Data

태평양-인도양 해양순환 연구 프로그램

전동철¹ · 김응* · 신창웅¹ · 김철호¹ · 국종성¹ · 이재학¹ · 이윤호² · 김석현¹

¹한국해양과학기술원 해양순환 · 기후연구부

²한국해양과학기술원 해양생태계연구부
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

TIPEX (Tropical Indo-Pacific water transport and ecosystem monitoring EXperiment) Program

Dongchull Jeon¹, Eung Kim^{1*}, Chang Woong Shin¹, Cheol-Ho Kim¹, Jong Seong Kug¹,
Jae Hak Lee¹, Youn-Ho Lee², and Suk Hyun Kim¹

¹*Ocean Circulation and Climate Research Division, KIOST*

²*Marine Ecosystem Research Division, KIOST*
Ansan 426-744, Korea

Abstract : One of the factors influencing the climate around Korea is the oceanic-atmospheric variability in the tropical region between the eastern Indian and the western Pacific Oceans. Lack of knowledge about the air-sea interaction in the tropical Indo-Pacific region continues to make it problematic forecasting the ocean climate in the East Asia. The ‘Tropical Indo-Pacific water transport and ecosystem monitoring EXperiment (TIPEX)’ is a program for monitoring the ocean circulation variability between Pacific and Indian Oceans and for improving the accuracy of future climate forecasting. The main goal of the TIPEX program is to quantify the climate and ocean circulation change between the Indian and the Pacific Oceans. The contents of the program are 1) to observe the mixing process of different water masses and water transport in the eastern Indian and the western Pacific, 2) to understand the large-scale oceanic-climatic variation including El Niño-Southern Oscillation (ENSO)/Warm Pool/Pacific Decadal Oscillation (PDO)/Indian Ocean Dipole (IOD), and 3) to monitor the biogeochemical processes, material flux, and biological changes due to the climate change. In order to effectively carry out the monitoring program, close international cooperation and the proper co-work sharing of tasks between China, Japan, Indonesia, and India as well as USA is required.

Key words : TIPEX, Indonesian Through-flow (ITF), climate change, tropical Indo-Pacific Ocean

1. 서 론

북서태평양 중위도에 해당하는 우리나라 주변해역은 21세기에 많이 나타나는 ‘중태평양 엘니뇨’의 발생시 다른 해역보다 높은 수온상승을 보인다(Yeh et al. 2009, Yoon et al. 2012). 이 여파로 우리나라 주변에서 발생되는 태풍

은 점차 강해지고 발생빈도 또한 증가하는 기상이변이 나타나고 있다. 전지구적인 기후변화에 따른 장기적인 대책 수립을 위해 우리나라는 최근 해양기후에 미치는 근본적인 이해와 거시적 원인규명을 위한 연구의 필요성이 증가하고 있다.

우리나라의 기후에 영향을 미치는 직접적인 요인은 크게 세 가지로 북극해와 시베리아 고기압에 연계된 극진동, 티벳고원의 환경 변화, 그리고 태평양-인도양 열대 해

*Corresponding author. E-mail : eung@kiost.ac

Fig. 1. Programs of the ocean research in the tropical Pacific and the Indian Ocean and atmospheric circulation influencing upon the seas around Korea. Acronyms for the programs are as follows; TIPEX (Tropical Indo-Pacific water transport and ecosystem monitoring EXperiment), NPOCE (Northwestern Pacific Ocean Circulation and Climate Experiment), SPICE (Southwest Pacific ocean Circulation and Climate Experiment), TOCS (Tropical Ocean Climate Study), OKMC (Origins of the Kuroshio and Mindanao Currents), TRITON (TRIangle Trans-Ocean buoy Network), and RAMA (Research moored Array for African-Asian-Australian Monsoon Analysis and prediction)

역의 변동성이다(Fig. 1). 이 중에서 시베리아와 티벳고원의 환경 변동성이 우리나라에 미치는 영향에 대한 연구는 많이 이루어져 왔으나(김 등 2005, Kim et al. 2005, 이 등 2007, 환경부 2008, 국립환경과학원 2011), 열대 동인도양과 서태평양의 변동성에 대한 연구 및 상호작용에 의한 영향은 상대적으로 연구가 덜 이루어져 동북아시아 및 우리나라 주변해역에서 해양기후예측의 불확실성을 크게 줄이지 못한 요인이 되었다.

열대 서태평양과 동인도양은 인도네시아 해역을 사이에 두고 대양간 해수교환이 이루어지고, 난수풀(warm pool)의 경년 변동이 발생하는 곳이다. 해수수송과 함께 교환되는 열에너지는 열대 동인도양에서 대기순환을 거쳐 티벳고원의 대기변동에 영향을 주며, 이것이 중국대륙을 거쳐 우리나라에 영향을 미치게 된다(Fig. 2). 즉, 우리나라의

해양기후에 직접적으로 영향을 미치는 것은 북적도해류로부터 분지된 쿠로시오의 북상하는 흐름이지만, 또한 남쪽으로 분지된 민다나오해류가 뉴기니연안류와 만나서 일부가 인도네시아 해역으로 유입되어 인도양으로 유출되는 과정에서 동반되는 열에너지가 대기의 해들리순환(Hadley circulation)을 통하여 중위도 동쪽에 위치한 우리나라 주변해역에 직간접적으로 영향을 주게 된다(Yamagata et al. 2013).

인도네시아통과류(ITF: Indonesian Through-flow)는 1990년대 이후 이 해역의 해류 관측 자료들을 종합 해석한 Gordon (2005)에 의해 설명된 바 있다. Gordon (2005)에 의하면, 북태평양과 남태평양으로부터 기인한 서로 다른 수괴가 인도네시아 동부해역으로 유입되는 통로는 크게 세 가지이다. 민다나오해류가 Sulawesi 해를 거쳐

Fig. 2. Schematic map of the teleconnection triangle of the Indian Ocean Dipole. Detailed interpretation is located at the website (<http://www.jamstec.go.jp/frsgc/eng/press/IOD/index.html>)

Makassar 해협으로 흐르는 제1경로, Sulawesi 북단과 Halmahera 섬 사이의 Maluku 해를 통과하여 Banda 해로 흐르는 제2경로, 그리고 Halmahera 섬과 뉴기니 사이의 Halmahera 해와 Seram 해를 거쳐 Banda 해로 흐르는 제3 경로가 있다. 또한 인도양으로 유출은 크게 Timor, Ombai, 그리고 Lombok의 세 해협을 중심으로 이루어진다. 인도네시아해로 유입되는 수송량은 100 m 상층부로 약 4.1 Sv($=1 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), 중층으로 약 8.7 Sv 그리고 600 m 하층에서 약 2.9 Sv이고, 유출량은 인도네시아 내 해에서의 혼합과 용승 작용에 의하여 같은 수층에서 각각 5.5 Sv, 7.3 Sv 그리고 2.3 Sv이 발생한다(Gordon et al. 2010). 그러나 이 연구 결과는 인도네시아 내해를 연결하는 주요 해협사이에서 관측된 결과들로 태평양과 인도양에 접한 직접적인 유입과 유출 해역의 관측 결과가 포함되지는 않았다. 그러나 우리나라는 2007년도에 Halmahera 해 주변의 해양혼합 및 해수수송량 관측 탐사에 참여하여 직접적인 유입량을 추정할 바 있다(Kim et al. 2013a).

