

博士（水産科学） Michael Paul Yukio Seki

学 位 論 文 題 名

Physical characterization of and biological responses at large-and meso-scale oceanographic phenomena in the Subtropical North Pacific

（北太平洋亜熱帯海域における大・中規模スケールの海洋環境の物理特性
と、それに対する生物の応答）

学位論文内容の要旨

研究の背景：北太平洋亜熱帯海域は、変化の少ない単調な海洋環境と言われているが、大規模なフロント域の形成や中規模な水塊構造の動きなどによって基礎生産が生まれ、低次から高次生物への食物網を通じた栄養転換が起きている。このような大規模な境界を形成する海洋構造は、生物地理学的な海洋生物の生息境界や、全ての栄養段階の生物が集まる索餌・産卵海域として機能している。例えば、北太平洋亜熱帯フロント域では、1-5月の間は水温・塩分フロントが強く、表層の海洋構造が多様化する。このうち、もっとも動きの顕著なものとして、北緯 32-34 度に位置する亜熱帯フロントと北緯 28-30 度の南亜熱帯フロントがある。これらのフロントの季節的な海洋構造の変化は、ハワイを基地としたカジキ延縄漁、過去に行われたアカイカ流網漁などの操業位置を支配しており、外洋性商業種の漁獲量と漁獲率に大きく影響を与えている。

目 的：そこで本論文は、北太平洋亜熱帯海域における大・中規模の物理的な海洋環境の動きに対する海洋生物の応答について明らかにすることを目的とした。具体的には、衛星画像、海洋観測データを用いて、南亜熱帯フロント域とハワイ諸島の風下で風の応力によって生じる低気圧性渦による湧昇域の、二つの特徴的な海洋構造における物理-生物現象の応答関係を解析した。

亜熱帯フロント域の海洋構造と物理-生物応答：1996-2001 年の 5 年間に実施

した南北方向の海洋調査と、これに同期した衛星画像データを用いて、フロント域の海洋構造とその物理-生物応答機構を解析した。特に、8本の観測線と一本の東西方向の観測は、1996-2000年の間、米国大気海洋庁（NOAA）の調査船 *Townsend Cromwell* を用いて実施した。海洋観測は、蛍光光度計を装備したCTDを用いて500mまでの深度を28km間隔で測定した。加えて、深度別採水を行って植物色素の抽出と栄養塩類を測定した。衛星画像データはNOAA衛星の改良型高分解能放射計（AVHRR）画像とGOES衛星の海表面温度画像、海色はSeaWiFS衛星画像、海面高度アノマリデータ（SLA）はTOPEX/POSEIDON衛星データを用いた。

その結果、冬-春における北太平洋の南亜熱帯フロントを再定義し、フロント域での季節的な植物プランクトン動態の把握に新しい視点を提供することができた。季節的なフロントの位置は、海表面に特徴的な水温・塩分を示すため、海洋観測と衛星画像データから容易に発見できた。冬-秋の亜熱帯フロントは、フロント勾配内での表層塩分が34.8psuと水温17°Cで区分できた。一般に、このフロントの南側は低植物色素（クロロフィル+フェオ色素）で表層の栄養塩が枯渇する海域、北側は基礎生産がより高くなる海域とされている。一方、南亜熱帯フロントの南限は、フロント勾配内において、それぞれ水温20°C、塩分35.0psuとされている。南亜熱帯フロントでは、水温躍層と栄養塩躍層が有光層内まで浅くなっており、亜表層に植物色素が集積していた。浅い水温躍層の海域は捕食者や餌生物などを表層に留めることになり、例えばカジキ延縄漁の好漁場を形成することになる。

空間スケール10-100kmの蛇行、渦、噴出し(JET)などの中規模変動は、力学的に大きな勾配を持った構造をしている。これらの中規模海洋構造は、局所的に生産量を高めて多様な生物が集積するため、この物理的勾配構造が維持される間は、高次捕食者の好適な索餌場所を形成する。亜熱帯海洋では、表層の成層が安定しており、通常はこの成層内で消費者と低い基礎生産の植物プランクトンとの間で栄養循環が維持されている。しかし、強い低気圧性渦や蛇行などの中規模現象によって、一時的に栄養塩の豊富な水塊の湧昇が生じて新生産を誘発するため、栄養経路の短縮と栄養転換が促進する。この湧昇により、シアノバクテリア

類などのピコ植物プランクトンに換わって大型植物プランクトンである珪藻、渦鞭毛藻を増加させていた。

中規模低気圧性渦の海洋構造と物理—生物応答: ハワイ諸島の風下域で風の応力によって生じる中規模な物理現象である低気圧性渦と生物現象との関連を解析した。GOES 衛星の海表面温度データによる低気圧性渦の発見と、毎年実施されるスポーツフィッシングの海域が一致していたことは、本研究の生物-物理現象の解析に大いに役立った。ハワイ諸島の南の海域では、北東向きに卓越した貿易風と島の地形によって、西に伝播する寿命 50-70 日の低気圧性渦が発生する。低気圧性渦は、生物現存量、構成種、および局所的な植物プランクトンの生産を促し、より高次の栄養段階のメソ動物プランクトン類やネクトン類などの環境収容力を増加させる可能性がある。

