치는 1.2 mm/yr로서 황동중국해보다 0.6 mm/yr 정도 크다. 영역적으로 전체 동해를 대변하지는 못하나, 상대적으로 동해에서의 높은 밀도 변화에 의한 해수면 상승 효과가 보다 해수면 상승치를 높게 하여 지구평균치와 근사하게 유지하는 것으로 보인다. 이는 특히 대마난류수를 통해 태평양에서 전달해 오는 난류 특성에 기인하는 것으로 보인다. 지역해에서의 이같은 상승 특성은 향후 지구 환경변화와 더불어 단계별로 보다 면밀한 분석이 필요할 것으로 보인다.

4. 최근의 해수면 상승 특성

본 소절에서는 세계 주요기관에서 제공하고 있는 해수면 상승 특성의 일부를 소개한다. Colorado 대학에서 최근 2017년 말까지의 해수면 상승 특성은 그림 3.4.12와 같이, 3.1 ± 0.4 mm/yr이고, AVISO, CSIRO, NASA, NOAA에서 분석 제공하고 있는 상승률은 각각 3.4 ± 0.4 mm/yr, 3.3 ± 0.4 mm/yr, 3.4 ± 0.4 mm/yr, 3.2 ± 0.4 mm/yr로서 기관에 따라 약간씩 다르나 대체로 $3.1 \sim 3.4 \pm 0.4$ mm/yr 범위이다.

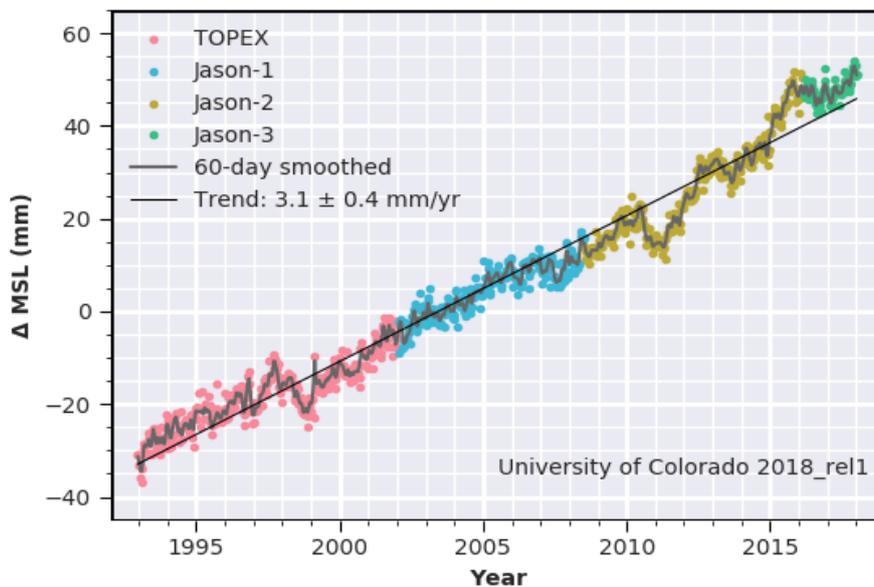


그림 3.4.12. 계절변화를 제거한 고도위성자료로부터 산정한 2017년말까지 해수면 상승률(Colorado Univ.).

최근 25년간 고도위성 자료를 분석하여 Nerm *et al.* (2018)은 전지구평균 기후변화 기인 가속치는 0.084 ± 0.025 mm/yr로서 25년간 평균 2.9 mm/yr 상승치를 합성하면, 단순 외삽법에 의한 2100년까지의 상승치는 2005년 대비 65 ± 12 cm 상승하여, 대략 IPCC (AR5) 예측치와 유사하다고 제시하고 있다. 이는 기후변화에 의한 해수면 상승이 가속화되고 있다는 것을 분석한 연구로서 의미가 있다.

1993~2003년 시기의 공개된 밀도 기인 전지구 해수면 상승치는 대략 1.23 ± 0.2 에서 1.8 ± 0.2 mm/yr로 동중국해 중앙 및 북동부 해역에서 산정한 크기 0.6 mm/yr보다 큰 데, 이는 열팽창 효과가 황동중국해에서는 충분히 나타나지 않은 것으로 추정된다.

Roemmich *et al.* (2015)는 전세계 해양의 최근 8년간(2006~2013년)의 Argo 자료를 분석하여, 바다 속 0~2000 m 수층에서 해양에서 열의 증가가 $0.4 \sim 0.6$ W/m² 수준에서 일어나고 있음을 보였다. 또한 500~2000 m 수심 구간에서 지속적인 수온 상승이 0.005°C/yr 수준으로 일어나고 있음을 보였다. 이는 대양에서 열팽창에 의한 해수면 상승이 지속적으로 일어나고 있음을 시사한다.

대양해수의 질량 변화를 반영하는 Grace 위성자료와 해수위 고도 자료 및 Argo 자료를 분석하여 산출한 결과(그림 3.4.13, South Florida Univ.)에 의하면 열팽창 효과와 해빙 질량 효과에 의한 해수면 상승치 합이 고도위성으로 관측한 상승 변화 결과와 잘 부합되는 것을 알 수 있다. 주목할 특징은 2011~2015년 시기에 해빙에 의한 mass 증가 효과가 두드러진 상승을 보이는 특성을 나타내고 있다.

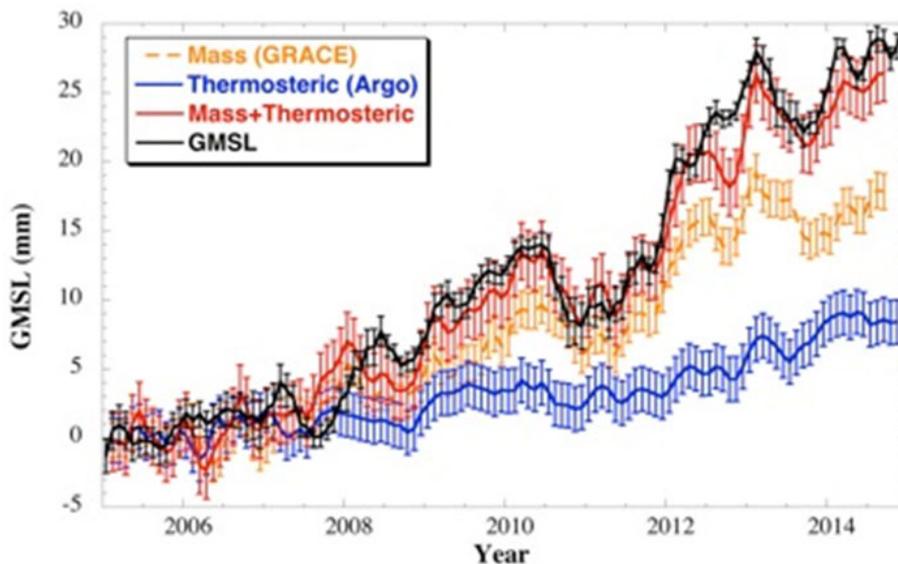


그림 3.4.13. 전지구 해수면 및 GRACE, TPJ, Argo 자료를 이용한 전지구 해수면 상승곡선(Univ. of South Florida).

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

- 국제 공동관측을 통해 쿠로시오 상류역 장기 자료 획득
 - 일본 EEZ 해역에 해당하여 장기 계류 관측이 어려운 곳에서 국제 공동관측을 통해 쿠로시오를 직접 관측
 - 우리나라 주변으로 유입되는 난류의 상류역에서 만 2년간 쿠로시오 변동 연속 자료 확보
 - 위성 고도계 궤도선상에서 물리 관측을 수행하여, 관측한 수송량과 해수면고도의 상관성 분석
 - 선행 연속 관측이 없었던 쿠로시오 상류역에서 해류를 장기간 직접 관측
 - 수치모델 수준 검증에 귀중한 자료로서 수치모델 개선에 활용 가능

- 유속계와 C/PIES로 이루어진 심해 계류 모니터링 시스템 유지
 - 다층 유속 관측 장비와 단층 유속 관측 장비를 함께 활용하는 심해 계류선의 성공적 운영
 - C/PIES 2년 연속 계류 후 성공적으로 회수

- 위성 고도계 자료와 동시 활용
 - C/PIES와 해류계를 위성 고도계 궤도선상에 계류하여 쿠로시오 수송량과 해면고도 상관성 평가 가능
 - 해면고도 자료와의 상관성을 이용하여 1990년대 이후 쿠로시오 수송량의 시계열 산출 가능

- 쿠로시오 수송량 변동성과 동중국해 수온과 해류 변동의 연관성 평가
 - 자료동화 모델 결과를 2년간 직접 관측한 쿠로시오와 비교, 검증함으로써 모델 결과를 이용한 분석의 신뢰성 확보
 - 자료동화 모델 결과에 나타난 1990년대 이후 쿠로시오 수송량의 변동성 분석
 - 쿠로시오 수송량의 변동성을 주기별로 나눠 각 변동성과 연관된 동중국해의 수온과 해류 편차를 구함으로써 쿠로시오 변동에 따른 동중국해 해양환경 영향 변화 추정 가능
 - 쿠로시오 수송량의 변동성과 동중국해로의 쿠로시오 직접 유입의 상관성을 조사함으로써 동중국해로의 해수유입 변동 평가 가능

○ 해수면 상승 평가

- 최근 24년(1993~2016년) 동안 해수면의 정량적 상승치를 산정
- 열염분 변화에 따른 해수면 변화 특성을 산정함으로써 밀도 변화에 의한 상승치를 산정해 해빙 효과와 역학적 요인의 효과 추정 가능

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 한반도 주변해의 수온 상승과 해수물성 변동 원인 제시를 통한 기후변화 대응 방향 수립에 필요한 기초자료로 활용
- 쿠로시오 해류 관측에서 생산된 자료는 지구 기후변화 이해를 위한 각종 사업의 기초 자료 및 검증 자료로 활용
- 동중국해 해양순환 분석 결과는 한반도 주변해역의 생태계 변동을 이해하기 위한 정보를 제공, 생태계 관련 사업의 기초 자료로 활용
- 쿠로시오와 동중국해 해수 교환에 대한 기초 자료로 활용
- 서해 및 남해 해수 순환 및 물질 플럭스 연구의 기반자료로 활용
- 주변해역 순환모델의 자료동화 및 예측모델 검증, 정확도 향상을 위한 자료로 활용
- 우리나라 주변해 해수면 상승 파악 기본 자료로 활용

제 6 장 참고문헌

- 민홍식, 박재훈, 최아라, 박영규, 신경순, 장풍국, 2011. 2006~2010년 기간 동안 대한해협 서수도에서 관측된 해수 물성의 변동. *Ocean & Polar Res.*, 33, 325-336.
- 서성봉, 박영규, 박재훈, 이호진, Hirose N, 2013. 고해상도 해양예보모형 HYCOM에 재현된 쓰시마난류. *Ocean & Polar Res.*, 35, 135-146.
- 홍진실, 서성봉, 전찬형, 박재훈, 박영규, 민홍식, 2016. HYCOM 재분석 자료가 재현한 동해 수온 및 염분 평가. *Ocean & Polar Res.*, 38, 271-286.
- Andres, M., J.-H. Park, M. Wimbush, X.-H. Zhu, K.-I. Chang, and H. Ichikawa, 2008. Study of the Kuroshio/Ryukyu Current system based on satellite-altimeter and in situ measurements. *J. Oceanogr.*, 64, 937 - 950.
- Andres, M., J.-H. Park, M. Wimbush, X.-H. Zhu, H. Nakamura, K. Kim, and K.-I. Chang, 2009. Manifestation of the Pacific Decadal Oscillation in the Kuroshio. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L16602, doi:10.1029/2009GL039216.
- Bleck, R., 2002. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates. *Ocean Model.*, 4, 55 - 88
- Chassignet, E. P., L. T. Smith, G. R. Halliwell, and R. Bleck, 2003. North Atlantic simulations with the HYbrid coordinate ocean model (HYCOM): impact of the vertical coordinate choice, reference pressure, and thermobaricity. *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 2504 - 2526
- Good, S. A., M. J. Martin, and N. A. Rayner, 2013. EN4: quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates. *J. Geophys. Res.*, 118, 6704 - 6716, doi:10.1002/2013JC009067.
- Jan, S., Y. J. Yang, J. Wang, V. Mensah, T.-H. Kuo, M.-D. Chiou, C.-S. Chern, M.-H. Chang, and H. Chien, 2015. Large variability of the Kuroshio at 23.75 N east of Taiwan. *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, 1825-1840, doi:10.1002/2014JC010614.

- Johns, W. E., T. N. Lee, D. Zhang, R. Zantopp, C.-T. Liu, and Y. Yang, 2001. The Kuroshio east of Taiwan: Moored transport observations from the WOCE PCM-1 Array. *J. Phys. Oceanogr.*, 31, 1031 - 1053.
- Kennelly, M. A., K. L. Tracey, and D. R. Watts, 2007. Inverted echo sounder data processing manual. *GSO Tech. Rep.*, 2007 - 02.
- Levitus, S., J. I. Antonov, T. P. Boyer, H. E. Garcia, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, and H. E. Garcia, 2009. Global ocean heat content 1955-2008 in light of recently revealed instrumentation problems. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L07608, doi:10.1029/2008GL037155.
- Liu, A. K., S. Y. Chang, M.-K. Hsu, and N. K. Liang, 1998. Evolution of nonlinear internal waves in the East and South China Seas. *J. Geophys. Res.*, 103, 7995-8008.
- Liu, Z. L. and J. P. Gan, 2012. Variability of the Kuroshio in the East China Sea derived from satellite altimetry data. *Deep Sea Res.*, Part I, 59, 25 - 36.
- Na, H., M. Wimbush, J.-H. Park, H. Nakamura, and A. Nishina, 2014. Observations of flow variability through the Kerama Gap between the East China Sea and the Northwestern Pacific. *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 689 - 703, doi:10.1002/2013JC008899.
- Nerm, R. S., B. D. Beckley, J. T. Fasullo, B. D. Hamlington, D. Matsters, and G. T. Mitchum, 2018. Climate-change-driven accelerated sea level rise detected in the altimeter era. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, doi.org/10.1073/PNAS.1717312115.
- Roemmich, D., J. Church, J. Gilson, D. Monselesan, P. Sutton, and S. Wijffels, 2015. Unabated planetary warming and its ocean structure since 2006. *Nature Clim. Change*, 5, 240-245.
- Shen, M.-L., Y.-H. Tseng, S. Jan, C.-C. Young, and M.-D. Chiou, 2014. Long-term variability of the Kuroshio transport east of Taiwan and the climate it conveys. *Prog. Oceanogr.*, 121, 60 - 73, doi:10.1016/j.pocean.2013.10.009.