우리나라의 미래 기후 예측 정확도 향상을 위하여 El Niño-Southern Oscillation (ENSO), Indian Ocean Dipole (IOD), 몬순, 태풍 등 해양/대기 현상의 변화 예측에 필수적인 열대 태평양-인도양 해양 순환 변동성 연구를 위한 태평양-인도양 해양 순환 연구 프로그램(TIPEX: Tropical Indo-Pacific water transport and ecosystem monitoring

Experiment)을 기획하였다(한국해양과학기술원 2012b). 열대 대양간 해수순환 연구를 위한 본 기획 연구에서는 우리나라 기후에 영향을 미치는 요인들 중에서 열대 대양(태평양-인도양) 사이의 인도네시아 해역을 통과하는 해수수송량(Kripalani et al. 2005)을 모니터링하여 지구기후변화에 따른 인도네시아 통과류(Indonesian throughflow; ITF)의 수송량과 변동성을 정확히 산정할 수 있는 관측을 ITF의 직접적인 유입해역에서 다년간 관측을 수행하여 ITF의 장기 변동성을 파악하고, ITF의 관측 결과를 모델에 자료동화하여 미래의 열대대양 해수교환량 변화를 예측할 수 있는 연구수행 계획을 수립하고자 하였다. 또한, 본 해역에서 산호군집을 중심으로 한 생물상의 분포와 해양생태계의 중기변동성을 밝히는 데에 이차적인 목표를 두고, 해수 이동과 혼합에 따른 열대 생물종의 이동경로와 분포, 대표적인 지화학 추적자 변동성 등에 관한 연구를 수립하였다.

2. 국내외 연구 동향 및 SWOT 분석

한국

한국해양과학기술원은 2006년에 북서태평양이 우리나라 주변해에 미치는 해양기후순환생태 영향을 정량적으로 평가 및 예측하기 위하여 종합적이고 체계적인 대양연구 사업을 처음 시작하여 지금까지 진행하고 있다(한국해양

과학기술원 2012a). 대양연구사업에서는 북서태평양의 환경·생태모니터링 결과를 한국해 변화와 연계시켜 대기 및 해양물리, 생지화학 인자 변동 예측을 위한 연구기반 구축, 대양 계류 해양관측인프라를 통한 CLIVAR, NOAA, JAMSTEC 등 해외 우수 해양연구기관과 국제공동연구 협력체제 구축, 물리 생태 예측 모델 입력 자료와 북서태평양의 공간/경년 변동성 이해를 위한 장기 자료 확보 등으로 미래 해양환경변화 예측 시나리오 작성을 위한 기반을 구축하였다(한국해양과학기술원 2012a, Kim et al. 2013b). 또한, 기후 변화 및 장주기 기후 변동을 예측할 수 있는 우리나라 고유의 고해상도 기후예측 시뮬레이터 (GAIA 시뮬레이터)를 개발하기 위하여 2009년 가이아

(GAIA) 사업을 시작하여 2012년 1단계 완료시점까지 기후예측 시뮬레이터의 토대가 되는 해양-대기-해빙 접합 모형 개발과 검증을 완료하였다(교육과학기술부 2012). 연구 개발 과정을 통하여 적도태평양 수온약층을 포함한 상층의 혼합과정 연구, 기후모델에 적용할 수 있는 수온약층 혼합과정 모수화 방안 개발을 위한 적도 서태평양의 관측 자료를 확보하였다(교육과학기술부 2012). 해양-대기-해빙 접합모형 개발과정에서 기후 변동/변화 메커니즘 분석을 통하여 열대 태평양 해양-대기 상호작용, 기후요소 간(식생, 생지화학) 상호작용, 관측된 자료의 수치모델 동화를 위한 해양자료 동화 기법 등을 개발하였다(교육과학기술부 2012).

Fig. 3. Schematic maps for (a) the tropical climate variability research program and (b) the climate variation predictability and applicability research program (lower) by the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (<http://www.jamstec.go.jp/>)

미국

미국의 스크립스 해양연구소는 물리해양연구부(Physical Oceanography Research Division, PORD)를 중심으로 기후변화 연구 및 인도네시아 통과류 연구를 수행 중이다. 1995년부터 압력측정기를 사용하여 인도네시아 통과 해역의 해수면 변화를 관찰하였는데, 이 지역의 Indonesian flow의 변화는 계절적으로 반응하고 인도양의 우기계절 바람에 반응하며 태평양의 무역풍에 반응하는 것을 확인하였다(Chong et al. 2000). 이 연구를 위해 INSTANT(International Nusantara Stratification and Transport) 국제 프로그램에 참여하였으며, 최근 인도네시아 해역의 해수 유출입지역에 해양관측 장비를 계류하여 이를 관측하고 모니터링 할 계획을 국제협력 과제로 추진중에 있다(Sprintall 2013).

일본

일본 JAMSTEC은 대양간 해수순환 및 기후 변동 연구를 추진하기 위하여 지구환경변동영역분야(Research Institute for Global Change)에서 열대기후변동연구 프로그램과 단기기후변동응용예측연구 프로그램을 운용 중이다(JAMSTEC 2013). 열대기후변동연구프로그램(Tropical Climate Variability Research Program)은 계류부이관측망을 통한 엘니뇨, 인도양 IOD 현상 변동 구조, 서태평양-인도양 열대역의 고정밀도 해양·대기·육지관측 연구, 몬순과 관련된 물순환 및 Madden-Julian Oscillation (MJO) 발생·발달 구조 및 영향 연구를 주로 수행 중이다(Fig. 3a). 이중 인도양·태평양 해양기후변동연구팀(Indo-Pacific Ocean Climate Variations Research Team)은 El Niño, IOD현상 등의 해양기후 기후변동현상 발생, 발달, 그리고 종료 과정에 대하여 관측면에서 표층계류부이 데이터를 이용한 연구를 수행 중이다. 단기기후변동응용예측연구 프로그램(Climate Variation Predictability and Applicability Research Program)은 수치모델을 이용한 예측실험을 통한 기후변동, 해양변동 메커니즘 규명 및 예측정밀도 향상을 위한 기초연구에 초점을 두고 있다(Fig. 3b). 이 그룹에 속한 저위도역 기후변동예측연구팀(Low-latitude Climate Prediction Research Team)은 저위도역 기후변동 예측연구를 통한 해양·대기 변동과정의 이해 및 기후변동예측시스템에 의한 예측정밀도 향상을 위한 연구를 수행 중이다.

