

# ベーリング海陸棚斜面域における渦場変動と その基礎生産量への影響

—衛星観測・船舶観測・海洋循環モデルによる統合的解析—

## 学位論文内容の要旨

### 【緒言】

北太平洋と北極海を結ぶ唯一の極域縁辺海であるベーリング海は、世界で最も生産力の高い漁場の一つである。この海は東部陸棚域(水深 200m 以浅)と西部海盆地(水深 3500m 以深)に分けられ、その間に約 1300km にも及ぶ陸棚斜面域が存在する。Bering Sea Green Belt と呼ばれるこの陸棚斜面域は、ベーリング海の中で年間基礎・二次生産量が最も高く、豊富な漁業資源・海鳥・海産哺乳類を支える重要な海域である。近年では、同海域を流れる境界流 Bering Slope Current(BSC, 平均流量 3.0~6.0Sv)に伴う直径 50~200km の中規模渦周辺で、高クロロフィル *a* (Chl-*a*) 濃度・スケトウダラ稚仔魚分布や海盆から陸棚への水塊輸送が観測されており、中規模渦の生物分布・陸棚への栄養塩/生物相輸送への影響が注目されている。また最近の海面高度計を用いた研究では、陸棚斜面域の渦場の経年変動が示されており、その生物生産への影響も関心を集めている。しかしながらベーリング海で行われてきた Process and Resources of Bering Sea shelf (PROBES, 1976~1981 年)や、Southeastern Bering Sea Carrying Capacity (SEBSCC, 1996~2002 年)に代表される研究プロジェクトは、主に陸棚域を対象にしてきた為、陸棚斜面域における渦や生物生産に関する知見は少なく、同海域における中規模渦の基礎・二次生産に対する影響や渦場経年変動の要因は解明されていない。そこで本研究では、衛星データ解析・船舶観測および海洋循環モデルによる渦再現実験により、ベーリング海陸棚斜面域における基礎生産変動に対する渦の役割と渦場変動要因を統合的に解明することを目的とする。

### 【資料と方法】

はじめに 1/3° グリッド週平均合成海面高度アノマリー(Sea Level Anomaly; SLA)画像・NOAA/AVHR pathfinder 9km メッシュ月平均水温画像・SeaWiFS 9km メッシュ月平均 Chl-*a* および光合成有効放射画像から、11 年平均月別 SLA、渦運動エネルギー(Eddy Kinetic Energy; EKE)画像・1992 年 1 月~2003 年 12 月までの季節別 EKE 標準偏差画像・1998 年 1 月~2003 年 12 月までの月平均有光層内積算基礎生産量画像を作成した。本研究ではこれらの衛星データセットを用いて、陸棚域・陸棚斜面域・

海盆域の Chl-*a*・基礎生産量の時間変動、陸棚斜面域における季節平均の渦場および春季～夏季の渦場変動と基礎生産量との関係について解析を行った。次に北海道大学水産学部附属練習船おしよろ丸により、2000年8月1日～8月2日に低気圧性渦断面観測、2001年7月25日～26日および、2002年8月8日～9日に高気圧性渦断面観測をそれぞれ行い、渦周辺の水塊構造(密度・流速分布)および栄養塩(硝酸塩+亜硝酸塩)・Chl-*a*濃度分布を調べた。渦の位置はコロラド大学海面高度データアーカイブホームページで公開されている SLA 画像から特定した。最後に、海洋循環モデル Estuarine, Coastal and Ocean Model with Semi-Implicit (ECOMSI)による渦再現実験から、渦形成要因および渦による陸棚—陸棚斜面間の海水交換について調べた。渦形成要因については、BSC と海底地形との距離、BSC の擾乱、風向の影響を感度解析から調べた。なお風向に関する感度解析では、予め NCEP/NCAR 再解析 2.5° グリッド風向風速データを用いて、1998年～2003年春季・夏季のベーリング海陸棚斜面域における平均風速を求め、これとほぼ同じ  $3\text{ms}^{-1}$  の風を渦再現海域に一樣に与えた。また陸棚—陸棚斜面間の海水交換については、海盆域の下層栄養塩・陸棚斜面域の高基礎生産量水塊を想定したトレーサー実験から解析を行った。