- Soeyanto, E., X. Guo, J. Ono, and Y. Miyazawa, 2014. Interannual variations of Kuroshio transport in the East China Sea and its relation to the Pacific Decadal Oscillation and mesoscale eddies. *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 3595–3616, doi:10.1002/2013JC009529.
- Yan, X., X.-H. Zhu, C. Pang, and L. Zhang, 2016. Effects of mesoscale eddies on the volume transport and branch pattern of the Kuroshio east of Taiwan. *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, 7683 - 7700, doi:10.1002/2016JC012038.
- Wang, J. and L.-Y. Oey, 2014. Inter-annual and decadal fluctuations of the Kuroshio in East China Sea and connection with surface fluxes of momentum and heat. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 8538–8546, doi:10.1002/2014GL062118.
- Wang, Y.-L., C.-R. Wu, and S.-Y. Chao, 2016. Warming and weakening trends of the Kuroshio during 1993–2013. *Geophys. Res. Lett.*, 43, 9200–9207, doi:10.1002/2016GL069432.
- Zhang, D., T. N. Lee, W. E. Johns, C.-T. Liu, and R. Zantopp, 2001. The Kuroshio east of Taiwan: Modes of variability and relationship to interior ocean mesoscale eddies. *J. Phys. Oceanogr.*, 31, 1054 - 1074
- Zhu, X.-H., H. Ichikawa, K. Ichikawa, and K. Takeuchi, 2004. Volume transport variability southeast of Okinawa Island estimated from satellite altimeter data. *J. Oceanogr.*, 60, 953 - 962.

Cruise Report

T/S Nagasaki-Maru (No. 464)

July 19-28, 2017

Participants

Kyushu University

Takeshi Matsuno (Professor)	matsuno@riam.kyushu-u.ac.jp
Takahiro Endoh (Associate professor)	tendo@riam.kyushu-u.ac.jp
Eisuke Tsutsumi (Postdoctoral fellow)	tsutsumi@riam.kyushu-u.ac.jp

Korea Institute of Ocean Science and Technology

Chang-Su Hong (Researcher)	cshong@kiost.ac.kr
Gyu-Nam Baek (Researcher)	gnbaek@kiost.ac.kr

Kyoto University

Hahako Ito (M1)	itohhk@kugi.kyoto-u.ac.jp
-----------------	---------------------------

Ehime University

Ji Fei (Visiting researcher)	jifei_04@126.com
Saki Shimada (U4)	smsmd1127@yahoo.co.jp

Nagasaki University

Graduate School of Fisheries Science and Environment Studies (Takeda Lab.)

Shigenobu Takeda (Professor)	s-takeda@nagasaki-u.ac.jp
------------------------------	---------------------------

Faculty of Fisheries (Takeda Lab.)

Naoto Iida (U4)	cutter0841@sweet.ocn.ne.jp
Kagemasa Ohta (U4)	kagemasa1121@gmail.com
Fumiko Koba (U4)	kobako_f.skiryom0420@yahoo.co.jp
Narumi Takahashi (U4)	kurararakurarakurara@outlook.jp
Koichi Hideshima (U4)	umelion@gmail.com
Kunioki Hirata (Research student)	derao110@yahoo.co.jp

Nagoya University

Institute for Space and Earth Environmental Research

Joji Ishizaka (Professor)	joji.ishizaka@gmail.com
Yuanli Zhu (Postdoctoral fellow)	zyl19840218@gmail.com

Graduate School of Environment Studies

Mengmeng Yang (D3)	yang.mengmeng14@gmail.com
Qian Xu (D3)	kittyxq9025@hotmail.com
Elígio de Raús Maúre (D3)	eligiomaure@gmail.com
Hanako Kuno (M1)	aptx356b@gmail.com

Toyama University

Tadateru Noguchi (U4)

Ocean University of China

Zhang JiangYiAo (U4)

zj968520@sina.com

Brief Cruise Diary

7/19

9:45 Departure from Nagasaki

16:00 Test: The instruments are checked off the south of Tsushima island

TurboMAP-L: Shear probes and FP07 data were unrealistic. These probes were replaced.

7/20: Line observation across the Tsushima strait (TE-Line)

6:00 TE6: CTD 2 casts (Water depth: 220m)

7:55 TE5: CTD 1 cast (Water depth: 89m)

TurboMAP-L: Checked again. One shear probe and FP07 data were still unrealistic, which were further replaced.

9:35 TE4: CTD 1 cast (Water depth: 103m), PRR

TurboMAP-L: Further checked. Since Shear#2 and FP07 data were still unrealistic, we decided to use TurboMAP-5 instead.

11:22 TE3: CTD 4 casts (SCM 1800 for OUC) (Water depth: 121-124m), PRR

TurboMAP-5: Checked to work well.

13:52 TE2: CTD 2 casts (Water depth: 88m), PRR

7/21: CK-line observation

5:45 CK5: CTD 6 casts (Nagoya, Nagasaki, Toyama (Cs), OUC (SCM*3 casts) (Water depth: 806-814m), TurboMAP 2 casts (down to about 200m)

9:30 CK4: CTD 2 casts (Water depth: 378m), PRR, TurboMAP 2 casts (down to about 200m)

11:50 CK3: CTD (1 cast down to 100m without bottle sampling + 1 usual cast) (Water depth: 165m), PRR, TurboMAP 2 casts down to the bottom

We noticed that the values of acceleration in x-direction were constant for all the casts, which needs to be fixed after the cruise.

14:15 CK2: CTD (1 cast down to 100m without bottle sampling + 1 usual cast) (Water depth: 145m), PRR, TurboMAP 2 casts down to the bottom

16:24 CK1: CTD (1 cast down to 100m without bottle sampling + 1 usual cast) (Water depth: 132m), TurboMAP 2 casts down to the bottom

7/22 Deployment of TRBMs and C-Line observation

5:50 TRN: TRBM deployed at 30° 14.998' N, 126° 56.919' E

6:12 TRC: TRBM deployed at 30° 14.524' N, 126° 57.856' E

6:31 C1: TRBM deployed at 30° 14.013' N, 126° 56.983' E

6:37 C1: CTD 1 cast (Water depth: 102m), TurboMAP 2 casts down to the bottom

8:38 C2: CTD (1 cast down to 100m without bottle sampling + 1 usual cast) (Water depth: 115m), TurboMAP 2 casts.

10:46 C3: CTD (1 cast down to 100m without bottle sampling + 1 usual cast) (Water depth: 154m), TurboMAP 2 casts

12:49 C4: CTD 6 casts (Nagoya, Nagasaki, Toyama (REE, Cs, Ra), OUC (SCM; 3 casts) TurboMAP 2 casts

7/23 Time series measurements around C1

6:00 C1N: TurboMAP 2 casts, CTD (without bottle sampling) (Water depth: 99 m)

7:00 C1W: TurboMAP 2 casts, CTD (without bottle sampling) (Water depth: 97 m)

8:05 C1S: TurboMAP 2 casts, CTD (Water depth: 101 m)

9:05 C1E: TurboMAP 2 casts, CTD (without bottle sampling) (Water depth: 103 m)

10:18 C1: CTD 4 casts (Nagoya, OUC (SCM; 3 casts)

11:00- C1: Started the time series measurements with TurboMAP (3 casts every hours)

7/24 Time series and internal gravity wave (IGW) measurements around C1

03:30 CTD 2 casts (for incubation of primary production)

-09:00 Interrupted the time series measurements

10:05-12:05 Thermistor chain deployed

12:15 PRR

13:00- Started the time series measurements with TurboMAP again

14:00 PRR

17:00-18:33 IGW event#1: XBT probes deployed

21:40-22:55 IGW event#2: XBT probes deployed

7/25 Time series and internal gravity wave (IGW) measurements around TRC

-07:00 Time series measurement around C1 finished.

08:00 C1S: TurboMAP 2 casts, CTD (without bottle sampling) (Water depth: 102 m)

09:05 C1E: TurboMAP 2 casts, CTD (without bottle sampling) (Water depth: 104 m)

10:05 C1N: TurboMAP 2 casts, CTD (without bottle sampling) (Water depth: 99 m)
11:05 C1W: TurboMAP 2 casts, CTD (without bottle sampling) (Water depth: 96 m)
12:10- TRC: Started the time series measurements with TurboMAP (3 casts every
hours), CTD (without bottle sampling) (Water depth: 100 m)
16:40-19:00 IGW event#3: XBT probes deployed
21:40-22:45 IGW event#4: XBT probes and TurboMAP deployed

7/26 Time series and internal gravity wave (IGW) measurements around TRC

03:30 CTD 2 casts (for incubation of primary production)
09:00-09:30 IGW event#5 (the biggest one): TurboMAP deployed
-19:00 Time series measurement around TRC finished

7/27 Recovery of TRBM and CCK-line (northward from C1) observation

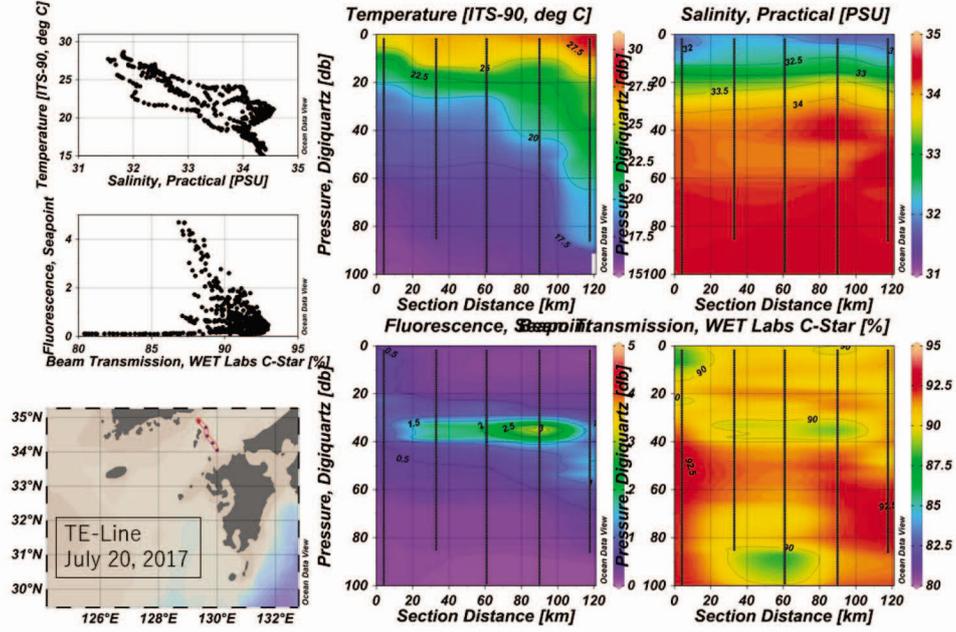
06:20 TRN: TRBM recovered
07:09 TRC: TRBM recovered
07:43 C1: TRBM recovered, CTD (without bottle sampling)
09:43 CCK1: CTD (without bottle sampling)
11:10 CCK2: CTD (without bottle sampling)
12:35 CCK3: CTD (without bottle sampling)

7/28

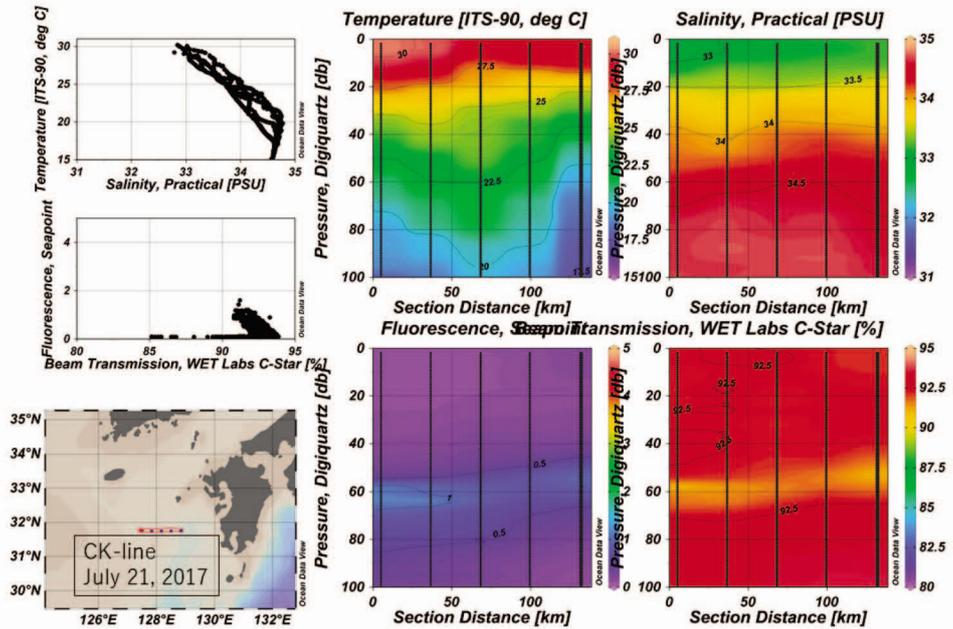
08:15 Arrived at Nagasaki

Preliminary results of line observations

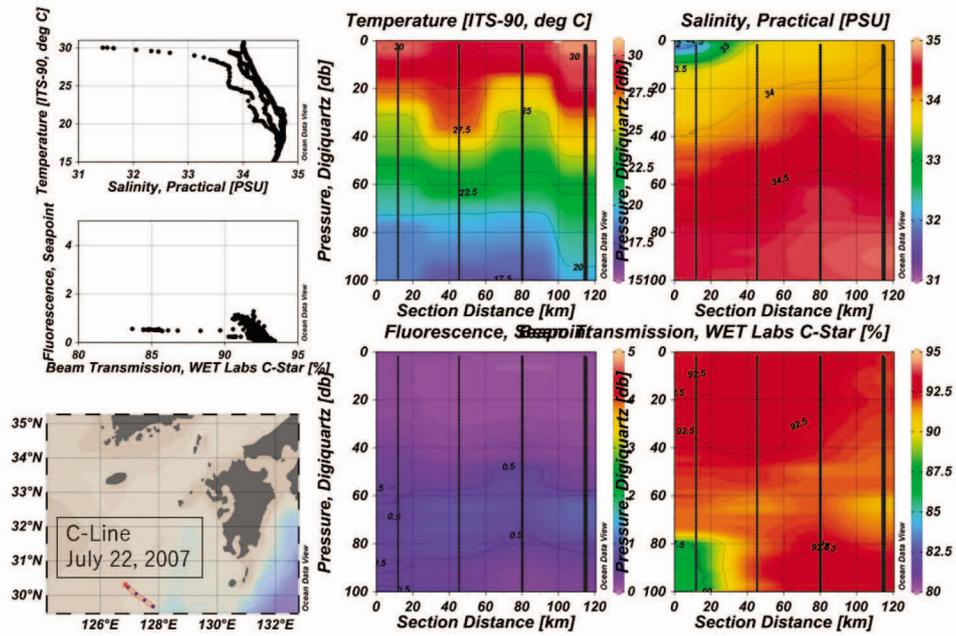
TE-Line (7/20)