중국

중국과학원 해양연구소는 해류와 천해의 역학과정 연구를 위해 서태평양 순환과 엘니뇨 변이의 역학, 근해해류 연구 등에 역점을 두고 있으며, ENSO와 동아시아 계절풍의 예측능력 향상을 위한 해양학적 기초 이론을 제공하고

있다(IOCAS 2013). 중국과학원 해양연구소의 해양물리 분야 목표는 서태평양 순환류시스템의 역학 구조와 과정을 제시하고 비교적 정확한 서태평양 경계류 역학이론체계를 수립하여 해양순환류 요소를 포함한 동아시아 지역 기후예측 모델을 제시하는 것이다. 또한, 엘니뇨 형성과 변이의 기본적인 특징을 밝히고 ENSO 순환과 관련된 엘니뇨 역학 이론을 제시하고, 해양순환류와 기후의 상관관계 측면에서 아시아 계절풍 변화와 장단기 기후변화 특징 연구 및 예측 등이다. 이러한 연구 목표를 가지고 중국 해양연구소는 다양한 국제연구 협력을 추진 중이며, 이 중 하나가 북서태평양순환실험(NPOCE)이다(Hu et al. 2011).

국제연구프로그램

인도네시아 통과류(ITF)의 변동성에 관한 관심이 높아져 ‘북서태평양순환실험(NPOCE)’, ‘남서태평양순환기후실험(SPICE)’, 그리고 ‘태평양기원수탐사(PACSWIN)’라는 국제연구프로그램 들이 현재 진행되고 있다(Fig. 1).

NPOCE(Northwestern Pacific Ocean Circulation and Climate Experiment, 북서태평양 해양순환기후실험) 프로그램은 CLIVAR(Climate Variability and Predictability)에서 공인된 국제협력연구 프로그램이다. 관측, 모델, 북서태평양의 역학의 이해 등을 통하여 해양순환이 국지역과 글로벌 기후를 조절하는 해양의 역할을 파악하기 위하여 서안경계류에 의한 ENSO의 발달과 쇠퇴 과정, 난수품의 전개과정, ITF 역학, 열대와 열대 외해와의 관계 등을 연구 주제로 하고 있다.

PACSWIN(태평양기원수 탐사) 프로그램은 인도양과 태평양을 잇는 해역에 대하여 향후 10년 이상의 국제협력 해양기후 프로그램으로서 인도네시아해와 태평양 입구해역, 인도양 출구해역, 연해 등에 관측을 집중하고 있다.

SPICE(남태평양 해양순환 및 기후실험) 프로그램은 동태평양과 적도의 관입대(subduction zone)와 관련된 수온 약층, 10년 주기 해류순환의 증대, 태즈만 해협 유출(Tasman Outflow)과 관련된 장기적 영향, 대류·강수·바람의 수렴이 강하게 발생하는 남태평양수렴대, 대기와 해양 사이의 플럭스 규명을 통한 계절예측 등을 연구하였다.

INSTANT(International Nusantara Stratification And Transport) 프로그램은 주요 인도네시아 요충지역에 해당하는 해협의 해저부터 표면까지 직접 3년간 유속과 수온·염분을 현장 관측하였다. 관측을 통하여 질량, 열, 염분 등의 인도네시아 해역에 대한 유출입량을 측정하였다. 이 INSTANT 관측은 해양-대기 시스템의 주요 부분인 ITF에 대한 연구의 기회를 제공하였다.

OKMC(Origins of the Kuroshio and Mindanao currents) 프로그램은 쿠로시오와 민다나오 해류의 근원에 대한 기초 지식을 발전시키기 위하여 관측, 이론과 모형 등이 결

합된 것이다. 해류 및 수괴의 정량화와 해류 분지 해역에 대한 역학적 이해 증진을 위하여 북적도해류, 쿠로시오, 민다나오해류를 정량적으로 연구하고 해류의 라그랑지안 구조를 확립하는 것이 목표이다.

국내외 연구 동향에 의한 SWOT 분석

열대 대양간 해수 순환 연구 프로그램의 목적 달성 가능성을 가늠하고, 전략 수립의 기초 자료를 얻기 위한 SWOT 분석을 수행하였다. SWOT 분석은 외부요인과 내부요인에 관해 수집된 KIOST 발전전략, 국내외 연구 동향 등의 정보를 가지고 강점(strength), 약점(weakness), 기회(opportunity), 그리고 위협(threat) 요인을 규정하여 분석하고, 이를 토대로 TIPEX 프로그램의 전략을 제시하였다(Table 1).

SWOT 분석에서 가장 두드러지는 우리 해양과학기술원의 강점은 KIOST의 글로벌 연구 기관으로써의 성장 비전, 대형연구선 건조, 그리고 인도네시아 해양연구센터의 구축이기 때문에 이를 활용한 연구 추진 및 전략 수립이 요구된다. 약점은 타국 EEZ내에서 해양탐사를 수행하는 문제이다. 약점을 극복하기 위하여 인도네시아와 다양한 연구 협력이 필요하고, TIPEX 프로그램의 국제적 성공을 위하여 전지구적 기후 변화 이슈에 대응하는 프로그램에 본 프로그램이 초기에 등록되어야 한다. 이는 TIPEX 연구 프로그램을 국제 사회에서 태평양-인도양 관련 해양 연구 프로그램들 중에서 선도적인 국제프로그램으로 발전

시킬 수 있는 시발점이 된다.

3. TIPEX 프로그램 목표

우리나라의 해양과학기술 장기 로드맵인 ‘2020 해양과학기술 로드맵’은 전지구적 통합 해양관측정보시스템 구축을 통한 해양 이해 증대를 주요 목표중의 하나로 설정하고 있다. 이를 달성하기 위하여 전지구적 기후변화 예측 및 대응(전지구적 해양관측 정보를 통한 해양 기후 변화 이해도 증진)을 중점기술로 선정하였다(국토해양부 2012). 또한 제 4회 과학기술 예측 조사 2012~2035(국가과학기술위원회 2012)의 미래 사회 전망은 지구온난화의 심화 및 이상기후현상 증가에 의한 기후변화 및 환경문제가 심화되어 지구평균온도의 지속적인 상승, 대규모 자연재해 발생 빈도 증가, 극지의 빙하 감소/해안선 상승 및 식생대 변화 등을 예측하였다. 미래사회는 과학기술적 해결이 가능한 기후변화 및 자연재해 대응시스템에 대한 수요 증가를 전망하였다. 우리나라는 해양과학기술 분야의 과학자들이 전지구적 해양관측 프로그램에 일부 참여를 하고 있으나, 우리나라가 주도적으로 수행하는 전지구 해양환경 관측 프로그램은 전무하다. 전지구적 기후변동을 이해하기 위하여 국제 사회는 우리나라의 경제 규모에 맞는 참여를 요구하고 있다. 또한 기후변동 및 해양과학분야의 기술선진국으로 진입하기 위하여 국가적 위상에 걸 맞는 국제적인 연구 프로그램의 개발이 시급하다.

