

学 位 論 文 題 名

Formation and seasonal spreading of water masses
in the Arabian Sea based on data analysis and modeling

(アラビア海における水塊形成と季節進行に関するデータ解析・モデル研究)

学位論文内容の要旨

The formation and seasonal spreading of two water masses, namely the Arabian Sea High-Salinity Water (ASHSW) and Persian Gulf Water (PGW), in the Arabian Sea is studied based on models and comprehensive set of observations.

Using a level 2 one-dimensional (vertical) turbulent closure model, the evolution of the ASHSW has been investigated. In summer, the wind-driven turbulent vertical mixing accounts for deep mixed layer depth (MLD) and cool sea surface temperature (SST). Instead, during winter, negative buoyancy flux due to the net heat loss from the ocean (-40 W m^{-2}) caused by the elevated evaporative cooling plays a major role in the formation of ASHSW and deep MLD, while kinetic-energy-driven vertical mixing is relatively weaker than summer monsoon. The atmospheric forcing that leads to the net-heat loss during winter is identified in a sensitivity test keeping the humidity high. The net-heat flux is of different sign in winter in the high-humidity run and there is no indication of ASHSW formation.

Using a level 2 three-dimensional (both horizontal and vertical) turbulent closure model, the seasonal variability in the spreading of ASHSW and processes affecting the upper-ocean salt balance in the Arabian Sea have been examined. There is seasonal variability in the distribution of ASHSW associated with monsoon circulation, concur with the observations. Estimation of the upper-ocean salt budget in the Arabian Sea shows a clear balance between the horizontal advection and evaporative freshwater loss in an annual mean. The horizontal advection dominates the seasonal variability in salt. The seasonal balance is clear, when the terms of the salt budget are averaged between 10°N and 2°N , and east of 62°E . Along these regions, the two major episodes of horizontal advection, during winter and summer, are both associated with the seasonal

reversal of the Arabian Sea circulation: southward spreading of ASHSW in summer and westward advection of fresher Bay of Bengal water in winter. North of 10°N and west of 62°E , evaporation dominates the seasonal variability in salinity and horizontal advection is found to be important for maintaining the annual mean salinity.

The characteristics of the subsurface salinity maximum associated with the PGW are used to quantify the spreading and mixing of PGW in the thermocline of the Arabian Sea based on a bimonthly climatology of temperature and salinity. Maps are presented of the distributions of depth, salinity, and geostrophic flow on $\sigma_{\theta} = 26.5$, which nearly coincides with the core of the PGW. After intense mixing in the Strait of Hormuz, the property fields suggest that warm ($>17^{\circ}\text{C}$) and high-salinity (>36.2 psu) PGW enters the Arabian Sea to form a subsurface salinity extremum between 200 and 300 m. We have found variability in the distribution of PGW in the Arabian Sea associated with monsoonal changes in the Arabian Sea circulation. During the winter monsoon, there is southward spreading of PGW along the western boundary. Lateral mixing with low-salinity water from the Bay of Bengal in the region south of 10°N and along the west coast of India during winter accounts for changes in the characteristics of PGW along these paths. Associated with the Findlater Jet during summer, the entire thermohaline structure is vertically displaced upward along the coasts of Somalia and Arabia. Ekman convergence in the central Arabian Sea accounts for deepening of the PGW. Either lateral or vertical mixing would cause changes in PGW properties in these regions. During this time, PGW spreads predominantly southward along the central Arabian Sea, as indicated by a tongue of high salinity.

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 池 田 元 美

副 査 教 授 若 土 正 暁

副 査 助 教 授 谷 本 陽 一

副 査 教 授 山 崎 孝 治

副 査 領 域 長 竹 内 謙 介

(地球観測フロンティア研究システム)

副 査 教 授 久 保 田 雅 久 (東海大学海洋学部)

学 位 論 文 題 名

Formation and seasonal spreading of water masses in the Arabian Sea based on data analysis and modeling

(アラビア海における水塊形成と季節進行に関するデータ解析・モデル研究)

インド洋北西部海域はアラビア海とよばれ、季節風の変動にともなって、非常にはっきりした海流変動が現れるところである。冬季にはアラビア海北部、さらにペルシャ湾、紅海で高密度水が形成され、アラビア海上層 700メートル深までの水塊構造に大きな影響を与えている。本論文では、アラビア海高塩分水については先行研究のレビューをおこない、ペルシャ湾水については既存データの解析を通じて、その拡散過程を示すことができた。両方とも冬季の冷却と蒸発がその形成に重要な働きをしていること、また季節風が作る海洋循環によって、南方に広がっていくことを示した。密度 26.5 の塩分極大によって表されるペルシャ湾水の分布を詳細に見ると、夏季にはアラビア海東部を南下し、西部では湧昇によって上昇する。冬季にはベンガル湾から低塩分水が侵入して、高塩分水の特徴を失う。これらの結果は、インド洋の水塊形成について、その季節変化を明確にし、将来の気候変動研究に貴重な知見をあたえるものとして高く評価される。

観測から定性的に形成と拡散が示された水塊のうち、本論文ではアラビア海高塩分水の形成と拡散を、数値モデルによって定量的に再現することに成功した。まず鉛直 1 次元モデルの拡散項を乱流モデルによって決定し、冬季の冷却と蒸発が水塊を形成する過程を示した。1 平方メートルあたり 40 ワットの熱量が奪われることによって、混合層が 100メートル深近くまで発達し、高塩分高密度水が形成される。湿度が高くなると蒸発が減り、高塩分水は形成されないことがわかった。いっぽう夏季にも混合層が発達するが、その成因は強烈な季節風による運動エネルギーのためである。

上記の 1 次元モデルに水平移流を加えた 3 次元モデルを開発した。水平速度はモデルで決

定される表層風成海流と、データに含まれる水平密度勾配にともなう地衡流成分からなっている。水温と塩分は3次元の移流・拡散を受ける。4月から14か月の期間で水温・塩分の変動を計算した。冬季のアラビア海高塩分水の形成、および季節変化する海洋循環による南方への拡散を再現した。特に塩分バランスに注目し、モデル解を解析したところ、以下のことがわかった。年平均のバランスについては、移流によって赤道海域とベンガル湾から低塩分水が供給され、アラビア海では蒸発によって淡水が奪われる。しかし季節変動については、北緯10度以南と10度以北の東経62度以東では移流によって塩分変動が起きている。すなわち、主な効果は夏季に東部海域でアラビア海高塩分水が広がり、西部海域に赤道低塩分水が侵入すること、また冬季にはベンガル湾から低塩分水が流れ込むことである。北緯10度以北の東経62度以西においてだけ、蒸発の変化する項が季節変動の主要因となる。

審査員一同は以上の研究成果を高く評価し、また研究者として研鑽を重ねており、その研究に対する態度も誠実かつ熱心であること、取得単位を満たしたことをあわせ、申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと判定した。