「海—自然と文化」東海大学紀要海洋学部　第3巻第3号　1-12頁（2005）
Journal of The School of Marine Science and Technology, Tokai University, Vol.3, No.3, pp. 1-12, 2005

リモートセンシングを用いた南太平洋西部における イワシクジラと海洋環境との関係

木村圭佑*1・松岡耕二*2・西脇茂利*2・岡田喜裕*1

Remote Sensing Based Observation of Ocean Conditions and Their Influence on The Sei Whale Distribution in The Western South Pacific

Keisuke KIMURA, Koji MATSUOKA, Shigetoshi NISHIWAKI and Yoshihiro OKADA

Abstract

Like other baleen whales, the Sei Whales of the southern hemisphere undertake seasonal migration toward high-latitude feeding grounds in the summer and toward low-latitude breeding grounds in the winter. They are highly migratory with wide oceanic distribution; hence spatial and temporal scale observations are necessary to understand their distribution pattern. Under this investigation we used satellite derived ocean parameters and the whale sighting location data collected under the Japanese Whale Research Program under Special Permit in the Antarctic (JARPA) in order to elucidate prevalent ocean condition where whale sighting was undertaken, and to understand its influence on the distribution of the Sei Whales. The Sei Whales mostly feed on the low level zooplankton such as copepods and copepods feed on the phytoplankton. Due to such trophic relationship the Sei Whales are closely associated with the pelagic ocean environment which can be advantageously monitored by remote sensing observation. The present study was carried out using the whale sighting location data in the western South Pacific (20°-60°S, 170°E-160°W) in 2000 and 2002 along with the satellite derived ocean parameters such as sea surface temperature (SST), SST gradient, chlorophyll-*a* concentration as well as the sea bottom topography to understand the relative impact of the ocean parameters on the distribution of the Sei Whales. The whale sighting locations were found to coincide mostly with the ocean areas with high chlorophyll-a concentration as well as the high topography gradient. We coined an index for the characteristic SST of the whale sighting locations and named as favorable temperature index (FTI). Statistically strongest relationship was noticed between the FTI and the whale sighting locations. Our FTI coincided with that of the SST of sub-tropical frontal waters. Such results clearly indicate major influence of the sub-tropical front on the distribution of the Sei Whales in the western South Pacific.

1．はじめに

鯨類の適切な資源管理と持続的利用を図るため，日本政府が(財)日本鯨類研究所に委託して実施している南極海鯨類捕獲調査（以下JARPA）は1987/88年度以来継続して実施されている．（本論文において，1987年と1988年にまたがる夏を以後1987/88年度と記述する）．本調査は2004/05年度で18回目を数え，鯨類の生物学的特性値の推定，系群情報や資源量，更に鯨類と海洋環境との関係について様々な情報が得られている．例えば，目視観測によって得られる鯨類の分布から資源量や調査海域内の海洋環境を把握することは資源管理上重要な情報となる．鯨類と海洋環境との関係については1960年代頃から様々な研究が行われてきた．宇田（1960）は鯨類の分布は渦流や潮境の位置，その分布型に関係するとしており，更に海底地形と密接な関係があることを指摘している．SLIJPER（1965）は鯨類の分布や回遊は餌の供給状態に支配されプランクトンの豊富な極域に採餌期の鯨類が集群するとしている．また，松岡（1998）は，JARPA中低緯度往復航路目視調査で得られたデータより，観測された数種の鯨類の目視位置と海洋環境との比較から，亜熱帯前線や亜南極前線等の海洋前

2006年1月16日受理
＊1　東海大学連合大学院地球環境科学研究科（Unified Graduate School of Earth and Environmental Science Tokai University）
＊2　(財)日本鯨類研究所（The Institute of Cetacean Research.）

線域が，鯨類の分布と深く関係があったことを報告している．このように鯨と海洋環境との間には深い関係がある事が示唆されており，特にヒゲクジラ類の主要な餌生物である動物プランクトンが主に海洋表層に分布している事等から，表層の海洋環境と密接な関係があると考えられる．また，本研究対象種であるイワシクジラ（*Balaenoptera borealis*）は低次の動物プランクトンを主に摂食する事で知られており，他のヒゲクジラ類よりも海洋環境に依存した分布をしている事が期待される．これまでの南半球における鯨類の分布研究は船舶データを用いたものが主であり，人工衛星リモートセンシングを用いた研究例はほとんど無い．本研究では海洋表層を広域かつ継続的に観測出来る人工衛星リモートセンシングを用い，鯨類の集群に対して，水温，水深，クロロフィル-a 濃度，水温勾配等のパラメータの重要性を明らかにする事を主な目的とした．

2．使用したデータ及び方法

2.1　研究対象期間及び海域

研究対象期間は，南極海鯨類捕獲調査（JARPA）調査における中低緯度目視調査において，ニュージーランド東側海域でイワシクジラの目視があった2000/01年度及び2002/03年度を対象とし，研究対象海域は JARPA 調査におけるニュージーランド東側海域での同種の分布及び目視域より，南緯20～60度，東経170～西経160度と設定した（Fig. 1）．

2.2　イワシクジラ目視観測データ

イワシクジラ目視観測データは（財）日本鯨類研究所より提供された「JARPA 中低緯度目視記録イワシクジラ発見データ」，「天候記録データ」，「努力量記録データ」を使用した．（財）日本鯨類研究所が日本政府の特別許可を受け実

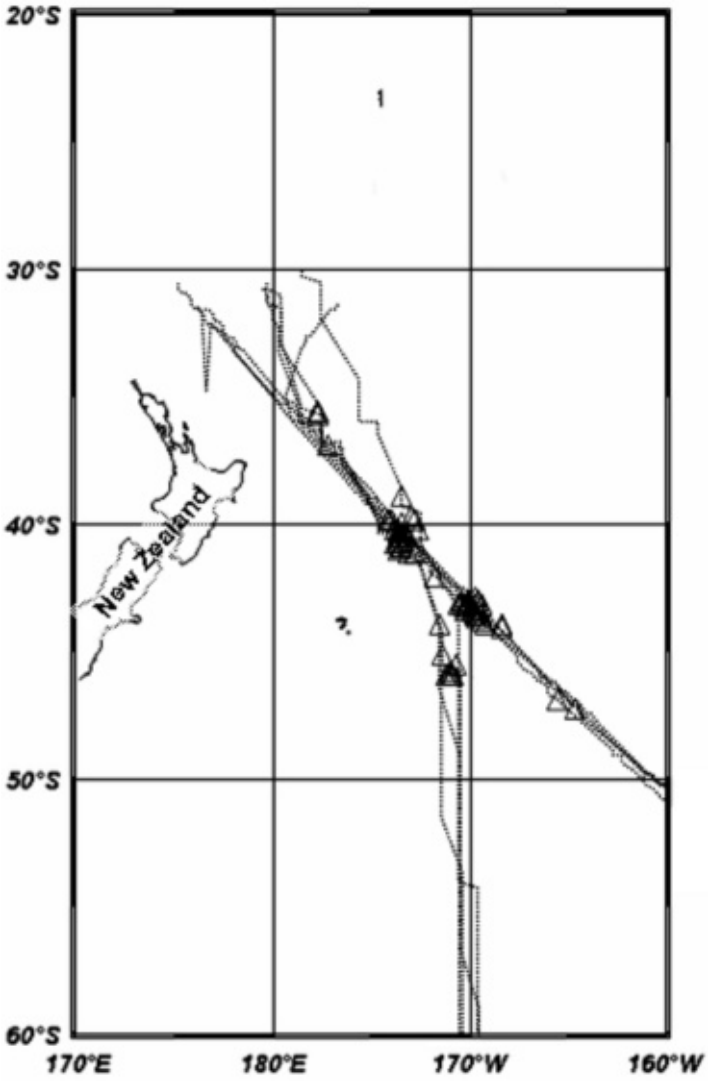


Fig. 1: Area of observation showing the JARPA cruise tracks (dotted lines) and the Sei Whale sighting locations (△).