Table 1. Research strategies of the TIPEX by SWOT analysis

	Internal Competency	Strength	Weakness
		KIOST's intention for project promotion Research capability Construction plan of the joint ocean research center in Indonesia Large R/V construction	Shortage of the professional manpower Insufficiency of the oceanic R/V Great research cost Absence of previous researches relevant to ITF Distant research region from Korea
External Environment			
Opportunity		SO strategy	WO strategy
Increasing needs on climate change response		Strengthening climate research capability	Attract outstanding work force, and manpower training
Improvement of the climate prediction capability		Activate the Indonesia ocean research center	Using Indonesia R/V
Improvement of the status of state		Practical using of the large R/V	National strategic investment of the research funds
Extension of the international cooperations		Construction of the global research network	Strengthening international research cooperation
Increase of the MOU related research		Internationalization of the KIOST	Cooperation with the research agencies in Indonesia
Threat		ST strategy	WT strategy
Competition with advanced countries		Development of the global research programs	Training of specialized manpower
Indonesian EEZ of research region		Improving national status by the transfer of technology	Expanding international cooperations with Indonesia
Prohibiting to bring foreign bio-samples into Korea		Research capability of the joint research center	Practical use of the Indonesia ocean research center
Similarity with other researches		Research on the long-term variation of marine ecology	A lot of research related with oceanic climate change
Growing possibility to international program		Cooperate international organizations and programs	Registering the ocean monitoring system as an international program

Fig. 4. Road map of research development on the TIPEX

TIPEX 프로그램의 연구 목적은 우리나라 기후변화에 큰 영향을 주는 엘니뇨, 난수풀, 인도양쌍극모드, 몬순 등의 해양/대기 변화 예측에 필수적인 태평양-인도양의 열대해양변화 감시이다. 주요 연구주제는 1) 서태평양-인도네시아해-동인도양 해수교환과 혼합 관측모니터링으로부터 해수수송량 변동 정량화와 기후변화 예측자료 구축, 2) 대양간 해수순환 변동에 의한 엘니뇨/난수풀/인도양쌍극모드 등의 대규모 해양-대기 현상 변동성 기반 연구를 통한 우리나라 주변해 장기예측 모델 정확도 향상 도모, 3) 전지구 기후변화 조건에서 열대 해양생태계의 종다양성, 시공간적 변화, 생태계의 기능과 건강성 연구를 통한 열대해양생물의 시료 확보 및 유전자 정보 분석으로부터 신물질, 의약품 생물재료 확보와 미래해양산업 창출 연계 연구, 4) 전지구적 기후변화 대응을 위한 열대 해양-대기 순환연구의 국제공동 대양관측망(인도양 RAMA, 태평양 TAO-Triton) 참여를 통한 글로벌 기후변화 선도 등이다. 이에 따른 연구개발 기술 로드맵을 Fig. 4에 상세히 제시하였다.

4. TIPEX 주요 연구 내용

태평양-인도양 해양 순환 모니터링

태평양과 인도양을 연결하는 인도네시아 통과류는 태평양과 인도양 사이의 에너지와 물질을 수송시키는 중요한 역할을 한다. 또한, 해양과 대기, 해양과 육지 사이의 상호

작용에도 배경이 되어 태풍, 몬순, MJO, ENSO 및 IOD 등 시공간적 크기가 다양한 현상들을 조절하는 해역이다 (Gordon et al. 2010). 인도네시아 Makassar 해협에서 관측된 통과류는 1996년 12월부터 1997년 7월 시기에 표층이 아닌 약 15°C의 수온이 나타나는 수심 약 300 m에서 최대유속이 관측되었다(Gordon et al. 2003). ITF의 강도는 몬순전이 시기에 최소가 되는 계절변동을 보이고 (Gordon et al. 2008), 엘니뇨 시기에 약화되고 라니냐 시기에 강화된다(Gordon et al. 2010). Makassar 해협 이외에서 대양간 해수교환량 시계열 자료의 부족은 동아시아 기후연구 등에 제약이 되고 있다. TIPEX 프로그램에서는 첨단 장비를 투입하여(Fig. 5) 서안경계류와 인도네시아 통과류의 변동성을 파악하기 위한 자료를 획득하는 것이 중요한 목표 중 하나이다. 이를 위하여 태평양-인도양 해양 순환 모니터링 계획을 수립하였다(Fig. 6). 초기 5년의 1단계에서 ITF 주요 유입 해역인 Sulawesi 해와 Halmahera 해를 중심으로 해양관측을 집중 수행하고, 이후 2단계는 관측해역을 남중국해로 확장하여 인도네시아 내해로 해수 유입이 발생하는 주요 해역을 대상으로 해저면고정 유속계(TRBM)를 설치 운용할 예정이다. 해양순환 모니터링 연구에서는 다음의 항목을 세부연구 목표로 선정하였다.

- 대양기후현상의 포괄적 이해를 위한 대양간 해수 교환량을 장기 계류 관측점 구축을 통하여 연속 관측하여 기후변화 예측 정확도의 향상을 위한 장기 자료 구축
- TIPEX 연구 해역내의 내부파에 의한 해양혼합 관측을

Fig. 5. Schematic diagram of research equipments utilized in observations of ocean circulation and hydrographic conditions in the tropical Pacific-India Ocean

Fig. 6. Map of survey plan for the ocean circulation and the hydrographic conditions in the tropical Pacific-India Ocean. Four thick lines represent mooring lines for seawater transport in the ITF gateway region

위한 관측 시스템(PIES) 구축 및 관측자료를 활용하여 수치모형에 필요한 최적의 해양혼합 모수화 개발

- 무인 자동 관측 기기인 해양 글라이더(Glider) 및 표층 뜰개를 활용하여 TIPEX 지역의 열염순환을 장기 반복 관측하고, 관측 자료 분석을 통한 해수순환 모델 적합성 검정체계를 구축하며, 생태 환경을 감시하는데 중요한 요소인 산소, 탄소, 그리고 클로로필 분포를 지속적으로 측정하고 그 분포에 영향을 주는 해양 혼합 기작을 살펴보기 위한 확산계수를 측정함으로써 서태평양 해역의 생태환경 종합적 이해

