

仙台湾周辺における計量魚探を用いた鯨類餌生物の種判別

永島 宏^{*1}・村瀬 弘人^{*2}・米崎 史郎^{*3}・松倉 隆一^{*4}・
南 憲吏^{*4}・永木 利幸^{*5}・川原 重幸^{*3}・宮下 和士^{*4}

Species Identification of Prey Fish Schools for Minke Whale in Sendai Bay Using Acoustic Descriptors and Environmental Information

Hiroshi NAGASHIMA^{*1}, Hiroto MURASE^{*2}, Shiroh YONEZAKI^{*3}, Ryuichi MATUKURA^{*4},
Kenji MINAMI^{*4}, Toshiyuki NAGAKI^{*5}, Shigeyuki KAWAHARA^{*3} and Kazushi MIYASHITA^{*4}

キーワード：計量魚探，魚種判別，判別分析

春季の仙台湾周辺海域は、イカナゴ(*Ammodytes personatus*)、ツノナシオキアミ(*Euphausia pacifica*)、カタクチイワシ(*Engraulis japonicus*)が分布し、これら餌生物を求めて高次捕食者である海鳥や、キタオットセイ・ミンククジラ等の海産ほ乳類が来遊する。また、これらの餌生物は、沿岸漁船漁業の重要な漁獲対象資源になっていることから、本海域におけるこれらの分布生態に関する基礎情報を得ることは、広く生態系保全の視点から海洋生物資源の持続的利用のあり方を解明するために重要な事項である。報告者らは、2005年から第2期北西太平洋鯨類捕獲調査(JARPNII沿岸域)三陸沖鯨類捕獲調査の一環として、毎年春季に同海域において計量魚探・中層トロール・表層環境計測・CTD海洋観測による鯨類餌環境調査を実施し、餌生物の分布状況や現存量、海洋環境に関する情報を収集してきた。

計量魚探は広範囲な魚群の分布状況や現存量を把握する手法として優れているが、超音波によるリモートセンシングのため、計測している対象魚種の判別は中層トロール等による直接採集で確認する必要がある。音響探査で得られた魚群反応総てについてこの確認作業を行うこ

とは事実上不可能であることから、実際のデータ解析では、直接採集で確認されなかったエコーグラム上の魚群反応について、調査海域・調査時期・魚群形状・反応水深・水温等の環境情報を参考にしながら、調査員の経験に基づいて魚種判別が行われる。この魚種判別作業を客観的に行うために、対象魚種の物理的な音響特性に基づく多周波計測や、分布環境・生態特性に基づくADCPと計量魚探を組み合わせた魚群遊泳速度計測等により得られた具体的な計測値により、判別分析やニューラルネットワークを利用した魚種判別が試みられている¹⁾。

本海域における調査でも、鯨類餌生物として重要な前述の3種について、鰯の有無による魚群超音波後方散乱強度差によるカタクチイワシと他の2種との識別や、無鰯魚であるイカナゴやプランクトンであるツノナシオキアミの体長による周波数差特性^{2,3)}等を利用して魚種判別を行ってきた。しかし、イカナゴ当歳魚とツノナシオキアミは音響物理的な特性が似ており、イカナゴ当歳魚とイカナゴ成魚は同じ種で生物・生態特性が似ていることから、この3群の魚種判別は、エコーグラム上での魚群形状や出現水深、海域の海況情報に基づく経験的判別に頼らざるを

^{*1}水産研究開発センター、^{*2}財団法人日本鯨類研究所、^{*3}独立行政法人水産総合研究センター遠洋水産研究所、

^{*4}独立学校法人北海道大学北方生物圏フィールド科学センター、^{*5}仙台地方振興事務所

得ない状況にある。

そこで、調査の効率化と調査結果の客観性を高めるために、本研究では既往の知見や経験を参考にしながら、春季仙台湾周辺海域での音響調査における魚種判別手法について、現在実施している調査で得られる観測データを使った判別分析により検討を行い、高精度の判別方法を開発したので報告する。

材料と方法

本研究の判別対象群は、春季仙台湾周辺海域において優占種として分布し、その音響特性が似ているイカナゴ当歳魚、イカナゴ成魚、ツノナシオキアミの2種3群とした。同じく優占種である有鰹魚のカタクチイワシは、周波数120kHzの平均体積散乱強度が-56dBから-42dBで、明確に他の群と識別できることから、本解析には含めなかった。

解析に使用したデータは、宮城県漁業調査指導船拓洋丸により、2005年4月及び2006年4月に実施した仙台湾周辺海域鯨類餌環境調査のうち、2005年4月12日から4月24日に実施した魚種確認中層トロール11例、2006年4月11日から4月26日に実施した5例である。いずれも判別対象群の単一構成魚群と思われる採集結果が得られたもので、魚群が十分に形成される昼間のみ行った(6時58分から15時07分の間)。調査位置を図1に示した。使用した中層トロール網は、水中曳網時網口幅7m・網口高さ10mで、3から4ノットで曳網した。曳網中はネットレコーダにより網口水深を確認しながら、判別対象群の分布水深に曳網層を合わせた。音響計測はシムラッド社のEK500を使用