本研究では、1999 年の 5 月上旬と 10 月下旬に発生した二つの低気圧性渦を、1999 年 11 月に船による海洋観測と衛星画像（主に GEOS-SST）によりその動きを追跡して水平・鉛直的な海洋構造を調べた。なお、静止軌道上にある GEOS 衛星による時系列の温度場画像データは、前述した二つの渦の軌跡を追跡するために用いた。

これらの研究において、GOES 衛星の海表面温度データが低気圧性渦などの海洋構造の発見に極めて有効であること、発見した渦を横切る海洋観測線を設定することによりドーム状湧昇の海洋構造を明らかにすることができた。ドーム状湧昇の表層における水塊の発散は水深 200m までが最も強く、約 300-400m まで影響を受けていた。二つの渦とも、水温躍層は水深 40m まで浅くなり、鉛直的な等温線の込み具合は 5 月に発生した渦で顕著であった。渦域の最大流速は、10 月発生した渦では毎秒 70cm、5 月発生した渦では毎秒 85cm を超えていた。栄養塩類と植物色素・全クロロフィル a 量の鉛直分布は、等温線の鉛直分布にほぼ一致していた。植物色素の極大層は硝酸塩躍層の深度と一致し、その深度は 10 月発生した渦では 80m、5 月発生した渦では 65m 以浅であった。また、渦中心部の有光層内における硝酸塩と亜硝酸塩の深度積算値は、定常観測点の 3-15 倍と高い値を示した。

最後に、これらの渦と外洋性魚類の分布の関係について、渦の存在と一致した

遊漁の釣獲データをもとに解析した。1995年夏、低気圧性渦は釣り大会海域の沖合に存在していた。同時期に渦域の海洋観測を実施しており、漁獲と環境動態との比較解析が可能であった。この渦の範囲は、海表面の面積で8500m²を占め、釣り大会が行われたハワイ島コナ沖に発達していた。釣り大会海域の水塊表層には顕著な混合層が認められ、渦の外周は強い流れとなっていた。この渦外周の強流域は、“クロカジキ (*Makaira mazara*) の最高釣獲賞” を獲得した沿岸水の特徴を示していた。鉛直的な流速差は海表面と水深75mで最も大きく、沿岸域の一番近いところでは毎秒60cmを超える流速となった。風による乱流の無いところで観察された沿岸域の表層混合層は、渦の動きによって沖合いの表層混合水が移流してきたものと判断された。反対に、渦の沖合側の水塊は、成層が発達しており顕著な混合は認められなかった。

標識放流個体数を含めた釣獲尾数は、大会の行われた週の日毎の釣果から直接抽出した。大会では89尾が釣獲され、クロカジキが80尾と最も多く、クロカジキが多く釣獲された場所は例年よりも南に集中していた。その時の海洋観測データから、クロカジキが一番良く釣れた海域は、海表面に強い水温勾配フロントがあり、岸向きの強い流れと沿岸の表層混合層が深いという海洋構造を示した。これらのパターンは、フロント域での高い生産力と豊富な餌生物環境が形成され、その場所にクロカジキが集群した結果、釣獲率が高かったとも推定される。しかし、漁獲努力量などの正確な情報がないため、釣獲が物理環境に応答したのか、単に漁獲努力量の差異によるものかは特定できなかった。

以上のように、本研究では、北太平洋亜熱帯フロント域や中規模渦などの海洋構造の動態が、その海域の生産力を促し、より高次の海洋生物が集群する現象を明らかにすることができた。しかしながら、海洋中でも最も広大な北太平洋中部循環域に発生する物理-生物現象の解明には、より多くの事例を精査する必要がある。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 桜 井 泰 憲

副 査 教 授 岸 道 郎

副 査 教 授 齊 藤 誠 一

副 査 教 授 Jeffrey Polovina (ハワイ大学客員教授)

学 位 論 文 題 名

Physical characterization of and biological responses at large-and meso-scale oceanographic phenomena in the Subtropical North Pacific

(北太平洋亜熱帯海域における大・中規模スケールの海洋環境の物理特性
と、それに対する生物の応答)

北太平洋亜熱帯海域は、変化の少ない単調な海洋環境と言われているが、大規模なフロント域の形成や中規模な水塊構造の動きなどによって基礎生産が生まれ、低次から高次生物への食物網を通じた栄養転換が起きている。このような大規模な境界を形成する海洋構造は、生物地理学的な海洋生物の生息境界や、全ての栄養段階の生物が集まる索餌・産卵海域として機能している。また、これらのフロントの季節的な海洋構造の変化は、ハワイを基地としたカジキ延縄漁、過去に行われたアカイカ流網漁などの操業位置を支配しており、外洋性商業種の漁獲量と漁獲率に大きく影響を与えている。そこで本研究では、北太平洋亜熱帯海域における大・中規模の物理的な海洋環境の動きに対する海洋生物の応答について明らかにすることを目的とした。具体的には、衛星画像、海洋観測データを用いて、南亜熱帯フロント域とハワイ諸島の風下で風の応力によって生じる低気圧性渦による湧昇域の、二つの特徴的な海洋構造における物理-生物現象の応答関係を解析した。