태평양-인도양 해양 순환 모델 및 미래 전망

인도네시아 다도해 지역은 태평양과 인도양을 연결하는 해양으로서 전지구적 해양순환을 이어주는 매우 중요한 해역이다(Broecker 1991). 이곳은 중소규모 섬들과 해협들이 존재하여(Arruda and Nof 2003) 순환모형 모사 결과의 정량적 정확도를 위하여 해역의 특성상 대양간 해수교환을 고려할 수 있는 모형 범위의 설정이 필요하다(Masumoto et al. 2004). 인도네시아 다도해지역과 적도서태평양지역의 해양학적 상관관계는 북적도해류와 쿠로시오의 변동에도 상호 영향을 미칠 것으로 충분히 예상되기 때문에 인도네시아 다도해-적도서태평양지역의 순환모형 연구는 향후 우리나라 주변해역의 해양기후 연구에도 매우 유용하게 활용될 수 있다. ITF 수송량은 기후 변동을 의미하는 것으로 알려져 있고, ENSO 변동과 상관성이 있는 것으로 알려져 있다(Gordon et al. 2010, Oppo and Rosenthal 2010). 또 인도네시아 다도해는 조석에 상대적으로 중요하며 이 조석에 의해 해수가 연직적으로 혼합되어 인도양으로 유출되고, 이와 같이 조정된 해수는 인도양의 쌍극모드(IOD)와 기후 변동에도 중요한 역할을 하게 된다. 인도네시아 통과류 자체가 미래기후변화에 반응하여 어떻게 변할지에 대해서는 많이 알려지진 바가 없기 때문에 이에 대한 연구를 위하여 다음의 같이 연구 주제를 선정하였다.

를 선정하였다.

- 인도네시아 다도해 지역을 중심으로 하는 광역순환모형을 수립하여 인도네시아 다도해 지역의 해양특성과 통과유량 및 변동을 정량적으로 모의
- 통과류 변동 역학을 태평양과 인도양의 해양 변동과 관계하여 규명하고, 관측자료의 자료 동화를 통한 인도네시아 통과류(ITF) 수송량 계절 및 경년 변동성 파악 및 미래변화 전망

태평양-인도양 해양 순환 해역 열대 생물 연구

대양간 해수교환이 이루어지는 인도네시아해에는 열대 산호 삼각지(Coral Triangle)가 존재하며(Fig. 7), 이곳의 면적은 인도양과 서태평양, 중앙태평양의 3%에 불과하지만 단위 면적당 해양생물 종다양성이 매우 높다(Briggs 2009; Veron et al. 2009). 따라서 열대 산호 삼각지는 생물·경제학적으로 가치가 높아 해양생물자원 및 미래해양산업에서 매우 중요하다. Coral Triangle 해역은 생물종진화의 중심지로서 알려져 있으며, 해양생물다양성에 지대한 영향을 줄 수 있는 인도네시아 통과류(ITF)가 존재한다. 인도양-태평양과 Coral Triangle 해역에서 기후변화나 환경변화에 따른 생태계의 반응을 연구하기 위해서는 Coral Triangle에서 산호초의 생물다양성, 고유특성 및 진화에 대한 연구와 더불어 ITF에 의한 해양 생물의 분산 등에 관한 연구를 위하여 다음을 연구내용으로 하였다.

- 태평양-인도양 해양 생물다양성의 보고와 열대 태평양 해양생태계의 종다양성, 시공간적 변화, 생태계의 기능과 건강성을 연구하여 지구 환경 변화에 따른 해양 생태계 반응 이해
- 해양 생물의 종 목록 작성, 종 다양성 분석을 위한 종 판별기술 개발, 분자계통진화 및 유전적 다양성 연구, 유용 유전자 탐색, 산호초의 보호와 보존을 위한 첨단 분석 기술 개발

Fig. 7. Global biodiversity of zooxanthellate corals. Colours indicate total species richness of the world's 141 coral biogeographic 'eco-regions' (from Fig. 3 by Veron et al. 2009)

태평양-인도양 해양 순환 해역 생지화학 특성 연구

1980년대부터 전세계는 WOCE, JGOFS, OACES, CLIVAR, GEOTRACES(Fig. 8) 등과 같은 다양한 국제공동연구프로그램을 개발하여 미량원소, 방사능 동위원소 등 지화학 추적자의 분포를 통하여 대양의 열염분 순환, 지구 기후변화와 관련된 해양의 역할, 대기 중으로 방출된 이산화탄소의 저장 능력 등을 연구해 오고 있다. 또한, 인도네시아 산호초로부터 획득된 ^3H 와 ^{14}C 자료를 이용하여 ITF의 기원은 태평양 북적도 해류(NEC)이며, 인도네시아를 통과하는데 걸리는 시간은 약 5-6년임을 규명하였다(Moore et al. 1997; Leboucher et al. 2004). 산호에서의 Mg/Ca, Sr/Ca, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 비 등의 자료로부터 표층수온, 강수량의 변화를 추정하기 위한 연구들이 있었다(Watanabe et al. 2001; Timm et al. 2005; Cahyarini et al. 2008; Mitsuguchi et al. 2008; Chiang et al. 2010). 따라서, 인도네시아해의 지화학 추적자를 활용한 기후변환 연구를 주요 주제를 다음과 같이 선정하였다.

- 지화학 추적자를 이용한 태평양-인도양 통과류의 변동성 규명 및 태평양-인도양 해수 순환 해역의 물질 플럭스 연구
- 전지구 탄소 순환에서 인도네시아 통과류 해역의 이산화탄소 교환량 산정 및 역할 규명

기후 변동 상관성 연구

태평양과 인도양을 연결하는 인도네시아 통과류 및 인도양 동부 해역의 해양순환 기작 및 변동성 이해는 동아시아 기후 변화 연구에 중요한 변수이다. 이에 관련된 자료 확보와 변동 특성 이해는 기후변화와 IOD, MJO,

Monsoon 및 ENSO 등 해양/대기의 장기 변동 특성 기작에 대한 실마리를 제공할 것이며 궁극적으로 기후변화 예측의 신뢰도 향상에 기여할 것이다.

인도양의 상층 해수온도의 변동성은 엘니뇨와 더불어 해들리 순환 및 워커 순환을 변화시켜 전세계적인 영향을 미치므로 인도양 변동성에 대한 역학 이해는 전지구시스템모형 개선을 위한 근거가 될 수 있다. 따라서 기후변동성에 대한 체계적인 예측 정보를 제공해줌과 동시에 대응 전략을 제시해줄 수 있는 다음의 내용을 연구 주제로 선정하였다.