し、中層トロール曳網時に計測した38kHz, 120kHz(両者共にスプリットビーム)の2周波記録データを解析に使用した。各年共に、調査前に石巻湾内の平穏海域において、シムラッド社マニュアルに基づいて基準球によるキャリブレーションを行った。調査時には表層環境モニタリングシステム(CT&C社)により1分毎の表層水温、塩分、クロロフィルa濃度を記録した。

音響データの解析は、専用ソフトウェアであるエコービューver.3.5(ソナーデータ社)を使用した。エコグラム上の魚群抽出は、同ソフトのスクールモジュールを使用し、魚群形状の計測も同モジュールによった。魚群抽出や魚群形状計測に当たっては、解析時の音響強度閾値のレベルが最も重要な検討事項となることから、魚種確認調査で得られた判別対象群の内、イカナゴ当歳魚8魚群、イカナゴ成魚4魚群、ツノナシオキアミ11魚群について、

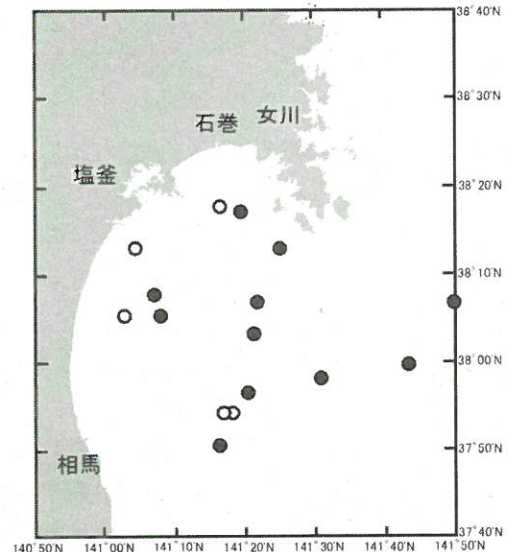


図1 調査位置

●は2005年調査位置、○は2006年調査位置を示す。

表1 魚群特性変数と単位

変数	略号	備考
1 魚群エネルギーに関する変数 平均体積散乱強度(120kHz) dB 平均体積散乱強度(38kHz) dB	MVBS120 MVBS38	ビーム幅・パルス幅による音響形状歪補正済 同上
2 魚群形状に関する変数 魚群周囲長 m	PERIMETER	ビーム幅・パルス幅による音響形状歪補正済
3 魚群分布水深に関する変数 魚群平均分布高度の水深比	ALTITUDE	高度:海底から魚群までの距離
4 魚群分布環境に関する変数 魚群中央位置の表層水温 °C 魚群中央位置の表層塩分 PSU 魚群中央位置の表層クロロフィルa濃度 mg/m ³	TEMP SAL CHLORO	

120kHzにおける魚群域面積散乱強度の閾値による感度試験(-100dBから-30dB)を行い、その結果を参考にエコグラム上でプランクトンによる反応が十分に無くなる-70dBを閾値とした。同時に、この閾値による音響計測上の影響を検討した。また、今回はツノナシオキアミと確認された中層トロール曳網海域全域にわたる帯状反応や、海底直上の層状反応は、解析対象から除外した。

従来⁴⁾の研究報告や本海域での調査経験に基づき、魚群特性を説明する変数は、魚群の音響エネルギーに関する2変数、魚群形状に関する1変数、魚群の分布水深に関する1変数、魚群分布域の環境に関する3変数の計7変数とした(表1)。これらの内、魚群形状に関する変数及び変数を算出する際に魚群形状が使われる音響エネルギーに関する変数については、エコービューにより超音波ビーム幅、パルス幅による計測歪を補正した値を使用した。また、判別対象群であるイカナゴ当歳魚(無鰓魚、魚群平均体長3.0~4.6cm)、イカナゴ成魚(無鰓魚、1歳魚以上、魚群平均体長11.1~15.5cm)、ツノナシオキアミ(魚群平均全長1.8~2.0cm)の音響特性を考慮し、魚群形状に関する変数、魚群の分布水深に関する変数は、周波数120kHzの音響計測値によった。環境に関する変数については、表層環境モニタリングシステム計測値の内、抽出された魚群中央位置における表層水温、塩分、クロロフィルa濃度をそれぞれの変数値とした。

エコービューにより抽出された魚群の内、D-GPSで計測した中層トロールワーブセット位置(採集開始位置)、揚網開始位置(採集終了位置)を基に、船底送受波器から船尾までの水平距離、ワーブ長、網口水深、網口高さから推定した中層トロール曳網空間内の魚群で、かつ設定した7つの魚群特性変数値が総て得られた魚群は286ケースであった(内、イカナゴ当歳魚227ケース、イカナゴ成魚20ケース、ツノナシオキアミ39ケース)。イカナゴ当歳魚が他の判別対象群に比べてケース数が多かったことから、無作為に50ケースを抽出して、他の判別対象群全ケースと共に判別分析のトレーニングデータとした(計109ケース)。