施している南極海鯨類捕獲調査（JARPA）では，南半球産ミンククジラの繁殖海域及び南下経路における分布及び系群判別に必要な情報を収集するために，日本から南極海までの往復航海を利用した南半球中低緯度鯨類目視調査を行っている．通常日本から南極海へ向かうにはインドネシアロンボック海峡を経由し，オーストラリア西側を南下するコースとカロリン諸島近海を経てオーストラリア東側を南下するコース及びニュージーランド東側を南下するコースがある．本研究では，このうちニュージーランド東側を南下するコースにおけるデータを使用している．調査コースは，各年度の調査日程や，南極海での調査開始点と終了点を考慮した直線コースとなる事が多いが，天候等のため一部曲線コースになることもある．実際の調査日数は年度によって多少異なるが，往路復路それぞれ凡そ７～８日間である．調査船はトップマスト及びアッパーブリッジと呼ばれる観測場所を有しており，調査員は全ての目視されたクジラに対する目視記録を記入し，当直航海士が努力量，天候記録を記入する．目視調査は３名のトップマンが荒天時を除く毎6:00時～18:00時まで観測を行い，目視群が船の正横を通過するまでの間に得られた目視情報により鯨種及び発見頭数を記録する（松岡，1998）．JARPA中低緯度目視記録イワシクジラ発見データは，調査船名，日時，緯度，経度，タイプ，調査モード，目視番号，目視頭数，水温の項目から構成されており，本研究対象期間中の同種目視頭数は159頭であった．また，2000/01年度調査航海において同種の目視があった期間は12月５日～７日，2002/03年度は11月26日～29日であった．本研究では，このうち日付，緯度，経度，目視頭数データを使用し，解析を行う．なお，本データにおける緯度経度情報は同種が最初に目視された時間における目視船舶の緯度経度を表したものである．

2.3　衛星観測による海表面水温データ，クロロフィル-a濃度データ及び周辺の海底地形データ

イワシクジラ目視地点周辺の海洋環境を調査するため，人工衛星リモートセンシングによるデータとしてNOAA/AVHRRより得られる海表面水温データ，Orbview2/Sea WiFSから得られるクロロフィル-a濃度（Chl-a）データ，周辺の海底地形データを使用して解析を行った．

2.4　解析方法

本研究の解析では，同種の分布の主要因となると考えられるデータ（水温，水温勾配，Chl-a，水深）を用いて要因分析を行うが，水温のパラメータを扱う際に水温をそのまま回帰式に代入すると水温に比例して同種の目視される確率が変動してしまうという問題がある事から，水温がある一定の水温に近づくほど値が上がるといった変数を好適水温（Favorable Temperture Index, 以下FTI）と定義し，使用した．FTIの計算式を以下に記す．

$$FTI = -|a|(x_i - \bar{x})^2$$

a：回帰係数　x_i：対象地点の平均水温

$\bar{x}$：目視地点の平均水温

3．結果及び考察

3.1　JARPA中低緯度目視記録イワシクジラ発見データにおける目視位置の特徴

JARPA中低緯度目視記録イワシクジラ発見データの中の同種目視位置，及び水温について検討を行なった．目視位置は，2000/01年度では主に南緯42～43度，2002/03年度においては南緯39～41度であり，イワシクジラの全目視数に対する割合は，南緯39～44度において75.8％を占めていた．この事は亜熱帯前線と亜南極前線との間に分布するというNasu and Misaki（1970）の報告と一致している．ただし，分布が集中している海域は，亜南極前線というよりも，亜熱帯前線寄りに集中していた．

3.2　海底地形に見られるイワシクジラ目視地点の特徴

イワシクジラ目視位置と海底地形との関係について比較検討を行う．海底地形を表す代表的なパラメータを各地点の水深として，同種が目視された位置周辺の水深に対して解析を行った．同種が目視された地点の水深は2000/01年度で1,900～5,380m平均水深3,374m，2002/03年度で3,652～6,233m平均水深4,807mである事が分かった．航路上の平均水深は2000/01年度4,184m，2002/03年度4,756mであり，平均水深からは同種の目視地点について特徴的な事を読み取ることが出来なかった．Fig. 2は各観測船の航路上の水深の分布を示している．航路上の同種の主な目視があった海域は，明らかに周辺より水深が浅いところ，特に水深が急激に変化する海底斜面域であった．また，Fig. 3の対象海域の水深分布図においても同種の主な目視は海底斜面域に相当することが多いことが確認できた．これは下村（1947）による鯨の漁場は海底地形と密接な関係があり，陸棚域や海嶺等は湧昇とも関連して多餌域を形成するため，特に注目されているという記述と一致していた．以上の事から水深の分布から同種の目視地点となりうる場所を設定出来る可能性が示唆された．

3.3　NOAA/AVHRR海表面水温データに見られるイワシクジラ目視地点の特徴

NOAA/AVHRRによる海表面水温，水温勾配画像，航路上の海表面水温データとJARPA中低緯度目視記録イワシクジラ発見データより，同種が目視された位置周辺の平面的な水温環境について比較検討を行う．ニュージーランド東側海域の同種が目視された海域における各年度の水温画像をFig. 4，水温勾配画像をFig. 5，各観測船の航路上の海表面水温をFig. 6に示す．水温勾配は南半球亜熱帯域から南極域までの水温が緯度毎に変化するという特徴を考慮し，海表面水温のデータよりある地点を中心として南