- 태평양-인도양 해양 순환 및 해양 변동이 동아시아 기후에 미치는 영향을 규명하기 위한 열대 온난역 변동 역학 및 중위도 기후 관련성 연구, 열대 온난역 변동의 모델링 및 예측성 연구
- IOD(Indian Ocean dipole)와 다른 기후 변동성과의 관련성 이해를 위한 IOD 모드의 변화 이해 및 계절예측 선행인자로서의 IOD 모드의 역할 규명을 통한 IOD 모드가 북서태평양 지역 변동성에 미치는 영향 규명

태평양-인도양 해양 순환 연구를 위한 국제협력

TIPEX 프로그램의 해양탐사는 인도네시아의 ITF 해역에서 이루어지기 때문에 인도네시아를 포함하는 주변국들과의 국제연구 협력 추진이 반드시 필요하다(Fig. 9). 인도네시아와의 국제협력은 인도네시아 연구선 활용, 해양생물 샘플의 국내 반입을 위한 협력, 인도네시아 내에 공동연구센터 설립을 위한 기반 구축 등을 증진시킨다. TIPEX 프로그램은 전세계적으로 현재 진행중인 ITF 연구를 위한 CLIVAR ITF 테스크 팀의 논의 단계부터 주도적으로 참

Fig. 8. Map of the ongoing and proposed Asian GEOTRACES cruises (SCOR 2011). The red line cruises are or will be carried out by Japan; the white lines by China, the pink lines by Taiwan; the green lines by India

Fig. 9. Planning diagram for the international cooperation through the TIPEX program

여하여 대양간 해수교환 연구를 선도할 수 있는 연구 프로그램으로 국제협력을 추진하여야 한다. TIPEX 프로그램은 국제협력을 통하여 기후변화와 관련한 미국 NOAA와 양자 협력 연구, 일본 JAMSTEC의 열대 태평양에서 운용하는 계류관측망(TRITON) 기술 노하우를 습득하여 인도네시아해와 인도양의 해양관측망 구축을 위한 국제공동연구에 참여하여야 한다.

5. TIPEX 프로그램의 필요성 및 기대성과

TIPEX 프로그램의 필요성

최근 기후변화가 진행되면서 북서태평양의 대류 활동이 강해지면서 서태평양이 한반도의 기후에 직접적인 영향을 미치고 있다. 서태평양 및 동인도양에 대한 모니터링(해류 순환, 해수면 온도, 대류활동) 체계를 확보하기 위한 지속적인 관측망을 구축하고, 우리나라 주변에서 발생하고 있는 현재의 기후변화를 이해하고 미래의 기후를 예측하기 위한 대양(인도양-태평양) 변동에 대한 다양한 규모의 장기관측과 모델링 사이에 유기적인 연계 연구가 필요하다. 전지구적 기후변화에 따른 대응전략을 수립하기 위하여 다양한 분야에 대한 기후변화 영향의 정확한 평가가 필요하고, 미래 기후변화의 정확한 예측을 위하여 대기대순환, 해양대순환, 해양 탄소 순환의 상호작용을 독자적 통합 기

후예측 모델에 해양관측 자료를 동화하여 예측 모델의 불확실성을 줄이기 위한 노력을 하여야 한다.

미래이슈 관련 미래기술의 미래사회에서의 중요도는 지구온난화의 심화 및 이상기후현상의 증가, 환경오염의 증가 등은 공익적 중요도가 4.5점으로 가장 높게 나타났으며(국가과학기술위원회 2012), 각 이슈별 관련 미래기술 중 정부중점투자기술에 포함된 비율을 보면, 지구온난화의 심화 및 이상기후현상 증가 관련 미래기술 중 25.4%가 정부중점투자기술에 포함되어 가장 높았다(국가과학기술위원회 2012). 전지구적 기후변화 대응을 위한 해양 관측·예측과 해양생물자원 확보를 위한 연구는 투자 규모가 크고 연구개발 결과가 해양과학 전반 및 사회에 영향을 미치기 때문에 사회적 공공성이 매우 높다. 따라서 경제적인 논리보다는 국가 전략적 관점에서 열대 태평양-인도양의 대양간 순환 변동성 연구 프로그램을 추진할 필요가 있다.

TIPEX 프로그램의 기대성과

TIPEX 프로그램은 태평양-인도양을 포함하는 인도네시아 동과류 해역을 중심으로 적도 및 열대역의 해양연구를 위한 국제 기술협력 네트워크를 구축하여 우리나라의 글로벌 해양과학조사 활성을 위한 선도 기반 구축에 기여할 수 있다. TIPEX에서 획득된 자료들은 전지구적 기후변동

Fig. 10. The R&D core technologies to be developed through the TIPEX and the expectation outcomes

예측을 위하여 우리나라에서 사용하고 있는 단기 기상 모델, 기후 예측 모델, 해양-대기 통합 예측 모델 등과 연계되어 미래 예측성 향상을 위한 해양관측 자료를 제공함으로써 미래 기후 변동 예측의 불확실성 제거에 활용될 수 있다(Fig. 10).

우리나라는 열대 산호 삼각지의 해양생물자원이 풍부하고 종다양성이 높은 주변 국가들과 협력체계를 구축하고, 열대 생태계 탐사를 위한 첨단 해양탐사 인프라를 활용함으로써 신기능을 가진 해양생물자원을 확보할 수 있다. 또한, 우리나라는 주변국간의 기후변화, 해양자원 등에 대한 공조 및 전지구적 기후변화 관련하여 미국, 중국, 일본 등과의 국제협력연구를 통한 국제적 위상을 강화할 수 있다.

6. 결 론

전지구적 기후변화가 우리나라의 해양 및 기후에 미치는 근본적인 이해와 거시적 원인 규명을 통하여 지구온난화와 기상이변에 대한 우리나라의 장기적인 대책 수립이 필요하다. 우리나라의 기후에 영향을 미치는 직접적인 요인은 크게 북극해와 시베리아 고기압에 연계된 극진동, 티벳고원의 기압변동성, 그리고 태평양-인도양 열대 해역의 변동성이 있다. 인도네시아 통과류 주변에서 대양간의 물질(열, 해수, 생지화학 인자) 교환이 이루어지는 현상을 관측하고 재현하는 것은 거시적 관점에서 기후예측 정밀도의 향상에 큰 기여를 한다. 따라서 ENSO, IOD, 몬순, 태풍 등 해양/대기 현상의 변화 예측에 필수적인 열대 태평양-인도양의 대양간 순환 변동성에 대한 분석과 이해가

필요하다.