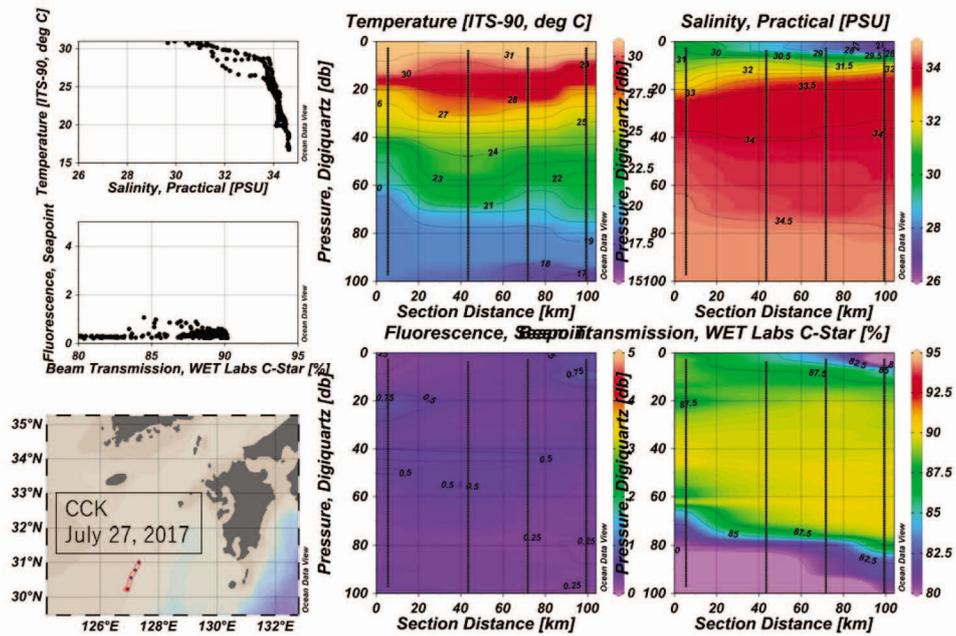
CK-Line (7/21)



C-Line (7/22)



CCK-Line (7/27)



Kyushu University

We carried out the field measurements in collaboration with researches of KIOST and students of Kyoto and Ehime Universities.

Objective

1. To observe internal gravity waves which contribute turbulent mixing in the pycnocline
2. To observe tidal straining which cause residual transport of sediments by modulating turbulent mixing in the bottom boundary layer

In order to observe these processes, we deployed four kinds of instruments described below.

TRBM/ADCP measurements

We deployed three ADCPs (RDI Workhorse 300 kHz) mounted on the trawl resistance bottom mounts (TRBMs) to obtain the time series of vertical profiles of beam velocities. To determine the propagating direction of internal gravity waves, these ADCPs were distributed at corners of a regular triangle.

All the ADCPs started recording at 5:00 on July 22. The ADCPs deployed at Stn. TRC and TRN were configured to record 1-pin beam velocities every 1 sec, while the ADCP deployed at C1 was configured to take ensemble mean of beam velocities over 2 sec (3 pins) recorded every 2 sec. Vertical bin size was set to be 2 m for all the ADCPs.

Deployment information:

• Station TRN

Start deployment	05:50;	water depth: 100.4 m
Time of deployment	05:52;	30° 14.997'N 126° 56.955'E
Settle on the bottom	05:54;	30° 14.998'N 126° 56.919'E;
Release the parachute buoy	05:55	
Find the parachute buoy	05:56;	30° 15.007'N 12° 56.959'E
Recover the parachute buoy	05:58;	30° 15.015'N 126° 56.984'E

• Station TRC

Start deployment	06:05;	water depth: 102.2 m
Time of deployment	06:10;	30° 14.508'N 126° 57.870'E
Settle on the bottom	06:11;	30° 14.524'N 126° 57.856'E;
Release the parachute buoy	06:12	
Find the parachute buoy	06:13;	30° 14.556'N 126° 57.837'E
Recover the parachute buoy	06:15;	30° 14.590'N 126° 57.848'E

• Station C1

Start deployment	06:25;	water depth: 101.8 m
Time of deployment	06:29;	30° 13.999'N 126° 57.005'E
Settle on the bottom	06:30;	30° 14.013'N 126° 56.983'E;
Release the parachute buoy	06:31	
Find the parachute buoy	06:31;	30° 14.026'N 126° 56.974'E
Recover the parachute buoy	06:34;	30° 14.046'N 126° 56.977'E

Recovery information:

• Station TRN

Start recovery	05:52	
Release the float	05:55;	30° 14.896'N 126° 57.048'E
Find the float	05:58;	30° 14.858'N 126° 57.043'E
Pick up the float	06:07;	30° 14.966'N 126° 57.043'E
Recover the sinker	06:20;	30° 15.079'N 126° 57.043'E

• Station TRC

Start recovery	06:38	
Release the float	06:39;	30° 14.466'N 126° 57.933'E
Find the float	06:41;	30° 14.430'N 126° 57.945'E
Pick up the float	06:45;	30° 14.479'N 126° 57.931'E
Recover the sinker	07:09;	30° 14.432'N 126° 58.080'E

• Station C1

Start recovery	07:23	
Release the float	07:26;	30° 13.967'N 126° 57.051'E
Find the float	07:28;	30° 13.936'N 126° 57.080'E
Pick up the float	07:32;	30° 14.014'N 126° 57.031'E
Recover the sinker	07:43;	30° 13.979'N 126° 56.935'E

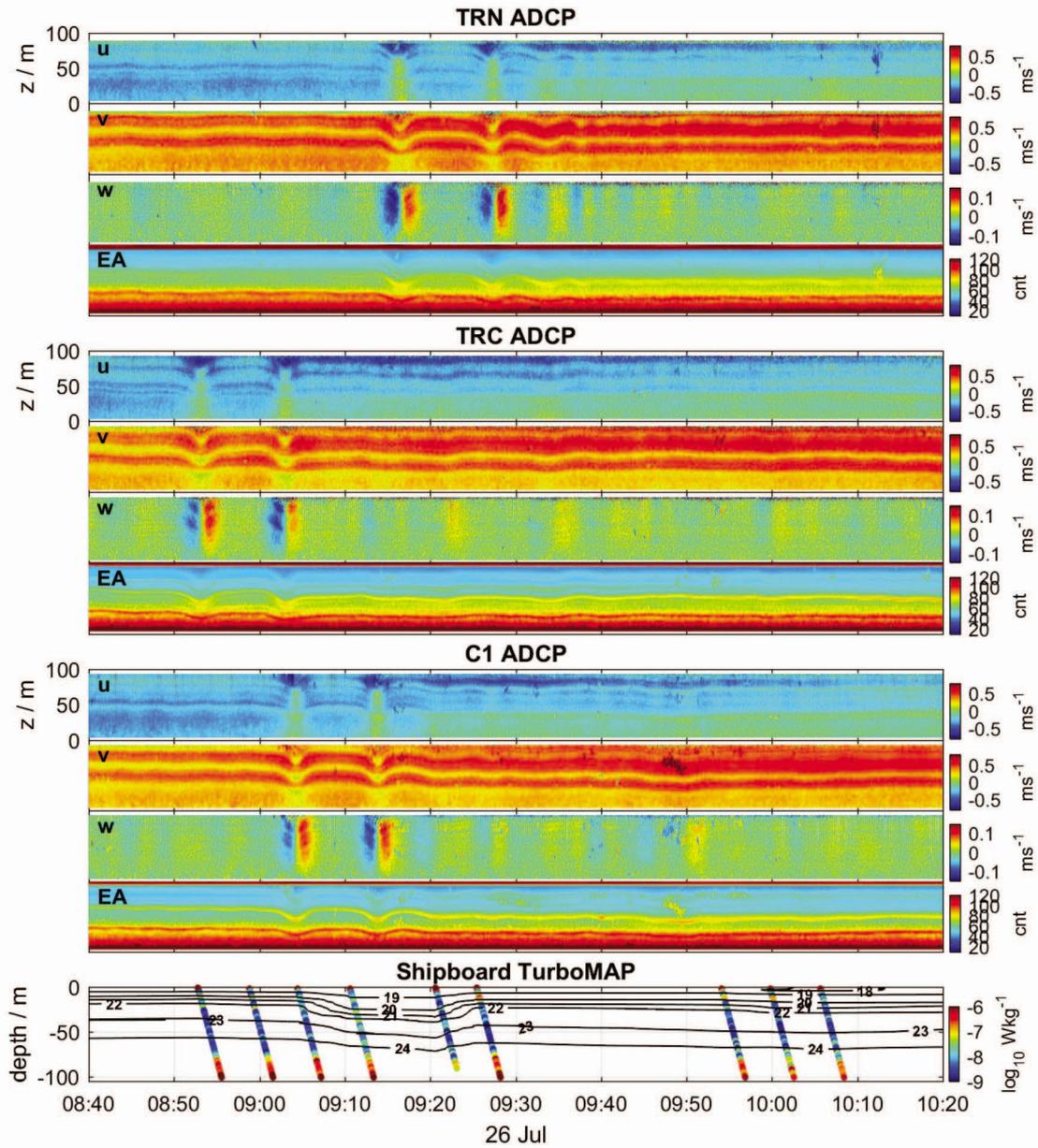


Fig. Time-depth sections of velocity (u , v , w) and echo intensity at Stn. TRN (upper), TRC (middle), C1 (lower) measured with ADCPs, together with time-depth section of density and dissipation rate of TKE measured with TurboMAP-5, during IGW event#5.

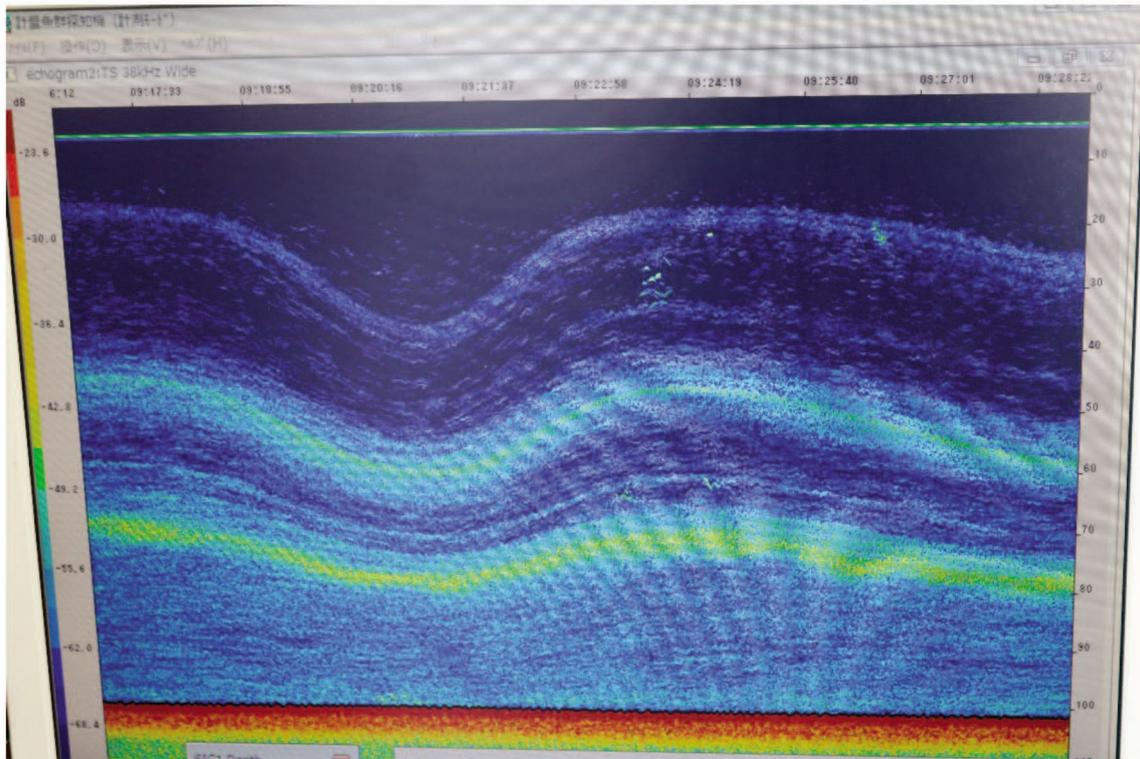


Fig. Image of the shipboard echo sounder at 09:28 on July 26 (during IGW event#5).