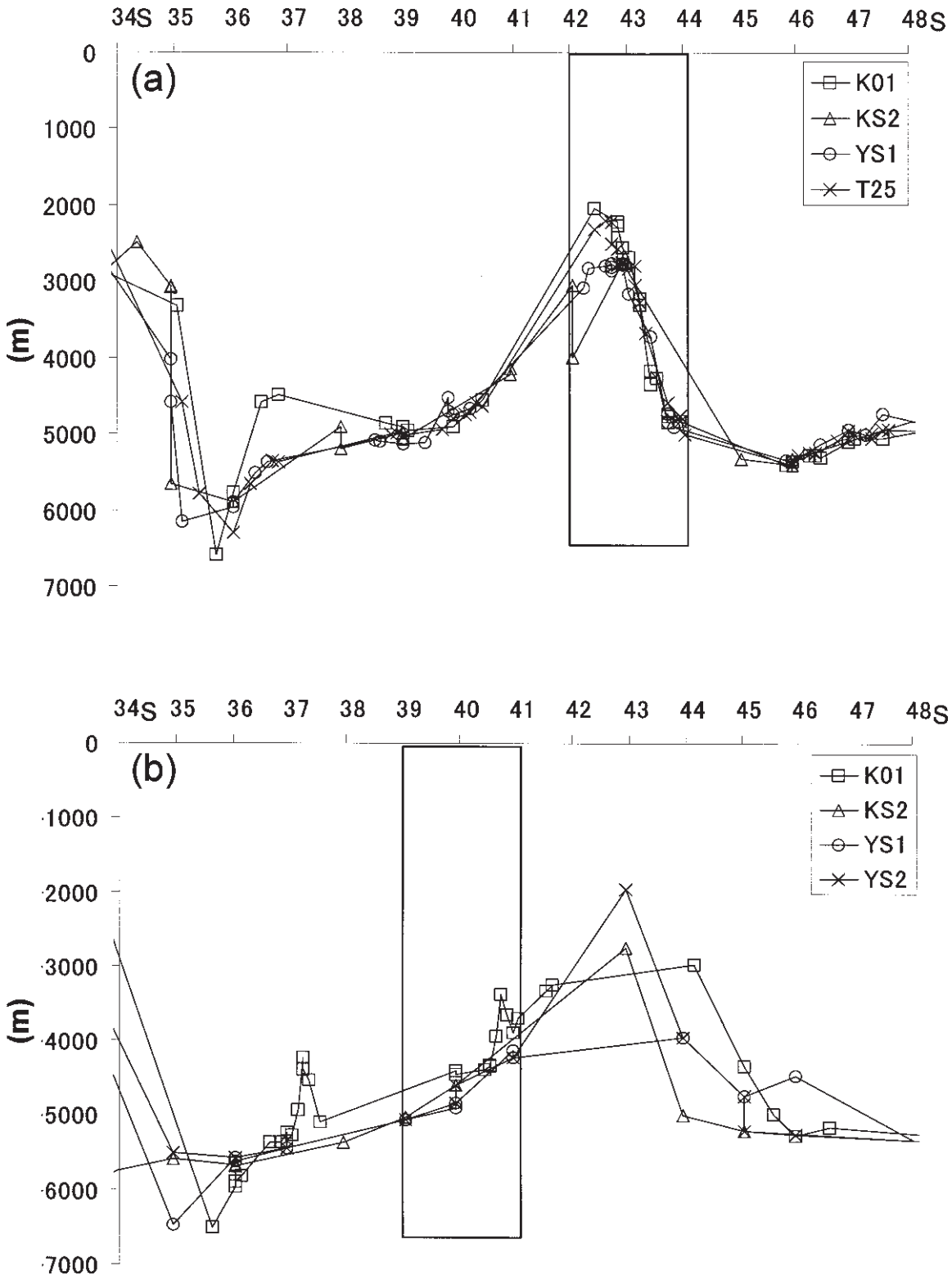


Fig. 2: Depth profiles of the cruise tracks in the observation area in 2000 (a) and 2002 (b). The rectangles show the Sei Whale distribution area along the tracks. The symbols indicate different observation vessels used in both the years.

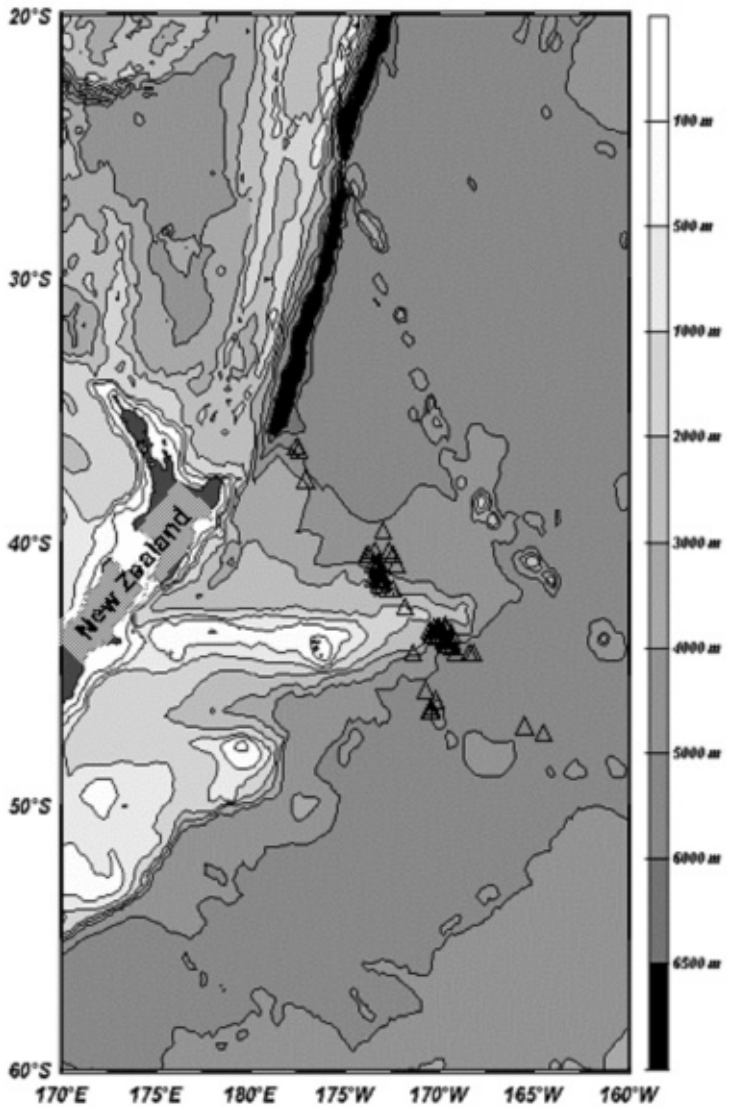


Fig. 3: Bottom topography of the area of observation showing the Sei Whale sighting locations (△).

北 0.5 度の水温差の絶対値と定義して解析を行った．水温及び水温勾配画像（Fig. 4，Fig. 5）よりチャザム島西側に強い水温勾配を確認出来る．チャザム島周辺では南下するオークランド海流と北上するサウスランド海流がチャザム島周辺で収束し，前線域を形成しているとされており (Currie and Hunter, 1998)，すなわち同種は各年度共にこの強い前線帯の東側，西経170度付近の北からの暖水と南からの冷水が交わっている様な海域で目視されていた事が分かった．Fig. 7 は水温毎のイワシクジラ群目視数の関係を示している，ニュージーランド東側海域においてイワシクジラ群の目視があった地点の水温の最高値は 16.65°C，最低値は 11.55°C であり，その平均値は 14.75°C であった．2000/01年度における同種の目視は 14〜15.5°C，2002/03年度においては 14〜15°C に集中していた．それぞれの水温におけるイワシクジラ群目視数の全目視数に対しての割合は 14〜15.5°C に 86%，14〜15°C に 64.7% であった．本研究の結果は Gaskin（1984）の南極海における主要捕鯨漁場と一致しており，Anthony（1991）の同種の適水温（8〜25°C）よりも狭い範囲に集中していた．また，2000/01年度，2002/03年度におけるイワシクジラ群目視位置の平均水温はそれぞれ 14.85°C，14.65°C とほぼ一定であった．航路上の海表面水温図（Fig. 4）における同種の目視位置の特徴と同種目視地点における海表面水温の変化について検討すると，2000/01年度においては同種の目視が集中的にあった南緯42〜44度の範囲において，特に南緯 42.5 度付近に周囲と比べ比較的顕著な水温勾配が確認できる．各目視位置の平均水温勾配は 0.47°C であった．また，2002/03年度において同種の目視が集中的にあった南緯39〜41度の範囲において特に南緯 40.5 度付近にローカルな渦と見られる水温分布が確認された．以上の事から海表面水温及びその水温の変化が同種目視の要因となっている可能性が示唆された．