1996-2001年の5年間に実施した南北方向の海洋調査と、これに同期した衛星画像データを用いて、フロント域の海洋構造とその物理-生物応答機構を解析した。特に、

8本の観測線と一本の東西方向の観測は、1996-2000年の間、米国大気海洋庁の調査船 *Townsend Cromwell* を用いて実施した。海洋観測は、蛍光光度計を装備したCTD観測に加えて、深度別採水を行って植物色素の抽出と栄養塩類を測定した。衛星画像データは各種衛星による海表面温度画像、海色、海面高度アノマリデータを用いた。

その結果、冬-春における北太平洋の南亜熱帯フロントを再定義し、フロント域での季節的な植物プランクトン動態の把握に新しい視点を提供することができた。冬-秋の亜熱帯フロントは、フロント勾配内での表層塩分が34.8psuと水温17°Cで区分できた。一方、南亜熱帯フロントの南限は、フロント勾配内において、それぞれ水温20°C、塩分35.0psuで区分できた。南亜熱帯フロントでは、水温躍層と栄養塩躍層が有光層内まで浅くなっており、亜表層に植物色素が集積して、捕食者や餌生物などを表層に留めることになり、例えばカジキ延縄漁の好漁場を形成すると判断した。

蛇行、渦、噴出しなどの中規模変動は、力学的に大きな勾配を持った構造をしている。これらの中規模海洋構造は、局所的に生産量を高めて多様な生物が集積するため、この物理的勾配構造が維持される間は、高次捕食者の好適な索餌場所を形成する。強い低気圧性渦や蛇行などの中規模現象によって、一時的に栄養塩の豊富な水塊の湧昇が生じて新生産を誘発するため、栄養経路の短縮と栄養転換が促進する。この湧昇により、シアノバクテリア類などのピコ植物プランクトンに換わって大型植物プランクトンである珪藻、渦鞭毛藻を増加させていた。

次に、ハワイ諸島の風下域で風の応力によって生じる中規模な物理現象である低気圧性渦と生物現象との関連を解析した。ハワイ諸島の南の海域では、北東向きに卓越した貿易風と島の地形によって、西に伝播する寿命50-70日の低気圧性渦が発生する。低気圧性渦は、生物現存量、構成種、および局所的な植物プランクトンの生産を促し、より高次の栄養段階のメソ動物プランクトン類やネクトン類などの環境収容力を増加させる可能性がある。

本研究では、1999年の5月上旬と10月下旬に発生した二つの低気圧性渦を、同年11月に船による海洋観測と衛星画像によりその動きを追跡して、水平・鉛直的な海洋構造を調べた。これらの研究において、GOES衛星の海表面温度データが低気圧性渦などの海洋構造の発見に極めて有効であること、発見した渦を横切る海洋観測線を設

定することによりドーム状湧昇の海洋構造を明らかにすることができた。二つの渦とも、水温躍層は水深 40m まで浅くなり、鉛直的な等温線の込み具合は 5 月に発生した渦で顕著であった。渦域の最大流速は、10 月発生した渦では毎秒 70cm、5 月発生した渦では毎秒 85cm を超えていた。植物色素の極大層は硝酸塩躍層の深度と一致し、その深度は 10 月発生した渦では 80m、5 月発生した渦では 65m 以浅であった。また、渦中心部の有光層内における硝酸塩と亜硝酸塩の深度積算値は、定常観測点の 3-15 倍と高い値を示した。

最後に、これらの渦と外洋性魚類の分布の関係について、渦の存在と一致した遊漁の釣獲データをもとに解析した。釣り大会海域の水塊表層には顕著な混合層が認められ、渦の外周は強い流れとなっていた。この渦外周の強流域は、“クロカジキの最高釣獲賞”を獲得した沿岸水の特徴を示していた。風による乱流の無いところで観察された沿岸域の表層混合層は、渦の動きによって沖合いの表層混合水が移流してきたものと判断された。大会でクロカジキが多く釣獲された場所は、例年よりも南に集中していた。その時の海洋観測データから、クロカジキが一番良く釣れた海域は、海表面に強い水温勾配フロントがあり、岸向きの強い流れと沿岸の表層混合層が深いという海洋構造を示した。これらのパターンは、フロント域での高い生産力と豊富な餌生物環境が形成され、その場所にクロカジキが集群した結果、釣獲率が高かったと推定された。

以上のように、本研究では、北太平洋亜熱帯フロント域や中規模渦などの海洋構造の動態が、その海域の生産力を促し、より高次の海洋生物が集群する現象を明らかにすることができた。