TurboMAP measurements

We obtained vertical profiles of the micro-scale shear of horizontal velocity and temperature, together with those of temperature (slow), salinity, chlorophyll, and turbidity, from the sea surface down to the seabed. From the micro-scale shear of horizontal velocity, the dissipation rate of turbulent kinetic energy (ϵ) was calculated. We tried to measure the increase in ϵ associated with the passage of internal gravity waves near the pycnocline as well as tidal straining in the bottom boundary layer.

Although we first deployed TurboMAP-L at Stn. TEST, TE5, and TE4, the values of micro-scale shear were unrealistic (Cast#1-4). Therefore, all the microstructure data were obtained with TurboMAP-5.

In addition to the stations along CK-line and C-line, TurboMAP-5 was deployed near TRBMs at C1 and TRC three times approximately every 1 hour, from 09:59 on July 23 to 07:11 on July 25 (interruption due to the deployment of the thermistor chain from 10:00 to 12:00 on July 24) and from 12:10 on July 25 to 19:09 on July 26, respectively.

A total of 257 casts with TurboMAP-5 are summarized as follows:

Cast	Water depth	Start time	End time	End depth	Filename	Memo
5	123	11:48:15	11:49:48	120	TE3-1	Shear probe#1495
6		11:57:20	12:00:50	119	TE3-2	
7	814	07:42:47	07:49:00	220	tm-CK5-1	Winch was stopped at 180 m
8		07:51:55	07:57:42	212	tm-CK5-2	Winch was stopped at 170 m
9	378	10:00:16	10:05:46	202	tm-CK4-1	Winch was stopped at 160 m
10		10:09:00	10:14:49	208	tm-CK4-2	Winch was stopped at 160 m
11	165	12:16:01	12:20:40	168	tm-CK3-1	
12		12:27:10	12:31:30	169	tm-CK3-2	
13	145	14:39:28	14:43:20	148	tm-CK2-1	We noticed that the acceleration data in x-direction was constant and that FPO7 data was noisy.
14		14:47:34	14:51:40	148	tm-CK2-2	After this cast, FPO7 sensor was replaced.
15	132	16:45:00	16:48:59	134	tm-CK1-1	FPO7 data seemed to be good.
16		16:53:13	16:56:59	134	tm-CK1-2	
17	102	06:55:20	06:58:00	103	tm-C1-01	
18	102	07:01:50	07:04:52	103	tm-C1-02	
19	115	08:59:55	09:03:05	117	tm-C2-01	
20		09:06:00	09:09:10	117	tm-C2-02	
21	157	11:05:37	11:10:00	160	tm-C3-01	
22		11:14:13	11:18:28	161	tm-C3-02	
23	628	14:22:32	14:28:40	234	tm-C4-01	Winch was stopped at 170 m

24		14:32:55	14:38:28	206	tm-C4-02	Winch was stopped at 160 m
25	99	05:56:52	05:59:38	101	tm-C1N-01	
26		06:04:28	06:07:20	101	tm-C1N-02	Curious oscillation in slow T
27	97	07:01:28	07:04:15	98	tm-C1W-01	Slow T data seemed to be good
28		07:08:53	07:11:34	99	tm-C1W-02	Slow T data seemed to be good
29	101	08:05:47	08:08:36	103	tm-C1S-01	
30		08:12:23	08:15:53	103	tm-C1S-02	
31	103	09:08:34	09:11:27	103	tm-C1E-01	
32		09:15:05	09:18:01	104	tm-C1E-02	
33	100	09:59:39	10:02:05	102	tm-C1-tm01-01	Typo in the filename
34		10:05:38	10:08:28	102	tm-C1-t01-02	
35		10:11:37	10:14:30	102	tm-C1-t01-03	
36	100	11:00:29	11:03:28	101	tm-C1-t02-01	Cable under the ship
37		11:09:00	11:11:33	101	tm-C1-t02-02	Winch toward a bit offshore; worked well
38		11:14:24	11:17:19	101	tm-C1-t02-03	
39		11:59:32	12:02:21	101	tm-C1-t03-01	Cable under the ship
40		12:07:45	12:10:31	101	tm-C1-t03-02	
41		12:13:52	12:16:42	101	tm-C1-t03-03	
42	99	12:59:40	13:02:29	100	tm-C1-t04-01	After going back to the original position
43		13:05:54	13:08:42	100	tm-C1-t04-02	
44		13:11:34	13:14:18	100	tm-C1-t04-03	
45	99	13:59:28	14:02:12	100	tm-C1-t05-01	Cable under the ship

46		14:09:07	14:11:58	101	tm·C1-t05-02	After the ship turned
47		14:15:10	14:18:07	101	tm·C1-t05-03	
48	99	15:00:02	15:02:48	100	tm·C1-t06-01	After going back to the original position; Cable under the ship; Ship turned
49		15:08:19	15:11:05	100	tm·C1-t06-02	
50		15:14:56	15:17:44	100	tm·C1-t06-03	
51	99	15:59:03	16:01:50	100	tm·C1-t07-01	
52		16:07:17	16:10:01	100	tm·C1-t07-02	
53		16:13:40	16:16:30	100	tm·C1-t07-03	After this cast, twist of cable was removed.
54	100	17:00:23	17:03:17	101	tm·C1-t08-01	
55		17:07:50	17:10:42	101	tm·C1-t08-02	
56		17:15:50	17:18:25	101	tm·C1-t08-03	
57	100	17:59:35	18:01:45	101	tm·C1-t09-01	After going back to the original position
58		18:05:30	18:08:23	101	tm·C1-t09-02	
59		18:12:14	18:15:00	101	tm·C1-t09-03	
60	101	18:59:00	19:01:50	102	tm·C1-t10-01	After going back to the original position
61		19:02:22	19:08:15	102	tm·C1-t10-02	
62		19:12:06	19:15:00	102	tm·C1-t10-03	
63	101	20:00:34	20:03:20	102	tm·C1-t11-01	
64		20:05:58	20:08:50	102	tm·C1-t11-02	
65		20:12:50	20:15:30	102	tm·C1-t11-03	
66	102	20:59:51	21:03:00	103	tm·C1-t12-01	
67		21:05:44	21:08:35	103	tm·C1-t12-02	
68		21:11:35	21:14:24	103	tm·C1-t12-03	
69	102	21:57:10	22:00:02	102	tm·C1-t13-01	

70		22:03:05	22:05:55	102	tm·C1-t13-02	
71		22:09:20	22:12:00	102	tm·C1-t13-03	
72	100	22:59:24	23:02:20	102	tm·C1-t14-01	
73		23:05:53	23:08:40	102	tm·C1-t14-02	
74		23:11:52	23:14:50	102	tm·C1-t14-03	
75	101	23:57:41	00:00:20	102	tm·C1-t15-01	
76		00:04:30	00:07:20	102	tm·C1-t15-02	
77		00:10:40	00:13:31	103	tm·C1-t15-03	
78	100	00:54:25	00:57:12	101	tm·C1-t16-01	
79		01:00:30	01:03:25	101	tm·C1-t16-02	
80		01:07:35	01:10:27	101	tm·C1-t16-03	
81	100	01:54:10	01:57:03	101	tm·C1-t17-01	
82		02:00:24	02:03:14	101	tm·C1-t17-02	
83		02:06:41	02:09:30	101	tm·C1-t17-03	
84	99	02:54:35	02:57:20	100	tm·C1-t18-01	
85		03:00:25	03:03:15	100	tm·C1-t18-02	
86		03:06:32	03:09:18	100	tm·C1-t18-03	
87	101	03:54:36	03:57:25	101	tm·C1-t19-01	
88		04:00:45	04:03:37	102	tm·C1-t19-02	
89		04:07:05	04:09:54	102	tm·C1-t19-03	
90	100	04:58:39	05:01:29	100	tm·C1-t20-01	
91		05:05:17	05:08:05	100	tm·C1-t20-02	
92		05:11:38	05:14:25	101	tm·C1-t20-03	
93	101	05:53:53	05:56:45	102	tm·C1-t21-01	
94		05:59:57	06:02:48	102	tm·C1-t21-02	
95		06:06:16	06:09:10	102	tm·C1-t21-03	
96	101	06:56:00	06:58:53	103	tm·C1-t22-01	
97		07:02:25	07:05:18	103	tm·C1-t22-02	
98		07:08:52	07:11:45	103	tm·C1-t22-03	
99		07:58:26	08:01:11	102	tm·C1-t23-01	
100		08:04:21	08:07:05	102	tm·C1-t23-02	
101		08:10:19	08:13:06	102	tm·C1-t23-03	
102		08:59:08	09:02:04	103	tm·C1-t24-01	
103		09:05:44	09:08:40	103	tm·C1-t24-02	
104		09:12:20	09:15:16	103	tm·C1-t24-03	

105		13:04:41	13:07:24	100	tm·C1-t25-01	Waited for turning the ship
106		13:11:29	13:14:15	100	tm·C1-t25-02	
107		13:17:13	13:19:59	100	tm·C1-t25-03	
108		13:55:20	13:58:08	101	tm·C1-t26-01	
109		14:01:04	14:03:49	101	tm·C1-t26-02	
110		14:06:40	14:09:30	101	tm·C1-t26-03	
111		14:54:20	14:57:02	100	tm·C1-t27-01	
112		14:59:56	15:02:44	100	tm·C1-t27-02	
113		15:06:25	15:09:05	100	tm·C1-t27-03	
114	99	15:55:16	15:58:06	100	tm·C1-t28-01	
115		16:03:24	16:06:05	100	tm·C1-t28-02	
116		16:10:06	16:12:53	101	tm·C1-t28-03	
117		16:55:32	16:58:16	101	tm·C1-t29-01	
118		17:01:56	17:04:39	101	tm·C1-t29-02	
119		17:08:07	17:10:50	101	tm·C1-t29-03	
120		18:56:37	18:58:28	103	tm·C1-t30-01	
121		19:04:40	19:06:30	102	tm·C1-t30-02	
122		19:09:11	19:11:57	102	tm·C1-t30-03	
123	101	19:54:20	19:57:10	102	tm·C1-t31-01	
124		20:01:48	20:04:36	102	tm·C1-t31-02	
125		20:09:45	20:12:35	102	tm·C1-t31-03	
126	102	21:00:57	21:03:50	103	tm·C1-t32-01	
127		21:10:00	21:12:49	103	tm·C1-t32-02	
128		21:15:57	21:18:49	103	tm·C1-t32-03	
129		22:03:13	22:05:45	90	tm·C1-t33-01	
130		22:11:10	22:13:39	90	tm·C1-t33-02	
131		22:17:17	22:19:48	90	tm·C1-t33-03	
132		22:26:57	22:29:15	85	tm·C1-t33-04-3	
133		22:36:36	22:38:59	85	tm·C1-t33-05	
134		22:43:40	22:45:50	80	tm·C1-t33-06	
135	101	23:55:39	22:58:35	102	tm·C1-t34-01	
136	101	00:01:57	00:04:45	102	tm·C1-t34-02	
137		00:08:07	00:10:55	102	tm·C1-t34-03	
138	100	00:54:10	00:57:20	101	tm·C1-t35-01	

139		01:00:45	01:03:30	101	tm·C1-t35-02	
140		01:06:40	01:09:32	101	tm·C1-t35-03	
141	101	01:54:42	01:57:35	102	tm·C1-t36-01	
142		02:00:55	02:03:45	102	tm·C1-t36-02	
143		02:07:05	02:10:00	102	tm·C1-t36-03	
144	99	02:54:08	02:56:55	100	tm·C1-t37-01	
145		03:00:03	03:02:49	100	tm·C1-t37-02	
146		03:06:12	03:08:58	101	tm·C1-t37-03	
147	100	03:54:43	03:57:35	101	tm·C1-t38-01	
148		04:00:54	04:03:43	101	tm·C1-t38-02	
149		04:07:02	04:09:55	101	tm·C1-t38-03	
150	99	04:55:21	04:58:10	100	tm·C1-t39-01	
151		05:01:35	05:04:24	100	tm·C1-t39-02	
152		05:07:34	05:10:30	100	tm·C1-t39-03	
153	100	05:58:06	06:00:55	101	tm·C1-t40-01	PC rebooted because of an unstable behavior of TM-tool
154		06:05:05	06:07:55	102	tm·C1-t40-02	
155		06:10:50	06:13:45	102	tm·C1-t40-03	
156	100	06:55:47	06:58:35	101	tm·C1-t41-01	
157		07:02:00	07:04:50	101	tm·C1-t41-02	
158		07:08:12	07:11:02	101	tm·C1-t41-03	end time series measurements at C1
159	101	07:58:04	08:00:58	103	tm·C1S2-t01	C1S
160		08:03:05	08:06:50	103	tm·C1S2-t02	
161	104	09:04:03	09:06:50	105	tm·C1E2-t01	C1E
162		09:10:00	09:12:57	105	tm·C1E2-t02	
163	99	10:02:49	10:05:34	101	tm·C1N2-t01	C1N
164		10:08:34	10:11:29	101	tm·C1N2-t02	
165	96	11:16:24	11:19:05	98	tm·C1W2-t01	C1W
166		11:21:01	11:24:45	98	tm·C1W2-t02	