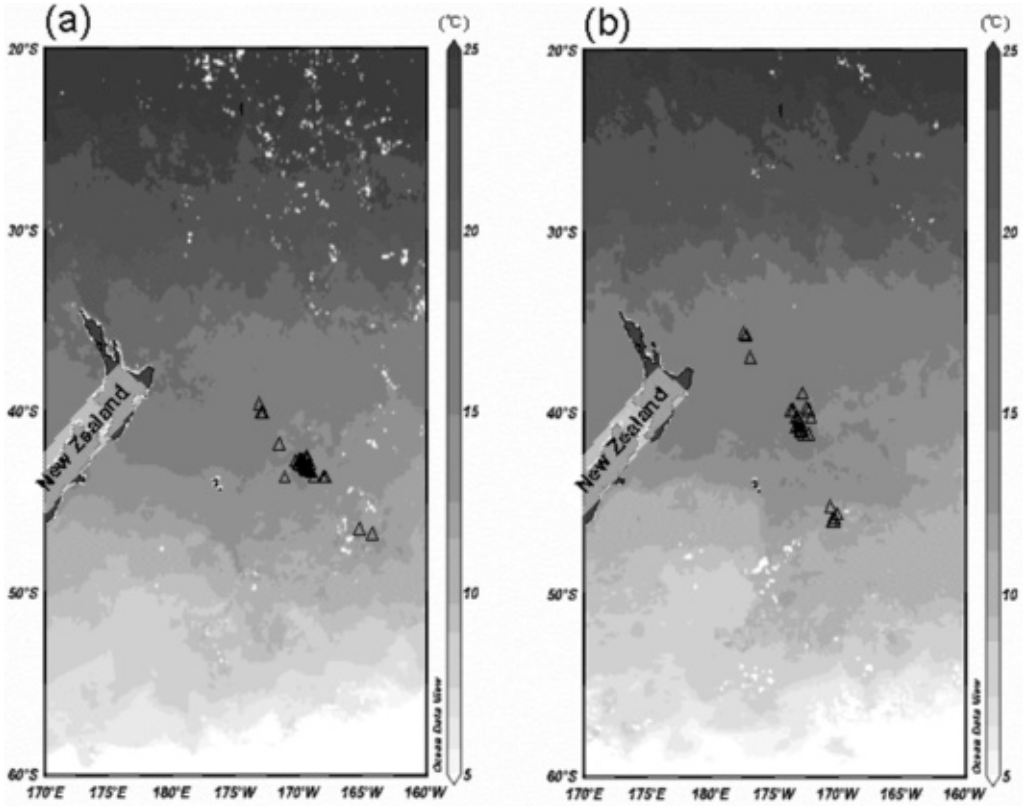


Fig. 4: SST distribution in the area of observation in 2000 (a) and 2002 (b) showing the Sei Whale sighting locations (△).

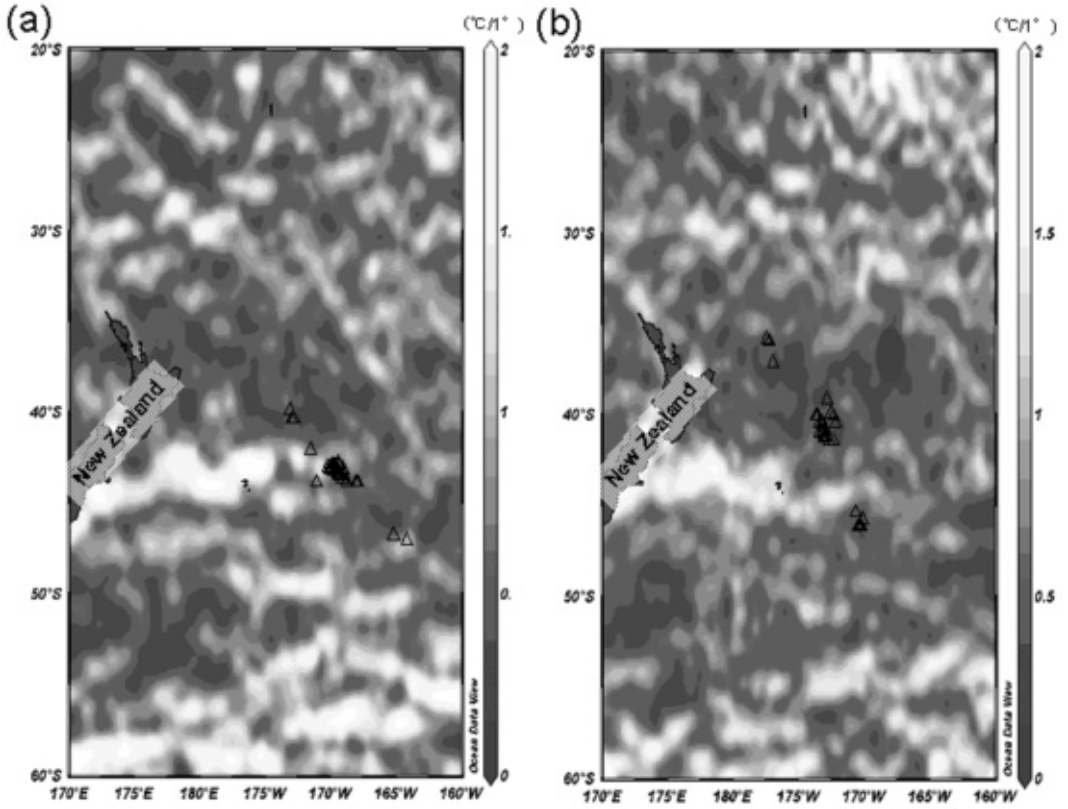


Fig. 5: SST gradient (°C/1 degree latitude) distribution in the area of observation in 2000 (a) and 2002 (b) showing the Sei Whale sighting locations (△).