## [結果と考察]

### 1. 渦場変動と基礎生産量との関係

ベーリング海陸棚斜面域では、春季～夏季にかけて高気圧性渦が分布し、夏季に最も EKE が高くなる。また夏季の EKE 変動は、1999年の夏季に最も小さくなるが、2000年以降は増大傾向にあった。同海域における Chl-*a*濃度・基礎生産量は、初夏に陸棚域よりも高くなり、夏季の間も  $30.5\sim 48.5\text{gCm}^{-2}\text{year}^{-1}$  と比較的高い値を維持していた。そこで春季～夏季の EKE 標準偏差と基礎生産量との関係を調べると、夏季にのみ正の相関関係が見いだされた。この結果は、春季では海盆スケールのブルームが基礎生産量に寄与している一方で、夏季では高気圧性渦による渦場変動が、基礎生産量を左右することを示唆している。

### 2. 陸棚斜面域における渦形成要因

ECOMSI による感度解析の結果、BSC が陸棚斜面から 50km 以上沖合に流れており、かつ BSC に擾乱が与えられることによって、中規模渦が形成されることが明らかになった。1998年～2003年の季節別 EKE 標準偏差画像によると、高 EKE 標準偏差分布は、Amchitka Pass や Amukta Pass から陸棚斜面域にかけて分布しており、北太平洋水の流入が BSC とその起源である Aleutian North Slope Current(ANSC)に擾乱を与えていると考えられる。

### 3. 渦場に伴う陸棚・陸棚斜面域への栄養塩・炭素フラックス

ECOMSI によるトレーサー実験から、陸棚斜面域に中規模渦が形成された場合、陸棚斜面域・陸棚域への栄養塩フラックスは、渦が形成されない場合に比べて増加し、水深 200m 以浅へのフラックスの増加量は、炭素フラックスに換算して約 62% であった。従って、2000年以降の陸棚斜面域における EKE 増加は、陸棚域への栄

養塩・炭素フラックスの増加につながると考えられる。また渦により、陸棚斜面域下層に輸送された栄養塩は、低栄養塩濃度の表層へと拡散すると考えられ、これを利用して植物プランクトンが陸棚斜面域で増殖し、常に高い基礎生産量が維持されることが考えられる。

#### 4. 中規模渦による陸棚—陸棚斜面間の海水交換と Green Belt 海域への影響

陸棚斜面域における渦の分布・伝搬により、陸棚斜面域の高基礎生産量水塊は、約 100km 沖合の海盆地まで移流・拡散される。従って中規模渦の陸棚—陸棚斜面間の海水交換によって、陸棚斜面域の高基礎生産量水塊が形成されるとともに、この水塊が約 100km 沖合の海盆地へと移流・拡散されることで Green Belt 海域が維持される。

#### 5. 渦場経年変動の要因

ベーリング海への北太平洋水の流入量は、アリューシャン列島南側に形成される高気圧性の巨大渦の影響を受ける。この渦の形成・伝搬は El Niño 年/La Niña 年で異なり、その要因は ENSO イベントに伴う沿岸ケルビン波、もしくはアラスカ湾流の流量・擾乱の増大が挙げられる。この巨大渦による北太平洋水の流入量の増大は、ANSC と BSC の流量・擾乱増大、もしくは高温高塩分水の増加による陸棚斜面域の傾圧不安定の発生・密度流と BSC の関係による渦度の発生に寄与する。このようにベーリング海陸棚斜面域の渦場変動および夏季の基礎生産量は、ENSO イベントの影響を受けている可能性がある。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 齊 藤 誠 一  
副 査 教 授 三 浦 汀 介  
副 査 教 授 飯 田 浩 二  
副 査 助 教 授 米 田 國三郎  
副 査 教 授 池 田 元 美 (地球環境科学研究科)

## 学 位 論 文 題 名

### ベーリング海陸棚斜面域における渦場変動と その基礎生産量への影響

—衛星観測・船舶観測・海洋循環モデルによる統合的解析—

近年、衛星を用いた地球環境観測技術が進歩し、海洋の物質循環や汚染のモニタリングに応用可能な衛星リモートセンシングに関心が高まってきた。特に船舶で常時観測するのが困難な遠隔の外洋域で、このような観測技術を用いてその生産性やその健康度をモニターしていくことは極めて重要な課題である。現在までベーリング海における春季ブルームなどの生物生産過程および物理過程の時空間変動に関する研究は極めて少なく、従来の船舶観測に加え、広域を、瞬時に、繰り返し観測できる衛星による海色観測や海面高度観測が非常に有力な手段となっている。さらに、数値モデリング手法を加えることでその変動機構の理解が可能になる。