167	100	12:10:11	12:13:05	102	tm·TRC·t01-01	begin time series measurement at TRC
168		12:16:01	12:18:54	102	tm·TRC·t01-02	
169		12:21:52	12:24:49	102	tm·TRC·t01-03	
170		12:54:40	12:57:35	102	tm·TRC·t02-01	
171		13:00:29	13:03:22	102	tm·TRC·t02-02	
172		13:06:26	13:09:16	102	tm·TRC·t02-03	
173		13:53:19	13:56:01	101	tm·TRC·t03-01	
174		13:59:07	14:01:53	101	tm·TRC·t03-02	
175		14:04:41	14:07:23	100	tm·TRC·t03-03	
176		14:57:17	15:00:01	100	tm·TRC·t04-01	
177		15:03:12	15:05:54	101	tm·TRC·t04-02	
178		15:08:37	15:11:27	101	tm·TRC·t04-03	
179	98	15:53:40	15:56:23	100	tm·TRC·t05-01	
180		15:59:33	16:02:17	100	tm·TRC·t05-02	
181		16:05:12	16:08:02	100	tm·TRC·t05-03	
182	98	17:55:17	17:57:48	101	tm·TRC·t06-01	
183		18:03:47	18:06:32	101	tm·TRC·t06-02	
184		18:09:45	18:12:29	101	tm·TRC·t06-03	
185		19:06:49	19:09:32	101	tm·TRC·t07-01	
186		19:12:47	19:15:35	101	tm·TRC·t07-02	
187		19:18:43	19:21:22	101	tm·TRC·t07-03	
188		19:53:36	19:56:24	103	tm·TRC·t08-01	
189		20:01:17	20:04:00	103	tm·TRC·t08-02	
190		20:07:00	20:09:47	103	tm·TRC·t08-03	
191		20:56:05	20:58:47	101	tm·TRC·t09-01	
192		21:01:51	21:04:38	101	tm·TRC·t09-02	
193		21:07:35	21:10:20	101	tm·TRC·t09-03	
194		21:51:20	21:52:55	70	tm·TRC·t10-01	internal waves coming
195		21:58:07	22:00:08	70	tm·TRC·t10-02	
196		22:03:39	22:05:30	70	tm·TRC·t10-03	
197		22:10:40	22:13:20	93	tm·TRC·t10-04	
198		22:16:10	22:18:40	92	tm·TRC·t10-05	

199		22:21:44	22:18:40	90	tm-TRC-t10-06	
200		22:27:30	22:30:13	96	tm-TRC-t10-07	
201		22:33:30	22:36:04	95	tm-TRC-t10-08	
202		22:38:14	22:40:52	95	tm-TRC-t10-09	
203		22:42:54	22:45:53	100	tm-TRC-t10-10	
204	101	23:55:55	23:58:40	102	tm-TRC-t11-01	
205		00:04:01	00:06:50	102	tm-TRC-t11-02	Waited for turning the ship
206		00:10:29	00:13:20	102	tm-TRC-t11-03	
207	100	00:55:02	00:57:52	101	tm-TRC-t12-01	
208		01:08:35	01:11:22	102	tm-TRC-t12-02	Waited for turning the ship
209		01:14:37	01:17:25	102	tm-TRC-t12-03	
210	101	01:55:28	01:58:16	102	tm-TRC-t13-01	
211		02:01:34	02:04:30	102	tm-TRC-t13-02	
212		02:07:45	02:10:35	102	tm-TRC-t13-03	
213	99	02:53:51	02:56:43	100	tm-TRC-t14-01	
214		02:59:54	03:02:44	100	tm-TRC-t14-02	
215		03:06:02	03:08:51	101	tm-TRC-t14-03	
216	100	03:57:46	04:00:30	100	tm-TRC-t15-01	Cable under the ship; waited for turning the ship for 30-mins
217		04:31:33	04:34:21	101	tm-TRC-t15-02	
218	99	04:56:35	04:59:23	100	tm-TRC-t16-01	
219		05:03:37	05:06:24	100	tm-TRC-t16-02	
220		05:09:37	05:12:24	100	tm-TRC-t16-03	
221	100	05:54:05	05:56:54	101	tm-TRC-t17-01	
222		05:59:58	06:02:50	101	tm-TRC-t17-02	
223		06:05:56	06:08:45	101	tm-TRC-t17-03	
224	100	06:57:40	07:00:33	100	tm-TRC-t18-01	
225		07:03:48	07:06:37	101	tm-TRC-t18-02	
226		07:09:42	07:12:29	101	tm-TRC-t18-03	
227		07:53:29	07:56:19	102	tm-TRC-t19-01	
228		07:59:19	08:02:07	102	tm-TRC-t19-02	

229		08:04:59	08:07:49	102	tm-TRC-t19-03	
230		08:52:54	08:55:46	102	tm-TRC-t20-01	
231		08:58:51	09:01:42	102	tm-TRC-t20-02	
232		09:04:30	09:07:25	102	tm-TRC-t20-03	internal waves appearance
233		09:10:42	09:13:41	102	tm-TRC-t20-04	
234		09:20:42	09:23:19	94	tm-TRC-t20-05	stopped winch at 80-m depth
235		09:25:36	09:28:21	102	tm-TRC-t20-06	
236		09:54:12	09:57:02	102	tm-TRC-t21-01	
237		09:59:50	10:02:40	102	tm-TRC-t21-02	
238		10:05:41	10:08:47	102	tm-TRC-t21-03	
239		10:53:50	10:56:55	102	tm-TRC-t22-01	
240		10:59:34	11:02:22	102	tm-TRC-t22-02	
241		11:05:14	11:08:06	102	tm-TRC-t22-03	
242		11:54:10	11:56:38	102	tm-TRC-t23-01	
243		12:03:37	-	102	tm-TRC-t23-02	Specious signals on TM-tool. Signal stopped again at halfway depth even after PC reboot Interrupt measurement at 12:45. After change to the old winch, TM-tool successfully worked. Found that connection between cable and TM-5 was loose. Set instruments (newer winch) again at 1300-1330.

244		13:53:56	13:56:44	-	tm-TRC-t24-01	Specious data. Remove the config file.
245		14:05:37	14:08:32	101	tm-TRC-t24-02	Good
246		14:11:24	14:14:13	102	tm-TRC-t24-03	
247		14:53:05	14:55:51	100	tm-TRC-t25-01	
248		14:59:36	15:02:20	100	tm-TRC-t25-02	
249		15:06:12	15:08:58	100	tm-TRC-t25-03	
250		15:52:30	15:55:10	100	tm-TRC-t26-01	
251		15:58:32	16:01:15	100	tm-TRC-t26-02	
252		16:05:10	16:07:50	100	tm-TRC-t26-03	
253	100	16:53:03	16:55:48	101	tm-TRC-t27-01	
254		16:59:00	17:01:43	101	tm-TRC-t27-02	
255		17:04:58	17:07:47	101	tm-TRC-t27-03	
256		17:53:47	17:56:30	100	tm-TRC-t28-01	
257		17:59:44	18:02:24	100	tm-TRC-t28-02	
258		18:05:20	18:08:00	100	tm-TRC-t28-03	
259		18:52:35	18:55:23	101	tm-TRC-t29-01	
260		19:00:27	19:03:14	101	tm-TRC-t29-02	
261		19:06:20	19:09:02	101	tm-TRC-t29-03	

XBT measurements

We observed the displacement of thermocline associated with propagation of internal gravity waves with a total of 84 XBT probes, including 24 probes the captain kindly provided us. We prepared the XBT launcher when the packet of internal gravity waves was detected by the X-band radar of the ship, and then deployed XBT probes during the passage of depression seen in the image of the echo sounder of the ship. The captain has given us the movies of the X-band radar, the echo sounder, and the sea surface.

Note that the clock of the PC for XBT was 1 min 27.5 sec faster than the GPS clock, which was adjusted at 08:23:00 on July 25.

Deployment information:

1. 7/24 17:34 – 18:30 (came from northeast and east): BT0001-0018
2. 7/24 21:48 – 22:43 (came from southeast): BT0019-0036
3. 7/25 16:45 – 19:01 (came from northeast): BT0037-0058

4. 7/25 21:50 – 22:29 (came from southeast):

BT0059-0073

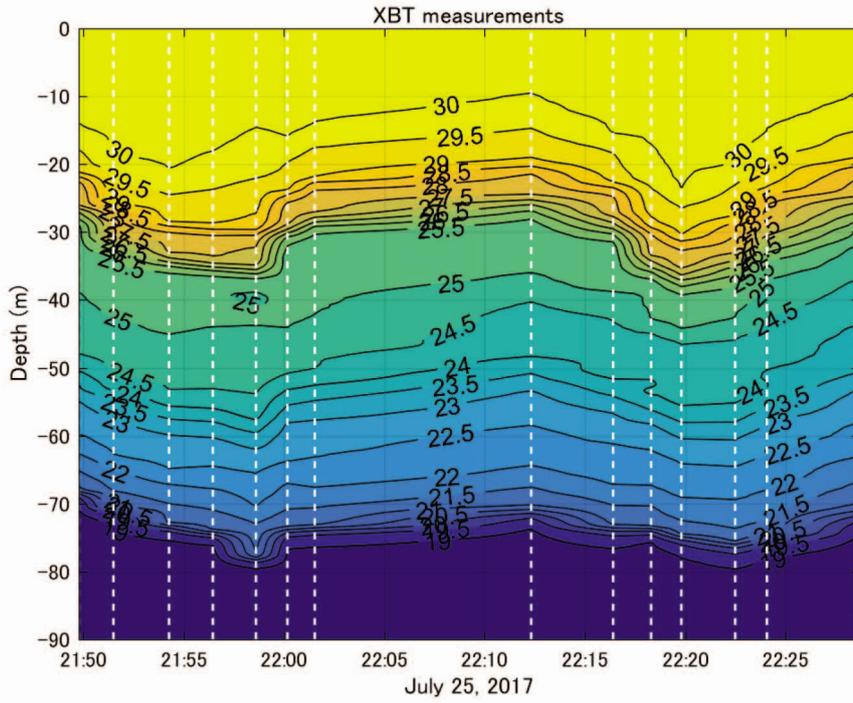


Fig. Time-depth section of temperature during IGW event#4. Dashed white lines indicate the time at which the XBT probe was deployed.

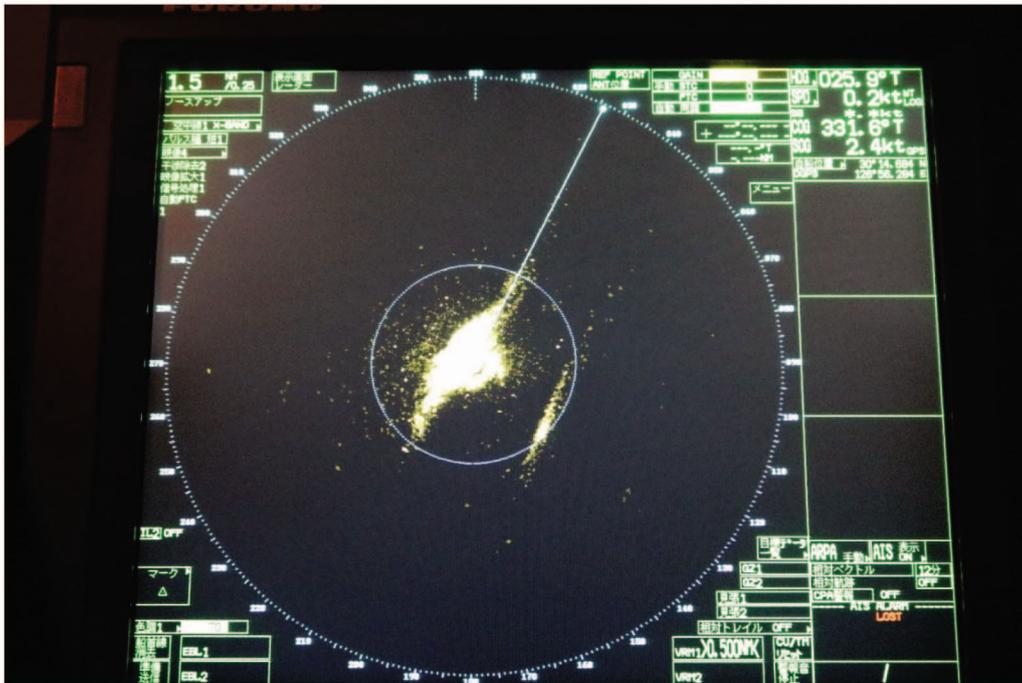


Fig. Image of the X-band radar at 21:58 on July 25 (during IGW event#4).

Thermistor-Chain measurements

We deployed the thermistor chain consisting of eleven thermometers, the ADCP (RDI Workhorse 600 kHz) and ADV (Nortek VECTOR), which was tethered to the ship. We tried to measure the displacement of thermocline associated with propagation of internal gravity waves with the thermometers distributed at an interval of 2 m from 21 m down to 39 m. Vertical profile of horizontal velocity was measured with the ADCP mounted on the frame attached at a depth of 15 m. The ADV are attached at a center of the thermistor chain (at 29.5 m), which measured turbulent flow. The lowest two thermometers, COMPACT-LTD and INFINITY-EM, also measured depth and horizontal velocity, respectively, for correcting the inclination of the chain. All the instruments started recording at 11:30 on July 23.

We planned to deploy the thermistor chain when the packet of internal gravity waves was detected by the X-band radar of the ship from 8:00 to 20:00. However, no significant signal was detected till the early morning of July 24. Considering the batteries running out in about 2 days, we decided to deploy the thermistor chain in the morning of July 24. This decision proved to be wrong later: many packets of internal gravity waves came after the evening of the same day, as described in the XBT section.

Deployment information:

Started deployment	09:40
Time of deployment	09:44
Carabiner (slip ring) detached	09:45; the thermistor chain recovered.
Removed all the carabiners	09:52
Time of deployment	09:53; 30° 13.973'N 126° 57.166'E
Deployed the surface buoy	10:05; 30° 13.976'N 126° 57.124'E

Recovery information:

Started recovery	11:47
Finished recovery	12:01

Recorded data period:

0. ADCP Covering throughout the deployed period
1. INFINITY-CTW (at 21m): 7/23 11:30:00 – 7/26 08:43:15
2. COMPACT-CTW (at 23 m): Not able to wake up
3. MDS-MrkV#101734 (at 25 m): 7/23 11:30:00 – 7/25 15:24:29
4. MDS-MrkV#101733 (at 27 m): 7/23 11:30:00 – 7/25 14:39:34
5. COMPACT-CT#562 (at 29 m): 7/23 11:30:00 – 7/25 13:03:58
6. Vector (at 29.5 m): Date is wrong. File size is very small.