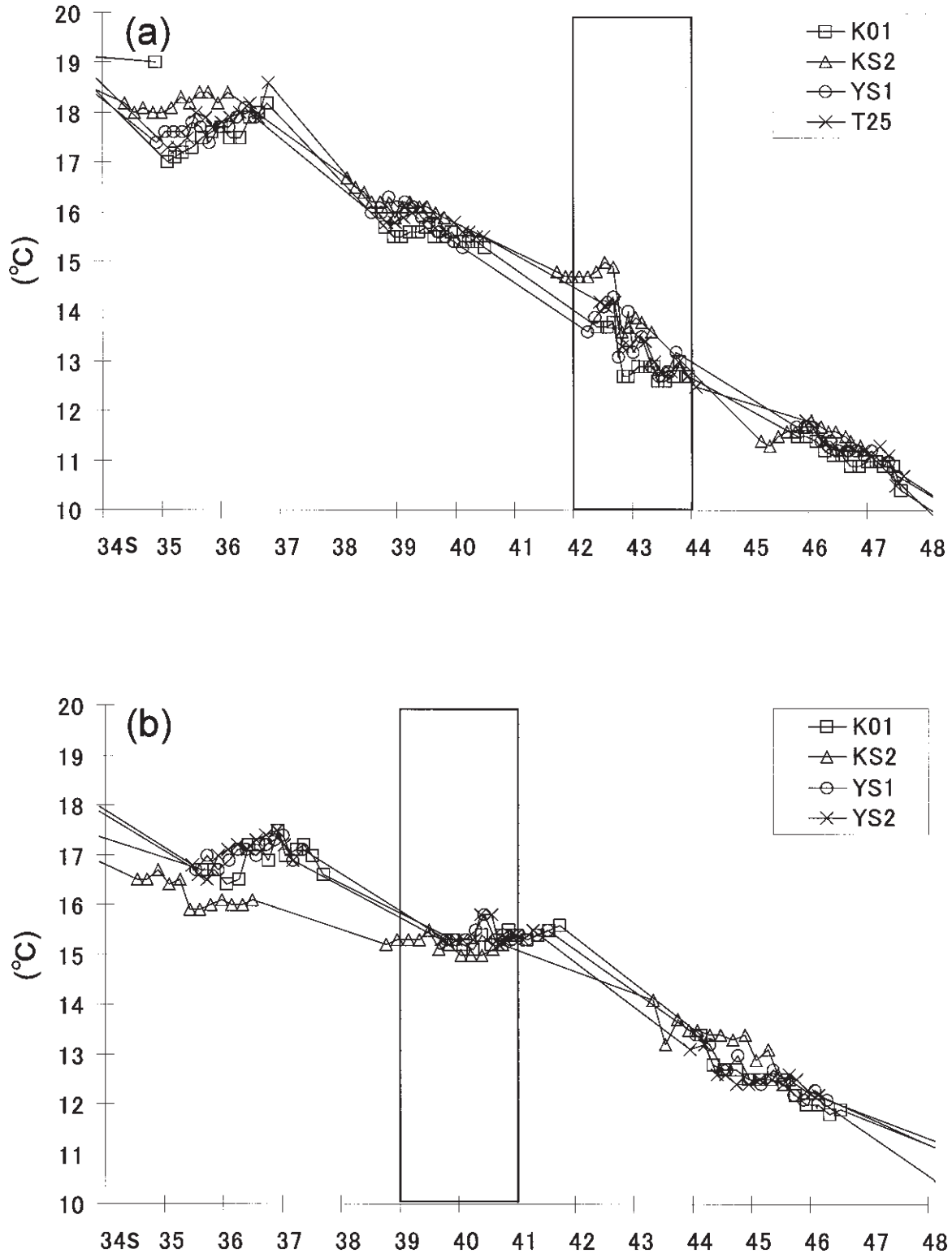


Fig. 6: SST profiles of the cruise tracks in the observation area in 2000 (a) and 2002 (b). The rectangles show the Sei Whale distribution area along the tracks. The symbols indicate different observation vessels used in both the years.

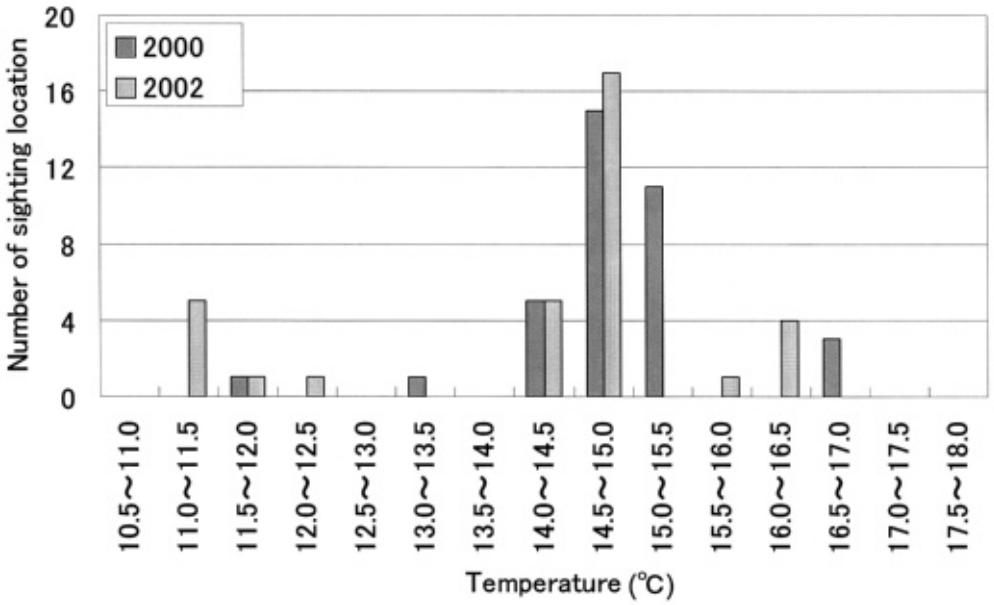


Fig. 7: The number of Sei Whale sight location corresponding to the frequency distribution of SST in the area of observation in 2000 and 2002.

3. 4　Orbview2/SeaWiFS クロロフィル-a 濃度データに見られるイワシクジラ目視地点の特徴

Orbview2/SeaWiFS によるクロロフィル-a 濃度画像，航路上のクロロフィル-a 濃度データと JARPA 中低緯度目視記録イワシクジラ発見データに記載された同種目視位置との比較検討を行なう．ニュージーランド東側海域の同種が目視された海域における各年度のクロロフィル-a 濃度画像を Fig. 8，各観測船の航路上のクロロフィル-a 濃度を Fig. 9 に示す．同種目視地点のクロロフィル-a 濃度の最高値は2000/01年度 0.55mg m^{-3}，2002/03年度 1.46mg m^{-3}，最低値は2000/01年度 0.15mg m^{-3}，2002/03年度 0.22mg m^{-3} であった．また，各年度の同種目視地点における平均クロロフィル-a 濃度は2000/01年度 0.24mg m^{-3}，2002/03年度 0.8mg m^{-3}，と2000/01年度よりも2002/03年度の方が同