국내외 해양 정책 및 연구동향에 의한 한국해양과학기술원의 내부능력 및 외부환경에 의한 SWOT 분석 결과는 글로벌 연구 기관으로써의 성장 비전, 대형연구선 건조, 그리고 인도네시아 해양연구센터 구축을 강점으로 활용한 연구 추진 및 전략 수립이 요구되며, 타국 EEZ내에서 해양탐사를 수행하는 어려움을 극복하기 위한 방안으로 인도네시아 및 주변국과의 다양한 연구 협력이 필요하다. 이 국제협력 강화를 통하여 전지구적 기후 변화 이슈에 대응하기 위한 선진국의 노력에 우리나라가 기여하고, 국가적 위상에 걸 맞는 국제적인 연구 프로그램을 개발할 수 있다.

미래사회에서 요구하는 과학적 요구를 해결하기 위하여 전략적 연구로 우리나라의 해양, 기상, 기후에 영향을 주는 태평양-인도양 사이 적도 해양변화 감시 및 변동성 연구를 위하여 “태평양-인도양 해양순환 연구(TIPEX : Tropical Indo-Pacific water transport and ecosystem monitoring Experiment)” 프로그램을 계획하였다(한국해양과학기술원 2012b). TIPEX 프로그램의 연구 목적을 달성하기 위하여 최소한 10년 이상의 장기 연구가 요구되며, 세부적으로 연구 기간을 중기(1단계-5년)와 장기(2단계-5년)로 구분하여 전략적으로 프로그램의 연구 목표와 내용을 수립하고 추진하여야 한다. TIPEX 프로그램 내에서 반드시 수행이 필요한 주요 연구 내용은 다음과 같다.

- 서태평양과 동인도양 해황 및 해수 수송량 관측: 대양 기후현상의 포괄적 이해를 위한 대양간 해수 교환량을 첨단관측 기기(ADCP, PIES, Glider 등)를 활용하여

관측하고, 기후변화 예측 정확도 향상을 위한 해양 기후 자료 구축

- 대양간 해수 교환량 모델 및 예측: 태평양-인도양의 대양간 해수 교환량 변동을 정량적으로 모사(규명)하여 인도네시아 통과류(ITF) 수송량의 계절 및 경년 변동성을 파악하고, 지구온난화에 따른 ITF 수송량 미래 변화 예측
- 기후변화에 따른 열대 생물상 변화와 생지화학적 인자의 상관성 연구: 태평양-인도양 해양 생물다양성의 보고(Biodiversity Hotspot)와 열대 태평양 해양생태계의 종다양성, 시공간적 변화, 생태계의 기능과 건강성을 연구하여 미래 해양생물 자원을 위한 자료 확보 및 지구 환경 변화에 따른 해양생태계의 반응 이해. 화학 추적자를 이용한 태평양-인도양 통과류의 변동성 규명 및 태평양-인도양 해수 순환 해역의 물질 플럭스 연구
- ITF/Warm-pool/ENSO/IOD 등 대규모 해양-대기 현상 변동 기작 연구: 태평양-인도양 해양 순환 및 해양 변동이 동아시아 기후에 미치는 영향을 규명하고, IOD (Indian Ocean dipole) 모드 변동성 이해를 위한 분석 및 모델링 수립, IOD와 다른 기후 변동성과의 관련성 이해
- 전지구적 기후변화 대응을 위한 국제 프로그램 도약: TIPEX 프로그램을 국제프로그램으로 발전시키기 위하여 국제 대양관측망(TAO-TRITON, RAMA, OceanSITES) 참여 및 태평양-인도양 주변국 및 선진국과의 국제협력 강화를 통한 기후변화 이해를 위한 국제사회 노력에 기여

TIPEX 프로그램 개발을 통하여 적도 열대역 글로벌 기후변동 연구를 위한 해양과학조사 기반 구축·운영, 기후변동에 영향을 미치는 해양-대기 현상 연구, 장기 기후 예측성 향상, 해양생물의 연구시료 확보·개발로 미래 해양 자원의 선행적 확보, 전지구적 해양과학조사를 통한 국제적 이슈 대응 및 위상강화 등의 성과를 기대할 수 있다. TIPEX 프로그램은 미래사회 요구에 대응하기 위한 공공성이 매우 강하고 막대한 연구비 투자가 요구되기 때문에 전략적으로 정부 지원으로 연구가 수립되고 수행될 필요가 있다.

사 사

본 연구는 한국해양과학기술원의 “2012년도 해양 융·복합 기획연구(PE98798)”와 “북서태평양의 해양환경 변화가 한반도 주변에 미치는 영향 연구 (PE99162)” 사업의 지원에 의해 수행되었으며, 이 기획에 참여해주신 많은 참여자들에게 감사 드립니다.

참고문헌

- 국가과학기술위원회 (2012) 제 4회 과학기술예측조사 2012-2035. 한국과학기술기획평가원, 서울, 265 p
- 국립환경과학원 (2011) 한국 기후변화 평가보고서(백서) 발간 (II). 한국기상학회 · 한국환경영향평가학회, 서울, 802 p
- 교육과학기술부 (2012) 통합 기후 예측 시스템을 위한 기후 예측 시뮬레이터 개발 및 대양 관측. 한국해양과학기술원, BSPN 65210-10149-1, 454 p
- 국토해양부 (2012) 2020 해양과학기술 로드맵. 한국해양과학기술진흥원, 56 p
- 김경욱, 장정규, 안중배 (2005) 2003년 여름철 한반도 이상기후와 동아시아 지역 대기 순환의 특성. 한국기상학회지 41(4):519-532
- 이현수, 전종갑, 강인식, 문병권 (2007) 2006/2007 겨울철 한반도 이상 기후와 관련된 동아시아 지역 대기 순환의 특성. 한국지구과학회지 28(3):374-387
- 한국해양과학기술원 (2012a) 북서태평양의 해양환경 변화가 한반도 주변해에 미치는 영향 연구. 한국해양과학기술원, BSPE98563-10040-1, 431 p
- 한국해양과학기술원 (2012b) 태평양-인도양 해양 순환 연구 프로그램 (TIPEX) 기획. 한국해양과학기술원, BSPE98797-10158-7, 177 p
- 환경부 (2008) 한반도 및 동아시아 기후변화 추세분석 및 원인 규명. 연세대학교 산학협력단, 서울, 258 p
- Arruda WZ, Nof D (2003) The Mindanao and Halmahera eddies - twin eddies induced by nonlinearities. J Phys Oceanogr 33:2815-2830
- Briggs JC (2009) Diversity, endemism and evolution in the Coral Triangle. J Biogeogr 36:2008-2010
- Broecker WS (1991) The great ocean conveyor. Oceanography 4(2):79-89
- Cahyarinia SY, Pfeiffer M, Timm O, Dulloo WC, Schonberg DG (2008) Reconstructing seawater d18O from paired coral d18O and Sr/Ca ratios: Methods, error analysis and problems, with examples from Tahiti (French Polynesia) and Timor (Indonesia). Geochim Cosmochim Acta 72(12): 2841-2853
- Chiang HW, Chen YG, Fan TY, Shen CC (2010) Change of the ENSO-related $\delta^{18}\text{O}$ -SST correlation from coral skeletons in northern South China Sea: A possible influence from the Kuroshio Current. J Asian Earth Sci 39(6):684-691
- Chong JC, Sprintal J, Hautala S, Morawitz WL, Bray NA, Pandoe W (2000) Shallow throughflow variability in the outflow straits of Indonesia. Geophys Res Lett 27(1): 125-128
- Gordon AL (2005) Oceanography of the Indonesian seas and their throughflow. Oceanography 18(4):14-27