7. COMPACT-CT#1125 (at 31 m): 7/23 11:30:00 – 7/25 13:03:58
8. MDS-MrkV#101731 (at 33 m): 7/23 11:30:00 – 7/25 15:45:24
9. MDS-MrkV#101083 (at 35 m): File transfer failed
10. DEFI-T (at 37 m): 7/23 11:30:00 – 7/25 14:19:27
11. COMPACT-LTD (at 39 m): 7/23 11:30:00 – 7/25 21:01:01
12. INFINITY-EM (at 41 m): Only a header file

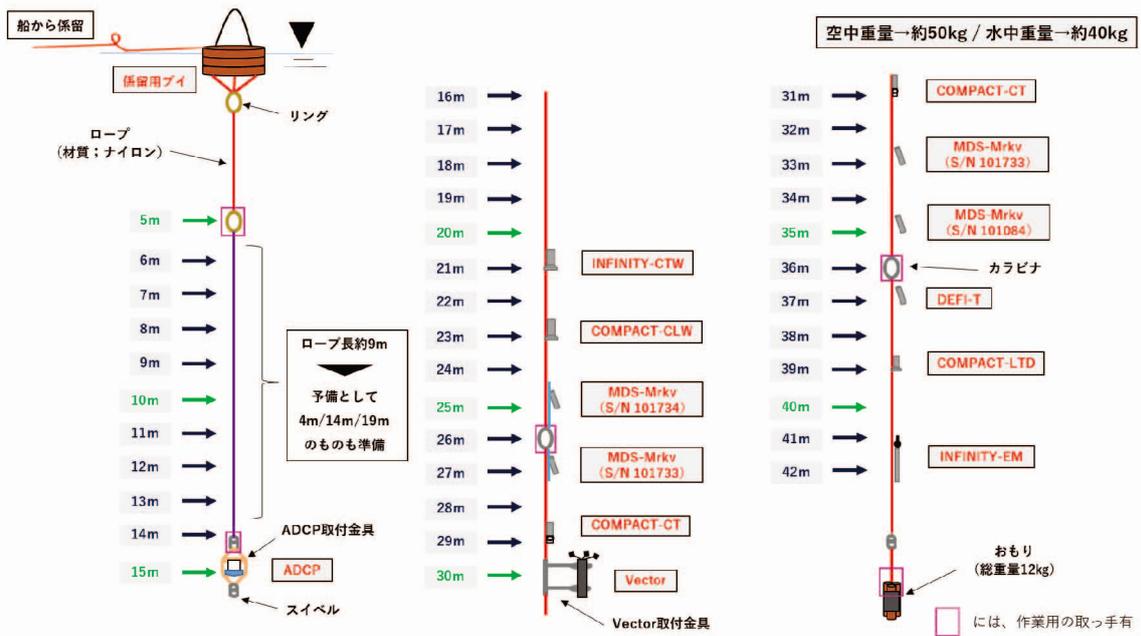


Fig. Schematic drawing of the thermistor chain.



Fig. Photo of the thermistor chain

Interaction between macro- and micro-nutrient dynamics and phytoplankton assemblage

Naoto Iida¹, Kagemasa Ohta¹, Fumiko Koba¹, Narumi Takahashi¹, Koichi Hideshima¹, Kunioki Hirata¹ and Shigenobu Takeda²

¹ Nagasaki University, Faculty of Fisheries

² Nagasaki University, Graduate School of Fisheries and Environmental Sciences

This study was aimed to understand the distribution of macro-nutrients and trace metals in the surface waters of the East China Sea, and the importance of these biologically essential elements for phytoplankton, especially large diazotrophic cyanobacteria such as *Trichodesmium* spp. and *Richelia intracellularis*.

1. Distribution of macronutrients and large diazotrophic cyanobacteria

Surface seawater was continuously pumped up from the bottom of the ship (4.5 m) during cruising, and the seawater was used for the nutrient and phytoplankton studies. At the CTD observation stations, surface water samples were also collected using a bucket (Table 1).

Nutrient samples were collected in acid-cleaned 100-ml polyethylene bottles. These samples were stored frozen at -20°C for onshore analyses. Concentrations of nitrate+nitrite (N+N), soluble reactive phosphorus (SRP), and silicic acid will be determined using a highly sensitive colorimetric method using an AutoAnalyzer II (Technicon, USA) and Liquid Waveguide Capillary Cells (World Precision Instruments, USA).

One-liter seawater samples for enumeration of large diazotrophic cyanobacteria *Trichodesmium* spp. and *Richelia intracellularis* were collected in polycarbonate bottles. Samples were immediately filtered through a 10 µm pore-size polycarbonate membrane filter prestained with Sudan Black B. The plankton on the filter was fixed with 4% formaldehyde for 5 min in the dark and the filter was mounted on a slide using non-fluorescence immersion oil. The slides were stored frozen at -20°C in sealed slide boxes for later cell counting using an epifluorescence microscopy (Zeiss, AxioScope A1, Ex: 560 nm, Em: 630 nm) on land.

Samples for phytoplankton species composition analysis were collected in 1-liter amber polypropylene bottles, and were fixed with 0.4% neutral formaldehyde for microscopic observation on land.

Temperature, salinity and chlorophyll fluorescence were recorded continuously by a compact temperature-salinometer (A7CT-USB, JFE-Advantech) and an *in vivo* fluorometer (ACLW2-USB, JFE-Advantech) (Fig. 1). The value of chlorophyll fluorescence will be calibrated with chlorophyll *a* concentration measured by DMF (N,N-dimethylformamide) extraction and the fluorometric detection method.

2. Distribution of trace metals in the surface water

Water samples were collected using acid-cleaned Teflon tubing and a Teflon bellows pump. Seawater was obtained from 5 m depth at 19 stations (Table 1). The sample seawater was filtered through an inline AcroPak 200 Capsule filter unit having 0.8/0.2 μm pore-size Supor Membrane (Pall). Samples for analyses of dissolved trace metals were collected in acid-cleaned 125-ml LDPE bottles and acidified to $\text{pH} < 1.7$ with 20% quartz-distilled HCl (TAMAPURE AA-100).

The acidified water samples will be stored for more than three months, and then analysis of Mn, Fe, Co, Ni, Cu and Zn concentration will be done by a chelating resin concentration and HR-ICP-MS (ELEMENT 2) detection.

3. Vertical profiles of macro-nutrients and chlorophyll *a*

Seawater samples were obtained by Niskin bottles attached with CTD sensor and an acid-cleaned bucket for measurements of chlorophyll *a* and nutrients (Table 1).

The samples (ca. 300 ml) for Chl *a* measurement were filtered onto Whatman GF/F filter by gentle vacuum filtration (< 200 mm Hg), and Chl *a* was extracted from the filters in N,N-dimethylformamide at -20°C . Extracted Chl *a* will be determined onshore by the fluorometric technique with a Turner Designs 10-AU field fluorometer with the chlorophyll optical kit for the non-acidification method.

Nutrient samples were collected in 10-ml acrylic test tubes, and were stored frozen at -20°C for onshore analyses of NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} and $\text{Si}(\text{OH})_4$ using an auto-analyzer (AACS-IV).

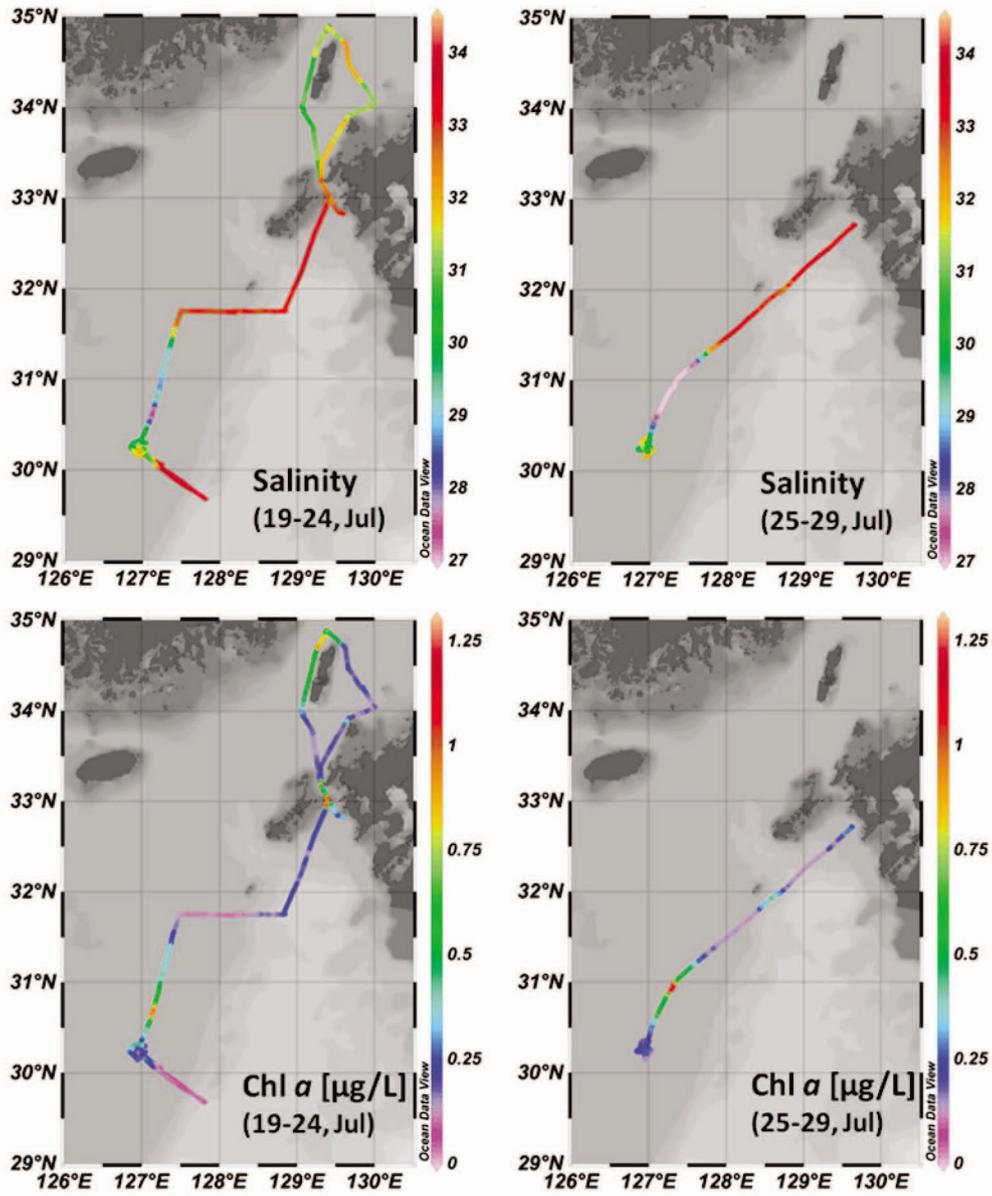


Fig. 1 Salinity and chlorophyll fluorescence (uncorrected value) distributions of surface water (4.5 m) along the cruise track.

Table 1. Sampling stations and observed parameters.

Date	Stn.	Diazotrophs	Phytoplankton	Chl α	Nutrients	Nanomolar nutrients	Trace metals
19-Jul	Mie → Test	□×2	□×2	□×2	□×2	□×2	
	Test	○	○	○●	○●	□○	△
	Test → TE6	□×2	□×2	□×2	□×2	□×2	
20-Jul	TE6	○	○	○●	○●	□○	△
	TE5	○	○	○●	○●	□○	△
	TE4	○	○	○●	○●	□○	△
	TE3	○	○	○●	○●	□○	△
	TE2	○	○	○●	○●	□○	△
	TE2 → CK5	□×5	□×5	□×5	□×5	□×5	
	21-Jul	CK5	○⊙	○◇	○●	○●	□○
CK4		○⊙	○◇	○●	○●	□○	△
CK3		○⊙	○◇	○●	○●	□○	△
CK2		○⊙	○◇	○●	○●	□○	△
CK1		○⊙	○◇	○●	○●	□○	△
CK1 → TRN		□×2	□×2	□×2	□×2	□×2	
22-Jul		CK1 → TRN	□	□	□	□	□
	C1	○⊙	○◇	○●	○●	□○	△
	C2	○⊙	○◇	○●	○●	□○	△
	C3	○⊙	○◇	○●	○●	□○	△
	C4	○⊙	○◇	○●	○●	□○	△
23-Jul	C1N		○	○	○		
	C1W			○	○		
	C1S			○	○		
	C1E			○	○		
	C1-1 (10:18)	○	○	○●	○●	○	
24-Jul	C1 (10:00)	○	○	○	○	○	
25-Jul	C1S			○	○		
	C1E			○	○		
	C1N			○	○		
	C1W			○	○		
	TRC (12:12)	○	○	○	○	○	
26-Jul	TRC (10:02)	○	○	○	○	○	
27-Jul	C1 (07:38)	○	○	○	○	○	
	C1 → CCK1					□×2	
	CCK1	□	□	□	□	□	△
	CCK1 → CCK2					□×3	
	CCK2	□	□	□	□	□	△
	CCK2 → CCK3					□×2	
	CCK3	□	□	□	□	□	△
	CCK3 → Squid	□×2	□×2	□×2	□×2	□×11	
	Squid	□	□	□	□	□	△
Squid → Mie	□	□	□	□	□×2		
28-Jul	Squid → Mie	□	□	□	□	□×3	
	□	Wet Lab. Seawater supply (4.5 m)					
	○	0 m bucket					
	△	5 m pump					
	●	CTD: 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700 m, SCM and bottom-5 m (Max 200 m for Chl α)					
	⊙	CTD: 10, 20, 30, 50 m and SCM					
	◇	CTD: SCM					