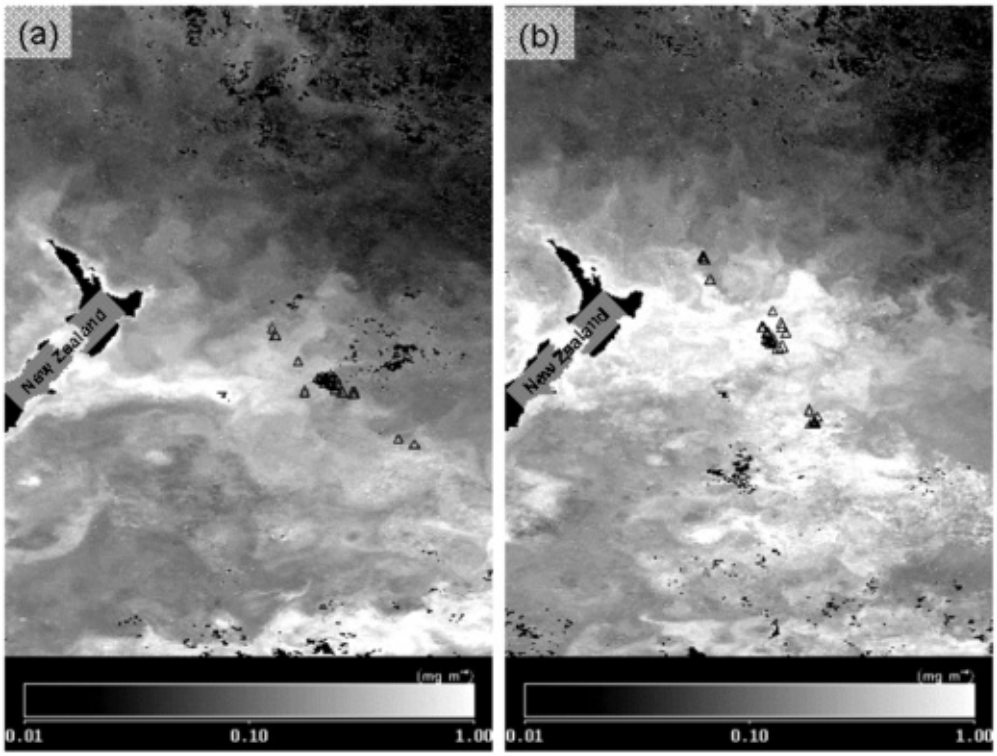


Fig. 8: Chlorophyll-*a* distribution in area of observation in 2000 (a) and 2002 (b) showing the Sei Whale sighting locations (△).

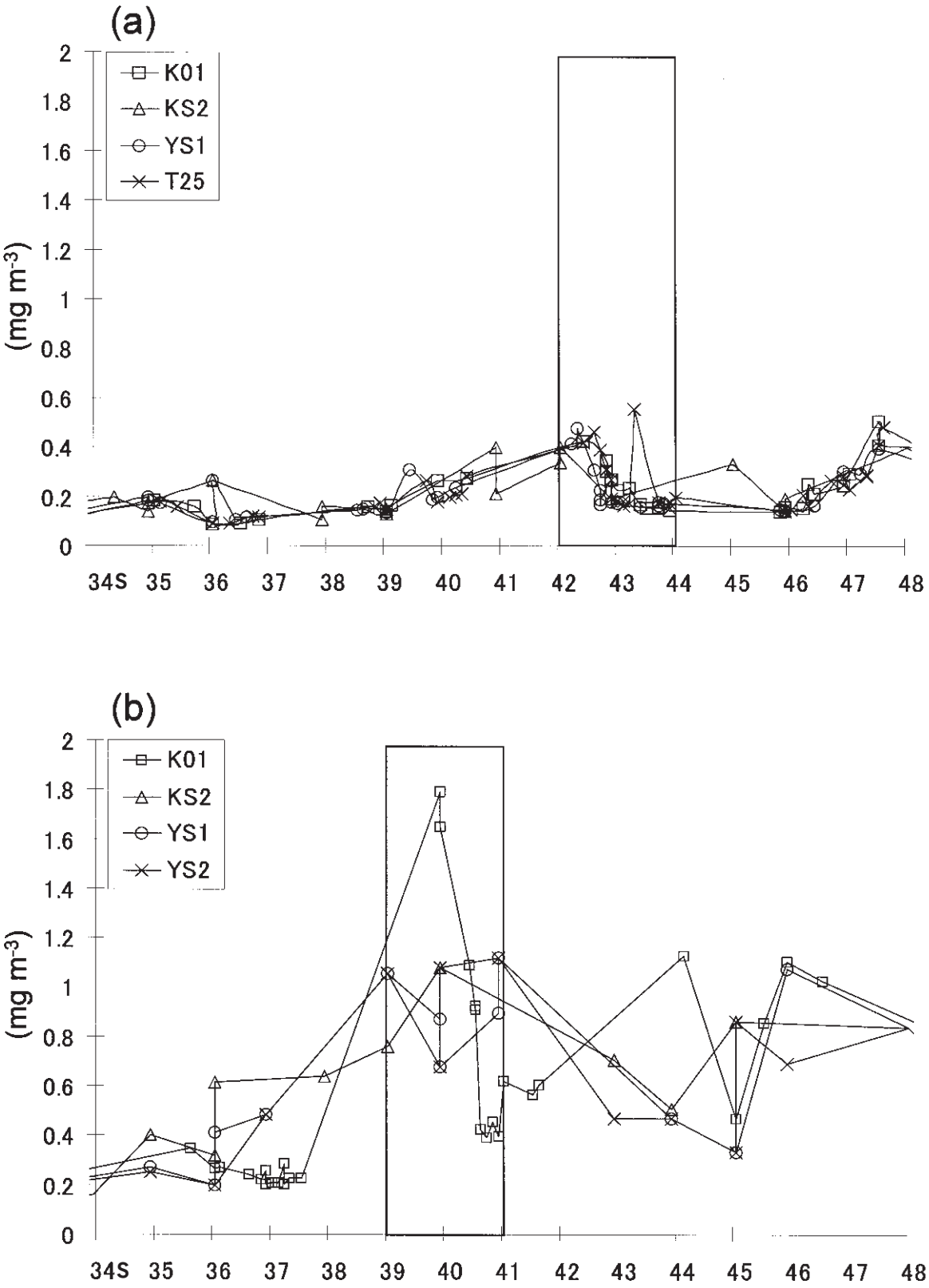


Fig. 9: Chlorophyll-*a* profiles of the cruise tracks in the observation area in 2000 (a) and 2002 (b). The rectangles show the Sei Whale distribution area along the tracks. The symbols indicate different observation vessels used in both the years.

種の目視地点でのクロロフィル-a 濃度が高い事が分かった．また，両年度のクロロフィル-a 濃度を平均すると 0.51mg m^{-3} であり，これは観測航路上の目視位置周辺を除いた平均クロロフィル-a 濃度である 0.31mg m^{-3} の値と比べて高い値であった．航路上のクロロフィル-a 濃度グラフ（Fig. 9）からも同種が集中的に目視された地点（枠内）においてクロロフィル-a 濃度が高く，これらの事から同種の目視は周辺海域よりもクロロフィル-a 濃度が高いところに形成されていた事が分かった．Orbview2/SeaWiFS から見たクロロフィル-a 濃度画像（Fig. 8）の各年度の対象海域周辺のクロロフィル-a 濃度分布の特徴として，2000/01年度ではチャザム島西側からニュージーランドにかけて，2002/03年度ではチャザム島北側でクロロフィル-a 濃度が非常に高い海域を確認できる．この様なクロロフィル-a 濃度分布は前述の亜南極，亜熱帯，それぞれ異なる性質を持った水塊が混ざり合う事により起こっていると考えられる．チャザム島西側の最もクロロフィル-a 濃度が高い海域は中低緯度目視調査の航路上では無いが，同種の主な目視位置はいずれもチャザム島の東側（2000/01年度）及び北東側（2002/03年度）の高いクロロフィル-a 濃度海域から舌状に伸びた海域に存在していた．これらの事から周囲より高いクロロフィル-a 濃度分布が同種の集群に重要な役割を果たしている事を確認した．