本研究で対象としたベーリング海は東部陸棚域(水深200m以浅)と西部海盆域(水深3500m以深)に分けられ、その間に約1300kmにも及ぶ陸棚斜面域が存在する。この陸棚斜面域は、ベーリング海の中で年間基礎生産・二次生産量が最も高く、Bering Sea Green Beltと呼ばれ、豊富な漁業資源・海鳥・海産哺乳類を支える重要な海域である。近年では、境界流であるBering Slope Current(BSC, 平均流量3.0~6.0SV)に伴う直径50~200kmの中規模渦周辺で、高クロロフィル $a$ 濃度・スケトウダラ稚仔魚分布や海盆から陸棚への水塊輸送が観測されており、中規模渦の生物分布・陸棚への栄養塩/生物相輸送への影響が注目されている。また最近の海面高度計を用いた研究では、陸棚斜面域の渦場の経年変動が示されており、その生物生産への影響も関心を集めている。しかしながらベーリング海で行われてきたProcess and Resources of Bering Sea shelf (PROBES, 1976~1981年)や、Southeastern Bering Sea Carrying Capacity (SEBSCC, 1996~2002年)に代表される研究プロジェクトは、主に陸棚域を対象にしてきた為、陸棚斜面域における渦や生物生産に関する知見は少なく、同海域における中規模渦の経年変動要因やその基礎生

産・二次生産への影響は解明されていない。

地球規模の気候・環境変化に対する植物プランクトン・基礎生産の地域的、時間的変動を明らかにしていくために、従来の船舶観測や、定点観測に加えて、衛星観測による長期的な時系列解析を行うことが重要である。さらに、その変動機構を理解し、将来的に予測するためには、数値モデルによる素過程の理解と要因の究明が不可欠である。

本研究は、従来の船舶観測に加えて、衛星観測および海洋循環モデルを用いて、陸棚斜面域における渦の発生要因と、渦による高基礎生産量維持メカニズムを統合的に解明した。さらにその結果を踏まえて、中規模現象を介した気候変動の基礎生産量変動へ与える影響を、海面気圧場の解析に基づいて考察したものである。

特に審査員一同が評価した点は以下の通りである。

1. マルチセンサーリモートセンシングを用いることで、1998年から2002年までの6年間にわたるベーリング海陸棚斜面域の渦場変動および基礎生産量分布の経年変動を明らかにし、夏季に渦場変動と基礎生産量との間に正の相関関係があることを明らかにした。
2. 中規模渦を船舶観測する際、準リアルタイムの海面高度画像を用い、的確に渦の位置を捉え、その水塊構造と栄養塩分布・クロロフィル *a* 濃度分布を明らかにした。
3. 海洋循環モデルによる渦再現実験により、陸棚斜面域においてベーリングスロープ流が擾乱をもち、陸棚域から約 50km 以上離れて流れているという条件が中規模渦形成の大きな要因であることを明らかにした。
4. トレーサー実験から中規模渦形成・伝搬に伴う海盆域から陸棚域への栄養塩輸送過程、および中規模渦による陸棚域から陸棚斜面域への高基礎生産量水塊の輸送過程を示し、陸棚斜面域における高基礎生産量海域維持メカニズムを明らかにした。
5. 気候変動に伴うアラスカ湾流の流量・擾乱の増加により、北太平洋の高温高塩分水のベーリング海への流入も増加し、結果的に陸棚斜面域で傾圧不安定になることが要因で渦場が形成されることを示唆した。

今後、衛星観測、船舶観測、海洋循環モデルを用いたこのような統合的な方法に、生態系モデルを加えた研究を推進すれば、年々変動も含んだ長期的な海洋の生物生産変動と地球環境変動との関係を同時に理解することが可能となる。

審査員一同は、本研究が、ベーリング海陸棚斜面域における中規模渦の基礎生産量分布への影響に関する統合的な知見を得たものと高く評価し、本論文が博士（水産科学）の学位を授与される資格のあるものと判定した。