Nagoya University

Station No	Stn Name	Date	Station info.			Lat. (N)	Lon.(E)	Depth	Surface Temperature	Surface Salinity	Transparency	Instruments							Note
			Start Time	End Time								PRR	scatter-meter	MicroTops	FlowCAM	AAQ	ME	CTD	
0	Test	19-Jul-17	16:06	16:18	33.75	129.204	115	28.9	31.71	18	O	O	X	O	O	O	O	O	
1	TE6	20-Jul-17	06:00	6:14	34.87	129.37	220	26.0	31.50	X	X	X	X	O	O	O	O	O	
2	TE5	20-Jul-17	07:56	8:07	34.71	129.61	89	26.2	32.29	20	X	X	X	O	O	O	O	O	
3	TE4	20-Jul-17	09:36	9:47	34.46	129.67	103	27.0	32.26	32.23	O	O	X	O	O	O	O	O	
4	TE3	20-Jul-17	11:24	11:33	34.25	129.84	124	27.9	31.63	18	O	O	O	O	O	O	O	O	
5	TE2	20-Jul-17	13:54	14:05	34.04	129.50	88	29.0	31.70	X	O	O	O	O	O	O	O	O	
6	CK5	21-Jul-17	05:47	6:01	31.75	128.84	806	28.8	33.10	X	X	X	O	O	O	O	O	O	
7	CK4	21-Jul-17	09:30	9:39	31.75	128.50	378	29.0	32.68	23	O	O	O	O	O	O	O	O	
8	CK3	21-Jul-17	11:57	12:12	31.75	128.18	165	29.0	32.93	30	O	O	O	O	O	O	O	O	
9	CK2	21-Jul-17	14:22	14:34	31.75	127.84	145	30.1	32.94	30	O	O	O	O	O	O	O	O	
10	CK1	21-Jul-17	16:31	16:42	31.75	127.50	132	30.2	32.74	X	O	O	O	O	O	O	O	O	
11	C1	22-Jul-17	06:37	6:52	30.23	126.94	102	30.1	31.18	X	X	X	O	X	X	X	O	O	
12	C2	22-Jul-17	08:44	8:55	30.06	127.24	115	29.4	34.69	X	X	X	O	X	O	O	O	O	
13	C3	22-Jul-17	10:52	11:02	29.86	127.52	154	29.9	33.66	36	O	O	O	X	O	O	O	O	
14	C4	22-Jul-17	12:49	13:00	29.68	127.80	631	30.2	33.88	35	O	O	O	X	O	O	O	O	
15	C1N	23-Jul-17	06:14	6:19	30.32	126.95	99	29.6	29.80	X	X	X	O	X	O	O	X	O	
16	C1W	23-Jul-17	07:15	7:19	30.23	126.85	97	30.3	30.50	X	X	X	O	X	O	O	X	O	
17	C1S	23-Jul-17	08:21	8:28	30.15	126.96	101	29.9	31.50	25?	X	X	O	X	O	O	O	O	
18	C1E	23-Jul-17	09:21	9:25	30.23	127.05	103	30.2	31.30	21	X	X	O	X	O	O	X	O	
19	C1-1	23-Jul-17	10:18	10:27	30.23	126.96	100	30.4	30.20	25	X	X	O	X	O	O	O	O	
20	C1-12H	23-Jul-17	12:00	-	30.23	126.96	100	30.9	29.97	25	O	O	O	X	O	O	O	O	
21	C1-14H	23-Jul-17	14:00	-	30.23	126.96	100	30.8	29.80	25	O	O	O	X	O	O	O	O	
22	C1-16H	23-Jul-17	16:00	-	30.23	126.96	100	30.8	30.26		O	O	O	X	O	O	O	O	
23	C1-PP1	24-Jul-17	03:18	3:28	30.23	126.95	100	30.2	30.45	X	X	X	X	X	X	O	O	O	PP Day1 (PRR, SCATTER during DayTime)
24	C1S	25-Jul-17	08:11	8:14	30.14	126.95	102	30.6	-	X	X	X	X	X	X	O	X	X	
25-1	C1E	25-Jul-17	09:17	9:21	30.24	127.05	104	30.2	-	X	X	X	X	X	O	X	X	X	
25-2	C1N	25-Jul-17	10:16	10:19	30.32	126.95	99	30.8	29.60	30	O	O	O	X	O	O	X	O	
26	C1W	25-Jul-17	11:27	11:30	30.23	126.85	96	30.9	29.82	33	O	O	O	X	O	O	X	O	
27	C1 (TRC)	25-Jul-17	12:28	12:32	30.23	126.96	100	30.7	31.01	33	O	O	O	X	O	O	X	O	
28	C1-2	25-Jul-17	14:00	-	30.23	126.96	100	30.9	30.84	X	O	O	O	X	O	O	X	O	
29	C1-3	25-Jul-17	16:00	-	30.23	126.96	100	31.6	29.90	X	O	O	O	X	O	O	X	O	
30	TRC1-PP	26-Jul-17	03:13	3:23	30.24	126.94	100	30.7											PP Day2

Table 1. Water sampling and data collections at each station. The objective of each observation is as follow.

1. Biological characteristics and phytoplankton community structure

Chlorophyll-a (Chl-a) samples were taken from Niskin bottle at every 10m of depth to obtain vertical profiles of phytoplankton concentration.

Chlorophyll-a size fraction (<3µm, <10µm and <2µm, <20µm), in situ multispectral excitation fluoro-meter (ME) and HPLC profile (surface, SCM, above SCM and below SCM) were collected.

FlowCAM was used to take phytoplankton images from water samples.

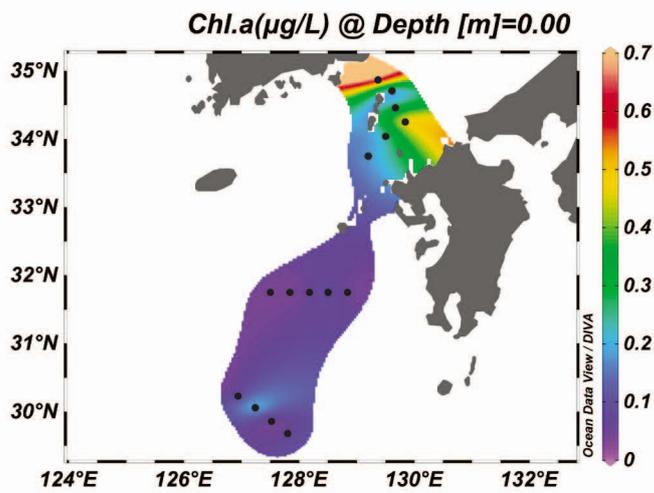


Figure 1. Surface Chl-a concentration

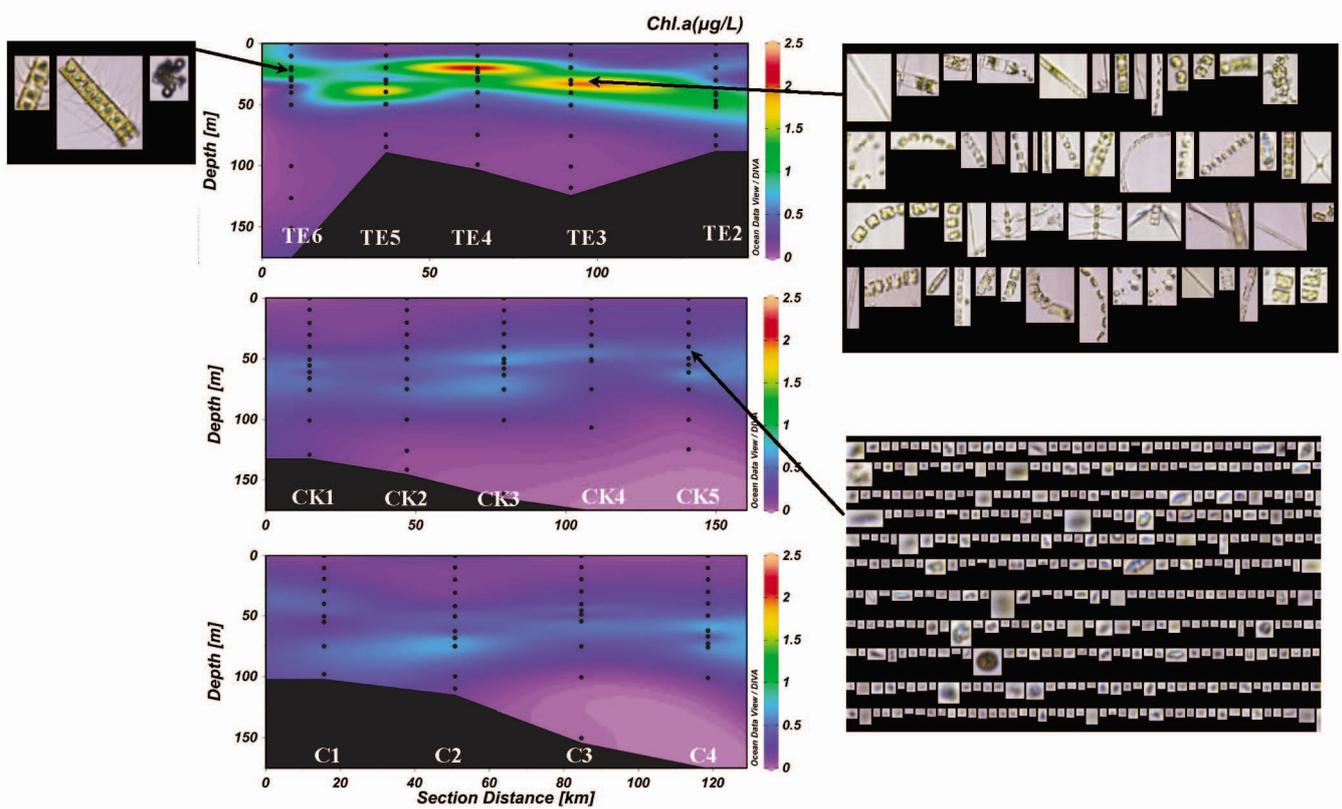


Figure 2. Vertical profiles of Chl-a concentration, and images of particles in water samples by using FlowCAM.

2. Primary production measurement

Two long term (24 hours) simulated in-situ primary production (PP) were conducted at C1-TS station using ^{13}C method. Water samples for the experiment were collected at 100, 50, 25, 10, 5 and 1 % light level relative to surface light intensity.



Photo 1. Incubation base used for PP measurements.

3. Validation of satellites products

Surface Chl-a, coloured dissolved organic matter (CDOM), Suspended Sediments concentration (SS), back scattering coefficient (Hydroscat-6P), remote sensing reflectance (R_{rs}, PRR) were collected for validation of satellite ocean color products and calibration of ocean color algorithms. MicroTops, a hand-held multi-band sunphotometer, was used to optionally measure the total ozone and the water vapor column as well as aerosol optical thickness at 1020 nm.

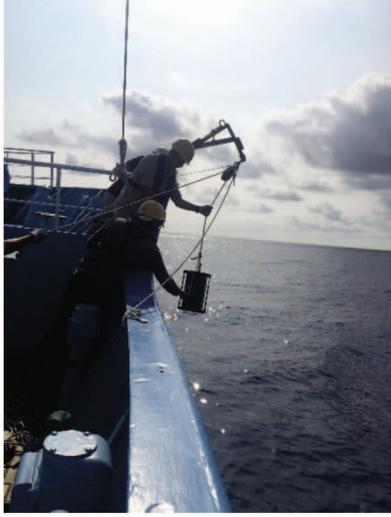


Photo 2. Deploying scatterometer.

University of Toyama

Tadateru Noguchi (On board)

Jing Zhang, Shota Kambayashi, and Mutsuki Sasaki (On land)

Corresponding researcher: Jing Zhang (jzhang@sci.u-toyama.ac.jp)

Water mass structure analysis in the East China Sea and Kuroshio water using multiple chemical tracers

Introduction and objectives

The East China Sea (ECS) is one of the largest marginal seas in the world, and it has shown high primary production (Hama et al., 1996). Its enhanced primary productivity is sustained by rich nutrients from terrestrial and marine sources (Walsh, 1991; Wollast, 1993). Purcell et al. (2001) reported that the blooms of jellyfish in the ECS are related to increases in nutrients. However, primary production in the ECS has decreased due to changes in the nutrient balance (Gong et al., 2006). Therefore, there is an urgent need to clarify how nutrients have changed in the ECS, in particular nutrients provided by relevant water masses. The ECS has four water sources: the Kuroshio water, the Changjiang (Yangtze) River, the Yellow Sea Coastal Current (YSCC), and the Taiwan Strait Current (TSC). These four sources of water supply nutrients to the shelf of the ECS (Gong et al., 1996). Chen and Wang (1999) suggested that the nutrient flux from the Kuroshio to the shelf is greater than that from the Changjiang River. Therefore, the objective of this cruise is to describe the water masses over the shelf of the ECS using multi-tracers, e.g. Rare earth elements, radionuclides such as Ra and Cs isotope, and oxygen isotope ($\delta^{18}\text{O}$). With a simple mixing model, we calculate the mixing ratios of KIW and then use these ratios to illustrate the extent to which KIW nutrients contribute to the shelf's primary productivity.

Materials and Methods

Seawater samples of REEs, ^{226}Ra , and $\delta^{18}\text{O}$ from surface to bottom were taken using buckets or 5 L Niskin bottles mounted on a Rosette sampler. Cs and Ra isotope samples in surface water were also collected using underway pumping system. Seawater samples were collected from 8 stations (Table 1). The collected seawater samples are listed as an appendix. Collected REEs samples (~500 mL) and ^{226}Ra samples (~500 mL) were filtered with 0.2 μm cellulosic acetate membrane filter within 24 hours, and then the filtrate was immediately acidified to $\text{pH} < 1.6$ with ultrapure HCl (Ultrapure-100, KANTO KAGAKU) in the clean bench on board. Cs and Ra isotope samples (~20 L) were filtered with 0.45

μm cellulose acetate membrane filter, and then the filtrate was acidified to $\text{pH} < 1.6$ with 60% HNO_3 (Wako Pure Chemical Industries).

Future Plans

$\delta^{18}\text{O}$ samples will be analyzed by Isotope Ratio Mass Spectrometer (IR-MS, Prism) in laboratory of the University of Toyama. The filtrate of REEs and ^{226}Ra will be pre-concentrated and then analyzed with an Sector Field Inductively-Coupled Plasma Mass Spectrometer (SF-ICP-MS, ELEMENT II). Cs and Ra isotope samples will be measured with Ge semiconductor detector in the laboratory after pre-concentration.