3.5　各海洋物理パラメータを用いた重回帰分析

これまでの結果より，様々な海洋パラメータがイワシクジラ目視の要因となる事を確認した．そこで，本研究ではどの種のパラメータがどれだけ同種の目視に影響しているかを調べるため，重回帰分析による要因分析を行った．重回帰分析における目的変数をイワシクジラ群目視に，説明変数をこれまでの結果から同種の目視に影響を与えていると思われる水温の変数（FTI），水温勾配，水深，クロロフィル-a 濃度に設定した．Fig. 10 は本研究における要因分析の結果を示している．要因分析の結果，イワシクジラ群の目視に FTI が 48.0%，水温勾配が 2.0%，クロロフィル-a 濃度が 21.3%，水深が 28.7%の影響を与えているという解析結果が出力された．重回帰分析の結果，ニュージーランドの東側海域におけるイワシクジラ群目視に対する影響値の特徴として，FTI が最も高い影響を与え次に水深，クロロフィル-a 濃度が影響を与えている事を確認した．また，水温勾配は，3.3 節の解析において特に2000/01年度の同種目視域周辺で比較的顕著な水温勾配が確認されたが，重回帰分析の結果，水温や水深，クロロフィル-a 濃度等，他のパラメータと比べ，同種の目視に与える影響が少なかった．同種発見に最も影響を与えていたのは水温のパラメータは各年度を平均して 14.75°C，であり，14°C～18°C に同種の目視数の 87.1% が集中していた．この 14°C～18°C の水温帯は夏季の亜熱帯前線の指標として知られている（町田，1975; Tchernia, 1982）．Fig. 11 は各年度の亜熱帯前線と同種の目視位置の関係を示している．ここで亜熱帯前線は 14°C～18°C の水温帯として定義した．Fig. 11 に示すようにほぼ全ての同種の目視位置が亜熱帯前線内，特に亜熱帯前線南側の境界線付近に集中しており，亜熱帯前線と同種との間に強い関係がある事が判明した．

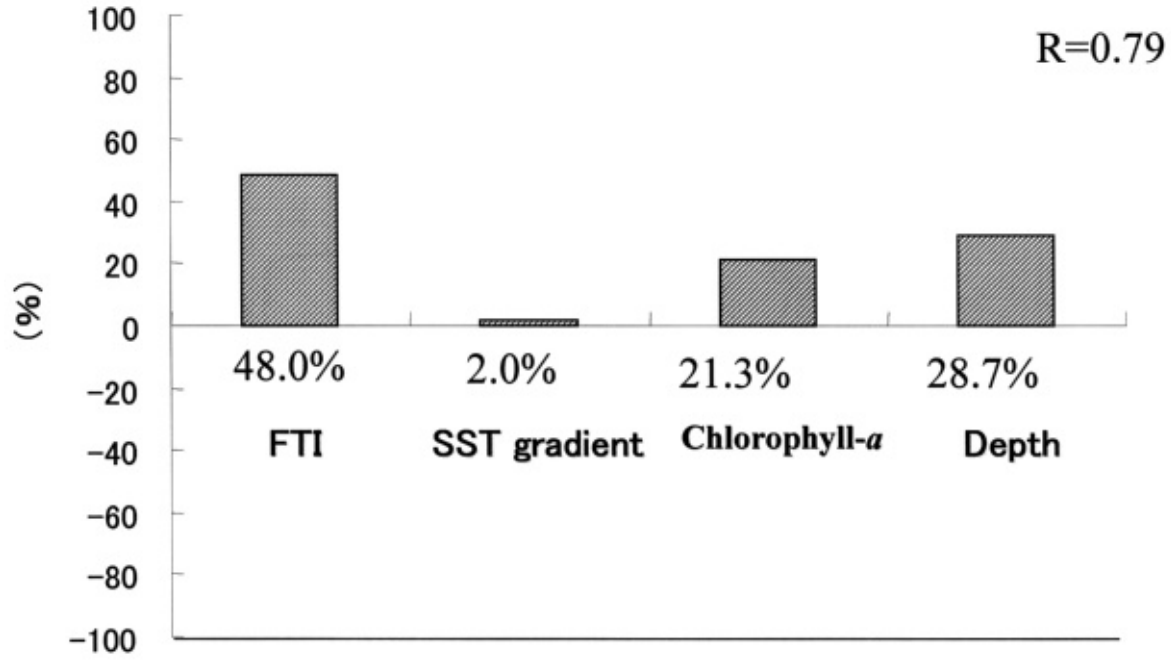


Fig. 10: Results of multiple regression analysis between the Sei Whale sighting location and ocean environmental parameters.