- Gordon AL, Sprintall J, Van Aken HM, Susanto D, Wijffels S, Molcard R, Ffield A, Pranowo W, Wirasantosa S (2010) The Indonesian throughflow during 2004-2006 as observed by the INSTANT program. *Dynam Atmos Oceans* **50**(2):115-128
- Gordon AL, Susanto RD, Vranes K (2003) Cool Indonesian throughflow as a consequence of restricted surface layer flow. *Nature* **425**:21-25. doi:10.1038/nature02013
- Gordon AL, Susanto RD, Ffield A, Huber BA, Pranowo W, Wirasantosa S (2008) Makassar Strait throughflow, 2004 to 2006. *Geophys Res Lett* **35**:L24605. doi:10.1029/2008GL036372
- Gordon AL, Susanto D, Huber BA, Sulisty B, Supangat A (2010) Seven Years of measuring the Makassar Strait Throughflow, the primary component of the Indonesian Throughflow. In: Hal J, Harrison DE, Stammer D (Eds) *Proceedings of the "OceanObs '09: Sustained Ocean Observations and Information for Society" Conference (Vol. 1)* Venice, Italy, 21-25 September 2009
- Hu D, Wang F, Wu L, Chen D, Liu Q, Tian J, Yuan D (2011) Northwestern Pacific Ocean circulation and climate experiment - Science/Implementation plan. China Ocean Press, Beijing, 100 p
- IOCAS (2013) Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences. <http://english.qdio.cas.cn/> Accessed 16 Sept 2013
- JAMSTEC (2013) Research institute for global change. <http://www.jamstec.go.jp/rigc/e/> Accessed 16 Sept 2013
- Kim DW, Byun HR, Lee YI (2005) The long-term changes of Siberian High and winter climate over the northern hemisphere. *J Korean Meteorol Soc* **41**:275-283
- Kim E, Jeon DC, Hadikusumah (2013a) The westward intrusion of south Pacific water at the western tip of the New Guinea island. *Acta Oceanol Sin* **32**(1):24-31
- Kim E, Jeon DC, Jang CJ, Park JH (2013b) Typhoon Rammasun-induced near-inertial oscillations observed in the tropical northwestern Pacific Ocean. *Terr Atmos Ocean Sci* **24**(4II):761-772. doi:10.3319/TAO.2013.03.28.01(Oc)
- Kripalani RH, Oh JH, Kang JH, Sabade SS, Kulkarni A (2005) Extreme monsoons over East Asia: Possible role of Indian Ocean Zonal Mode. *Theor Appl Climatol* **82**:81-94. doi:10.1007/s00704-004-0114-z
- Leboucher V, Jean-Baptiste P, Fourre E, Arnold M, Fieus M (2004) Ocean radiocarbon and tritium on a transect between Australia and Bali (Eastern Indian Ocean). *Radiocarbon* **46**(2):567-681
- Masumoto Y, Sasaki H, Kagimoto T, Komori N, Ishida A, Sasai Y, Miyama T, Motoi T, Mitsudera H, Takahashi K, Sakuma H, Yamagata T (2004) A fifty-year eddy-resolving simulation of the world ocean - preliminary outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator). *J Earth Simul* **1**:35-56
- Mitsuguchi T, Dang PX, Kitagawa H, Uchida T, Shibata Y (2008) Coral Sr/Ca and Mg/Ca records in Con Dao Island off the Mekong Delta: Assessment of their potential for monitoring ENSO and East Asian monsoon. *Global Planet Change* **63**(4):341-352
- Moore MD, Schrag DP, Kashgarian M (1997) Coral radiocarbon constraints on the source of the Indonesian throughflow. *J Geophys Res* **102**(C6):12359-12365
- Oppo DW, Rosenthal Y (2010) The great Indo-Pacific communicator. *Science* **328**(5985):1492-1494. doi:10.1126/science.1187273
- SCOR (2011) SCOR newsletter. <http://www.scor-int.org> Accessed 22 July 2013
- Sprintall J (2013) CLIVAR Indonesian Throughflow - Task team: Recent activities and future progress. http://www.clivar.org/sites/default/files/SSG20/Presentations/Wednesday/22.2_b_OceanBasinActivities_ITF_Lee.pdf. Accessed 22 July 2013
- Timm O, Pfeiffer M, Dullo WC (2005) Nonstationary ENSO-precipitation teleconnection over the equatorial Indian Ocean documented in a coral from the Chagos Archipelago. *Geophys Res Lett* **32**:L02701. doi:10.1029/2004GL021738
- Veroni JEN, Devantier LM, Turak E, Green AL, Kininmonth S, Smith MS, Peterson N (2009) Delineating the Coral Triangle. *Galaxea J Coral Reef Studies* **11**:91-100
- Watanabe T, Winter A, Oba T (2001) Seasonal changes in sea surface temperature and salinity during the Little Ice Age in the Caribbean Sea deduced from Mg/Ca and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios in corals. *Mar Geol* **173**(1-4):21-35
- Yamagata T, Behera SK, Luo JJ, Masson S, Jury MT, Rao SA (2013) Coupled Ocean-Atmosphere Variability in the Tropical Indian Ocean. In: Wang C, Xie SP, and Carton JA (eds) *Earth's Climate*. American Geophysical Union, Washington, pp 189-211. doi:10.1029/147GM12
- Yeh SW, Kug JS, Dewitte B, Kwon MH, Kirtman BP, Jin FF (2009) El Niño in a changing climate. *Nature* **461**(24):511-514. doi:10.1038/nature08546
- Yoon JH, Yeh SW, Kim YH, Kug JS, Min HS (2012) Understanding the responses of sea surface temperature to the two different types of El Niño in the western North Pacific. *Prog Oceanogr* **105**:81-89. doi:10.1016/j.pocean.2012.04.007

Received Aug. 13, 2013

Revised Sep. 10, 2013

Accepted Sep. 17, 2013