Table 1. Inventory information for the water sampling

Stn.name/ Cast No.	Latitude			Longitude			Depth (m)	Sampling item			Note
	$\delta^{18}\text{O}$	REEs/ ^{226}Ra	Cs/Ra								
TE6/1	34°	52.060'	N	129°	22.043'	E	220	○	○		Shallow Cast (Surface ~ 125 m)
TE6/2	34°	52.525'	N	129°	22.474'	E	220	○	○	○	Deep Cast (125 m~ Bottom)
TE4	34°	27.523'	N	129°	40.012'	E	103	○	○	surface	
TE2/1	34°	02.486'	N	129°	00.174'	E	88	○	○		
TE2/2	34°	02.524'	N	129°	00.393'	E	88			○	
CK5/1	31°	45.006'	N	128°	50.073'	E	806	○	○		Shallow Cast (Surface ~ 125 m)
CK5/2	31°	45.097'	N	128°	50.256'	E	809	○	○	○	Deep Cast (150 m~ Bottom)
CK5/3	31°	45.252'	N	128°	50.554'	E	812			○	
CK3	31°	44.960'	N	128°	10.140'	E	164			surface	
CK1/2	31°	45.130'	N	127°	30.062'	E	132	○	○	surface	
C1	30°	14.054'	N	126°	56.032'	E	102	○	○	surface	
C4/1	29°	40.936'	N	127°	48.004'	E	631	○	○	surface	Shallow Cast (Surface ~ 100 m)
C4/2	29°	40.897'	N	31°	45.130'	E	631		○	○	Middle Cast (125 m ~ 200 m)
C4/3	29°	40.871'	N	31°	45.262'	E	631		○	○	Deep Cast (400 m~ Bottom)

Appendix. Water sampling list

Bottle No.	TE6/1st				TE6/2nd			
	Depth (m)	Cs/Ra	REEs/Ra	$\delta^{18}\text{O}$	Depth (m)	Cs/Ra	REEs/Ra	$\delta^{18}\text{O}$
0	S0	○	○	○				
1	27.9				201.7			
2	19.6				201.7	○		
3	21.5				200.9	○		
4	21.4				200.8	○		
5	126.5				102.9	○		
6	100.4		○	○	102.9	○		
7	75.2				102.9	○		
8	50		○	○	102.9	○		
9	40.1		○	○	102.9	○		
10	29.9		○	○	215.7		○	○
11	19.6		○	○	201		○	○
12	10.3		○	○	151.1		○	○

Bottle No.	TE4				TE2/1st			
	Depth (m)	Cs/Ra	REEs/Ra	$\delta^{18}\text{O}$	Depth (m)	Cs/Ra	REEs/Ra	$\delta^{18}\text{O}$
0	S0	○	○	○	S0	○	○	○
1	27.9				51.7			
2	20.5				41.8			
3	23.3				47			
4	23.2				47.2			
5	23.2				9.5			
6	99.2		○	○	83.5		○	○
7	75		○	○	75.5		○	○
8	50.8		○	○	50.5		○	○
9	40		○	○	40.2		○	○
10	30		○	○	30.1		○	○
11	20.4		○	○	19.7		○	○
12	9.8		○	○	9,4		○	○

Bottle No.	TE2/2nd				CK5/1st			
	Depth (m)	Cs/Ra	REEs/Ra	$\delta^{18}\text{O}$	Depth (m)	Cs/Ra	REEs/Ra	$\delta^{18}\text{O}$
0	S0				S0	○	○	○
1	56.6	○			61.2			
2	56.5	○			49.6			
3	56.5	○			54.9			
4	56.5	○			54.9			
5	84.4	○			124.8			
6	84.6	○			100.3		○	○
7	85	○			75.2			
8	85.2	○			49.8			
9	39.9	○			40.1		○	○
10	39.9	○			30			
11	39.8	○			19.9		○	○
12	39.8	○			9.7			

Bottle No.	CK5/2nd				CK5/3rd			
	Depth (m)	Cs/Ra	REEs/Ra	$\delta^{18}\text{O}$	Depth (m)	Cs/Ra	REEs/Ra	$\delta^{18}\text{O}$
0								
1	605.7	○			150.7			
2	605.8	○			150.7			
3	605.8	○			150.8			
4	606.2	○			150.8			
5	807.7		○	○	403.3	○		
6	705.5				403.5	○		
7	604.8		○	○	403.6	○		
8	504.1				403.1	○		
9	402.7		○	○	150.7	○		
10	302.1				150.8	○		
11	201.6		○	○	150.7	○		
12	150.5		○	○	150.7	○		

Bottle No.	CK3				CK1/2nd			
	Depth (m)	Cs/Ra	REEs/Ra	$\delta^{18}\text{O}$	Depth (m)	Cs/Ra	REEs/Ra	$\delta^{18}\text{O}$
0	S0	○	○		S0	○	○	○
1	63.5				65.9			
2	53.5				55.5			
3	58.5				61			
4	58.2				60.6			
5	161.4				129.1		○	○
6	100.8				100.9		○	○
7	75.3				75.7			
8	50.2				50.7		○	○
9	40.1				40			
10	29.6				30.2			
11	20.1				20.4		○	○
12	10.1				9.6		○	○

Bottle No.	C1				C4/1st			
	Depth (m)	Cs/Ra	REEs/Ra	$\delta^{18}\text{O}$	Depth (m)	Cs/Ra	REEs/Ra	$\delta^{18}\text{O}$
0	S0	○	○	○	S0	○	○	○
1					72.9			
2					62.2			
3	70				66.9			
4	70				67.1			
5	60.4		○	○	9.7			
6	96.7		○	○	101.3		○	
7	75.3				76			
8	50.2		○	○	49.9		○	○
9	40.3				39.9			
10	30.1				30.2			
11	20		○	○	20.1		○	○
12	10.3		○	○	9.9			

Bottle No.	C4/2nd				C4/3rd			
	Depth (m)	Cs/Ra	REEs/Ra	$\delta^{18}\text{O}$	Depth (m)	Cs/Ra	REEs/Ra	$\delta^{18}\text{O}$
0								
1	125.7				625.5	○		
2	125.8				625.2	○		
3	125.7				625.5	○		
4	125.5				625	○		
5	125.5				625.7		○	
6	202.4				504			
7	151		○		402.5	○		
8	151.6	○			402.2	○		
9	150.8	○			402.5	○		
10	150.4	○			402.5	○		
11	120.9	○			402.6		○	
12	125.4				301.7			

Ocean University of China

Zhang JiangYiAo (U4; zj968520@sina.com) (On board)

Meixun Zhao (On land)

Corresponding researcher: Meixun Zhao (maxzhao@ouc.edu.cn)

Expected results:

1. To understand the processes and mechanisms of phytoplankton productivity and community structure gradient in the Okinawa Trough using lipid biomarkers.
2. To evaluate the contribution of subsurface nutrient to phytoplankton productivity and community structure by comparing biomarker, nutrients and hydrological parameters.
3. To publish one paper in an international journal by combining data from this cruise with other regional data.



Figure 1. Photo of filter

Table 1. Water sampling and data collections at each station

Station name	Longitude	Longitude	Arrival time	Water depth (m)	Surface temperature (°C-deg)	Sampling depth (m)	Filter number	Filter weight (g)	Filtration volume (V)	Remark
TEST	129° 12.104E	33° 45.008 N	2017.7.19 16:06	115	28.9	5	1	1.3678	40	
TE6- surface	129° 22.043E	34° 52.060 N	2017.7.20 06:00	220	26.2	5	2	1.3652	130	Filter was slightly broken
TE6- surface	129° 22.043E	34° 52.060 N	2017.7.20 06:00	220	26.2	5	3	1.3608	100	
TE3- surface	129° 50.077E	34° 15.023 N	2017.7.20 11:24	124	27.9	5	4	1.3620	90	
TE3- surface	129° 50.077E	34° 15.023 N	2017.7.20 11:24	124	27.9	5	5	1.3742	90	
TE3- surface	129° 50.077E	34° 15.023 N	2017.7.20 11:24	124	27.9	5	6	1.3608	90	
TE3- subsurface	129° 50.077E	34° 15.023 N	2017.7.20 11:24	124	27.7	36.3	7	1.3638	60	
TE3- subsurface	129° 50.077E	34° 15.023 N	2017.7.20 11:24	124	27.7	36.3	8	1.3741	35	
TE3- subsurface	129° 50.077E	34° 15.023 N	2017.7.20 11:24	124	27.7	36.3	9	1.3820	45	
TE3- subsurface	129° 50.077E	34° 15.023 N	2017.7.20 11:24	124	27.7	36.3	10	1.3762	40	
CK5- surface	128° 50.666E	31° 45.303 N	2017.7.21 06:00	812	28.8	5	11	1.3799	80	Outside of filter was broken
CK5- surface	128° 50.666E	31° 45.303 N	2017.7.21 06:00	812	28.8	5	12	1.3734	85	Filter was broken
CK5- surface	128° 50.666E	31° 45.303 N	2017.7.21 06:00	812	28.8	5	13	1.3802	85	
CK5- surface	128° 50.666E	31° 45.303 N	2017.7.21 06:00	812	28.8	5	14	1.3670	80	
CK5- subsurface	128° 50.666E	31° 45.303 N	2017.7.21 06:00	812	28.8	54.2	15	1.3819	50	
CK5- subsurface	128° 50.666E	31° 45.303 N	2017.7.21 06:00	812	28.8	54.2	16	1.3643	50	Filter was broken
CK5- subsurface	128° 50.666E	31° 45.303 N	2017.7.21 06:00	812	28.8	54.2	17	1.3738	60	
CK5- subsurface	128° 50.666E	31° 45.303 N	2017.7.21 06:00	812	28.8	54.2	18	1.3656	35	
CK3- surface	128° 10.168E	31° 44.939 N	2017.7.21	164	29.4	5	19	1.3740	40	
CK3- surface	128° 10.168E	31° 44.939 N	2017.7.21	164	29.4	5	20	1.3720	80	Filter was broken when gas venting

CK3- surface	128° 10.168E	31° 44.939 N	2017.7.21	164	29.4	5	21	1.3754	80
CK1- surface	127° 30.047E	31° 45.064 N	2017.7.21 16:24	131	30.2	5	22	1.3659	40
CK1- surface	127° 30.047E	31° 45.064 N	2017.7.21 16:24	131	30.2	5	23	1.3691	80
CK1- surface	127° 30.047E	31° 45.064 N	2017.7.21 16:24	131	30.2	5	24	1.3710	80
C1- surface	126° 56.032E	30° 14.104 N	2017.7.22 06:37	102	30.1	5	25	1.3770	80
C1- surface	126° 56.032E	30° 14.104 N	2017.7.22 06:37	102	30.1	5	26	1.2273	80
C3- surface	127° 30.963E	29° 51.925 N	2017.7.22 10:46	154	29.9	5	27	1.2501	40
C3- surface	127° 30.963E	29° 51.925 N	2017.7.22 10:46	154	29.9	5	28	1.2669	80
C3- surface	127° 30.963E	29° 51.925 N	2017.7.22 10:46	154	29.9	5	29	1.2500	80
C4- surface	127° 48.515E	29° 40.811 N	2017.7.22. 13:48	631	30.6	5	30	1.2547	80
C4- surface	127° 48.515E	29° 40.811 N	2017.7.22. 13:48	631	30.6	5	31	1.2558	83
C4- surface	127° 48.515E	29° 40.811 N	2017.7.22. 13:48	631	30.6	5	32	1.2368	85
C4- surface	127° 48.515E	29° 40.811 N	2017.7.22. 13:48	631	30.6	5	33	1.2415	80
C4- subsurface	127° 48.515E	29° 40.811 N	2017.7.22. 13:48	631	30.6	62.9	34	1.2567	80
C4- subsurface	127° 48.515E	29° 40.811 N	2017.7.22. 13:48	631	30.6	62.9	35	1.2473	77
C4- subsurface	127° 48.515E	29° 40.811 N	2017.7.22. 13:48	631	30.6	62.9	36	1.2285	50
C1- subsurface	126° 57.470E	30° 13.690 N	2017.7.23 10:32	100	30.4	71.5	37	1.2316	20
1cast									
C1- subsurface	126° 57.470E	30° 13.690 N	2017.7.23 10:32	100	30.4	71.5	38	1.2344	40
1cast									
C1- subsurface	126° 57.619E	30° 13.609 N	2017.7.23 10:43	100	30.4	71.5	39	1.2315	65
2cast									
C1- subsurface	126° 57.772E	30° 13.535 N	2017.7.23 10:53	100	30.5	71.5	40	1.2368	65
3cast									

Filter was broken when folding

C1- surface-1	126° 57.830E	30° 13.112 N	2017.7.23 14:30	101		5	41	1.2311	80
C1- surface-2	126° 56.532E	30° 13.972 N	2017.7.23 15:22	99		5	42	1.2367	80
C1- surface-3	126° 57.173E	30° 14.812 N	2017.7.23 17:37	99	31.08	5	43	1.2332	80
C1- surface-4	126° 57.763E	30° 13.672 N	2017.7.24 07:10	101	30.83	5	44	1.248	80
C1- surface-5	126° 56.380E	30° 14.808 N	2017.7.24 08:00	100	30.98	5	45	1.2339	80
C1- surface-6	126° 57.15E	30° 13.839 N	2017.7.24 08:57	101	30.95	5	46	1.2333	80
C1- surface-7	126° 57.121E	30° 13.971 N	2017.7.24 09:50	101	30.86	5	47	1.2352	80
C1- surface-8	126° 56.619E	30° 14.336 N	2017.7.24 13:20	99	31.38	5	48	1.2475	80
C1- surface-9	126° 57.554E	30° 13.361 N	2017.7.24 14:20	99	31.33	5	49	1.2315	80
C1- surface-10	126° 56.708E	30° 14.329 N	2017.7.24 15:15	99	31.52	5	50	1.2369	80
C1- surface-11	126° 56.537E	30° 14.843 N	2017.7.26 07:00	99	31.4	5	51	1.3162	80
C1- surface-12	126° 56.669E	30° 14.231 N	2017.7.26 08:05	101	31.38	5	52	1.3231	80

Filter was broken