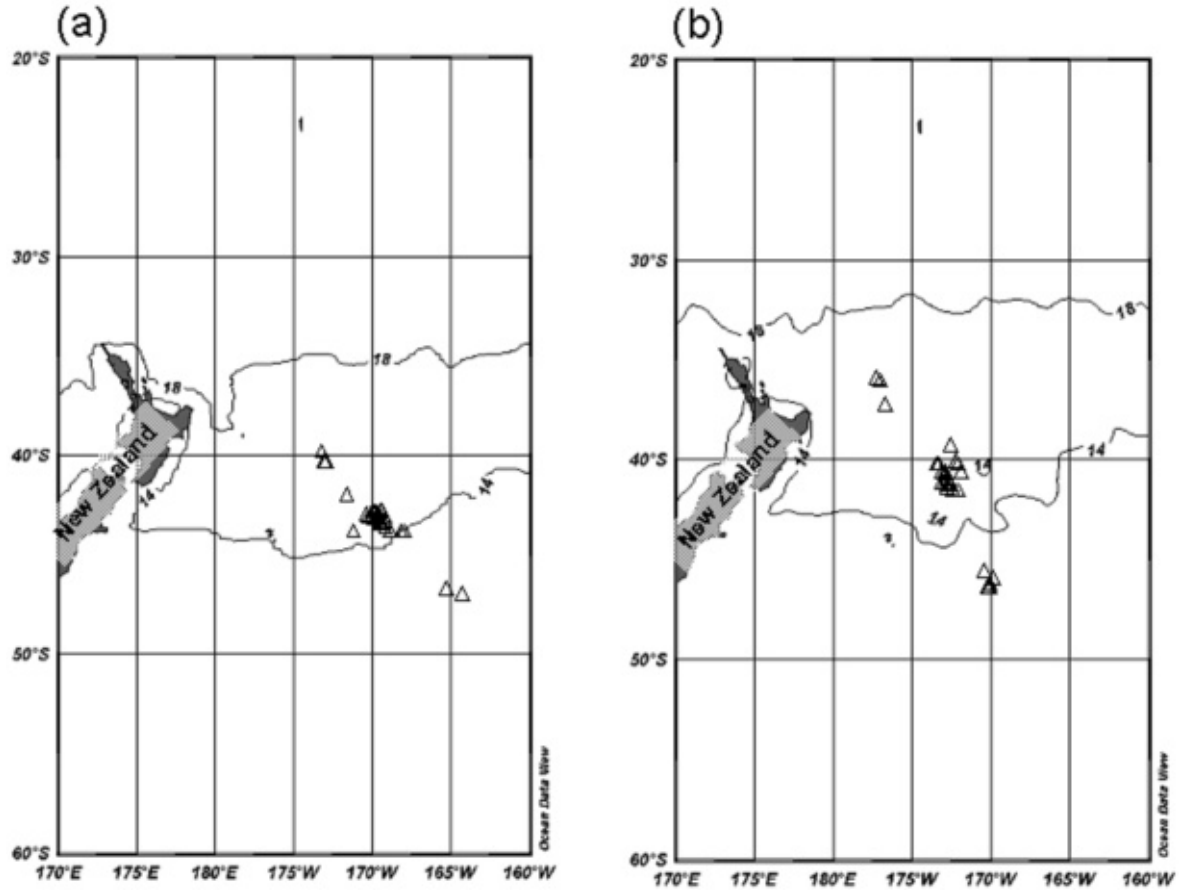


Fig. 11: SST contours showing the extent and location of the sub-tropical front (14–18'C) in the area of observation in 2000 (a) and 2002 (b). Distribution of the Sei Whale sighting locations are marked as open triangles.

4．ま と め

JARPA 調査における，ニュージーランド東方でのイワシクジラ目視地点の海況の特徴についてまとめる．JARPA 調査の期間中，同海域において目視観測が行われたのは2000/01年度及び2002/03年度であり．どちらの年度もチャザム島北東．南緯43度，西経170度付近に同種の集中的な発見があった．同種は主に 13°C～18°C の水温帯に 88.2%，特に 13°C～16°C に 68.6% の発見があった．また，同種が発見された地点の平均クロロフィル-a 濃度は 0.51mg m^{-3} であり，観測航路上の発見位置周辺を除いた海域の平均クロロフィル-a 濃度 0.31mg m^{-3} に比べ約 1.6 倍であることが分かった．また，同種は陸棚境界域及び斜面域に多く発見される傾向があった．これは宇田（1960）の陸棚域，海嶺等が湧昇や潮境とも関連して多餌域を形成するため鯨漁場と密接な関係があるという報告と一致していた．発見に関して各変数のパラメータがどのように影響しているか調べるため，説明変数を FTI，水温勾配，クロロフィル-a 濃度，水深として重回帰分析を行った結果，各パラメータの影響値はそれぞれ 48.0%，2.0%，21.3%，28.7% であった．分析結果から一定の水温帯が同種発見に大きな影響を与えている事が示された．同種が集中的に分布している 13°C～18°C の水温帯は，夏季の亜熱帯前線の指標とされる 14°C～18°C の水温帯（町田，1975; Tchernia, 1982）とほぼ一致しており，この水温帯を指標とした亜熱帯前線との比較を行ったところ，同種の主な発見は亜熱帯前線，特に亜熱帯前線南部に集中していた．上記で示すように，様々な人工衛星データを解析した結果より，人工衛星データを用いて JARPA 観測における同種発見位置周辺の海洋環境をまとめてみると，本海域における同種の発見は亜熱帯前線南側に集中しており，亜熱帯前線及びその水温帯，陸棚斜面域において起こる何らかの集積作用が同海域における高クロロフィル-a 濃度及び同種の餌生物を集群させる要因となり，同種を誘引していると考えられる．本研究の今後の課題として，JARPA 調査のインド洋東部海域における中低緯度目視観測のデータを用い，インド洋東部における同種と海洋環境についての解析を行い，海域毎の分布特性を検討する必要がある．更に，同種の捕食する餌の種類は豊富だが（Gaskin, 1984），狭食性であり 2 種類以上の餌生物が個々の胃の中に入っている事は稀であるという性質，また同種の餌生物には季節変化が見られ，緯度方向でその種類が変化するという性質を考慮し，対象海域内の餌生物の分布について検討していく必要があると考えられる．

謝　辞

本研究で使用したJARPA中低緯度目視記録イワシクジラ発見データ，天候記録データ，努力量記録データは(財)日本鯨類研究所から提供して頂いたデータである．本研究は2004年度に東海大学修士論文として提出したものを再構成したものである．適切なコメントを頂きました海洋学研究科の先生方に感謝致します．

“The AVHRR Oceans Pathfinder SST data were obtained through the online PO. DAAC Ocean ESIP Tool (POET) at the Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO. DAAC), NASA Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA. http://podaac.jpl.nasa.gov/poet.”

“The authors would like to thank the SeaWiFS Project (Code 970.2) and the Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center/Distributed Active Archive Center (Code 902) at the Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, for the production and distribution of these data, respectively. These activities are sponsored by NASA’s Earth Science Enterprise.”

参考文献

Anthony R. Martin, (1991), Whales and Dolphins, 平凡社, 東京都, 205.

E. J. Slijper, (1965), Whales [second edition], 東京大学出版会, 東京都, 493pp.

松岡耕二，(1998)，JARPA往復航海における南半球中低緯度鯨類目視調査の概要，鯨研通信，397号，1-12．

Nasu and Masaki，(1970)， 開洋丸ニュージーランド調査における鯨類目視観察結果，鯨研通信，第239号，57-64．

宇田道隆，(1960)，海洋漁場学，恒星社厚生閣，東京都，347pp．

下村敏正，(1947)，南氷洋捕鯨と海況について，日本海洋学会誌，**5**(2-4): 9499．

K. I. Currie and K. A. Hunter, (1998), Surface water carbon dioxide in the waters associated with the subtropical convergence east of New Zealand, DEEP-SEA RESEARCH I, **45**, 1765-1777.

D. E. Gaskin，(1984)，クジラとイルカの生態，東京大学出版会，450pp．

町田，(1975)，捕鯨船団による南大洋縦断途上の水温観測-インド洋区・1974/75，鯨研通信，287号，53-57．

P. Tchernia, (1982) Descriptive Physical Oceanography, Academic Press, (New York), 249pp.

要　旨

南半球におけるイワシクジラは，他のヒゲクジラ類と同様，冬は低緯度海域で繁殖し夏に高緯度海域で摂餌といった季節回遊を行う．高い回遊能力を持つ鯨類の調査には広域的かつ継続的な観測が必要不可欠である．本研究では人工衛星によるリモートセンシングを利用し，南極海鯨類捕獲調査（JARPA）において同種が発見された周辺海域の海洋環境を解明する事を目的とした．同種の主な餌生物はコペポーダ等，低次の動物プランクトンであり，多くの鯨類の中でも海洋環境との関係が深いと考えられるため，人工衛星の利点を十分に生かした研究が出来ると期待される．2000年及び2002年の目視情報に基づき西部南太平洋（南緯20～60度，東経170～西経160度）を対象とし，水温，水温勾配，クロロフィル-a濃度，海底地形等のパラメータを解析した結果，同種が発見された海域は主に海底斜面域で周囲よりクロロフィル-a濃度の高い海域である事が分かった．同種の発見に最も影響を与えていたのは水温であり同種の発見が集中していた水温帯は夏季の亜熱帯前線の指標となる水温帯と一致し，同種と亜熱帯前線との間に強い関係がある事が示唆された．