魚群形状に関する変数である魚群周囲長については、パラメトリックな判別分析の前提条件であるデータの正

規性に近づけるために、常用対数に変換した値を用いた。

判別分析は、判別対象群の平均の差、及び分散・共分散行列の同等性を検討した後、2次の判別関数を求めて、その判別率の中率を調べた。また、マハラノビス汎距離による判別も検討し、実際の調査現場で判別を行う際に問題となる、観測データを判別対象群以外として保留する方法について検討した。さらに、マハラノビス汎距離による判別で、トレーニングデータとして使用しなかったイカナゴ当歳魚177ケースについて判別を行い、その判別率の中率を確認した。解析にあたっては、統計ソフトウェアのシスタットver.7及びエクセル2003を使用した。

結 果

1 音響強度閾値の感度試験

判別対象群の標本魚群を使った魚群域面積散乱強度の閾値による感度試験結果を図2に示した。閾値-100dBでの魚群面積散乱強度を100%として、-30dBまで1dB間隔で閾値を上げたときに強度がどのように減少するかを示している。イカナゴ当歳魚は8魚群総て閾値-69dBから面積散乱強度が減少した。イカナゴ成魚も同様に、4魚群総て-69dBから減少した。ツノナシオキアミは11魚群総て-79dBから減少した。閾値-70dBにおけるツノナシオキアミ11魚群の面積散乱強度は、全エネルギー量の90.4%から99.8%であった。

2 判別対象群の平均差、分散共分散行列の同等性

解析に使用した7変数について、判別対象群別の平均値及び標準誤差を表2に示した。この7変数による判別対象群の特性の間に差がない場合は判別が不可能なので、始めに群間の平均差についてウィルクスの Λ 統計量を使って検定を行った(帰無仮説:群間に差がない)。今回のトレーニングデータによるウィルクスの Λ は0.122となり、この統計量に相当する近似F値による検定では、有意水準0.1%で帰無仮説は棄却され、判別対象群間には差があると推定された($F_0=26.61 > F(14,200; 0.001)=2.74$)。また、2群間の差をF値で直接調べた結果を表3に示した。いずれの組み合わせでも有意水準0.1%で有意差が認められた。

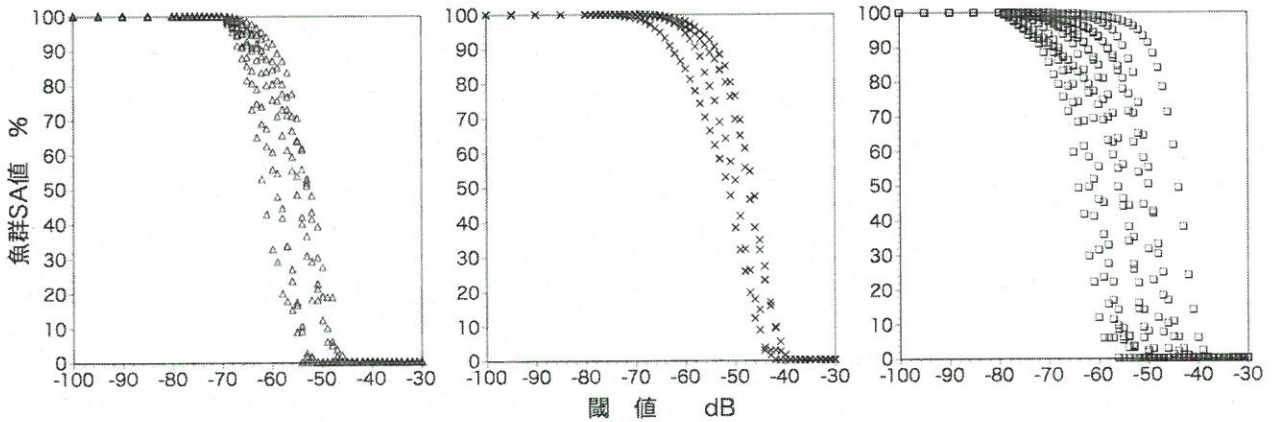


図2 標本魚群面積散乱強度 S_A の閾値による感度試験結果
 左図：イカナゴ当歳魚 中図：イカナゴ成魚 右図：ツノナシオキアミ

表2 判別対象群別の魚群特性変数平均値と標準誤差

魚種 ケース数	イカナゴ当歳魚 50		イカナゴ成魚 20		ツノナシオキアミ 39	
	平均値	標準誤差	平均値	標準誤差	平均値	標準誤差
MVBS120	-67.2	0.85	-60.6	1.17	-61.8	0.90
MVBS38	-88.1	1.83	-63.1	2.61	-74.4	1.15
* PERIMETER	0.9	0.06	1.5	0.10	1.7	0.08
ALTITUDE	0.6	0.02	0.3	0.05	0.4	0.01
TEMP	9.0	0.16	10.0	0.06	9.1	0.13
SAL	32.7	0.04	33.0	0.05	33.2	0.03
CHLORO	4.3	0.41	1.9	0.14	2.8	0.08

*常用対数変換値

表3 判別対象群間のF値

判別対象群	イカナゴ当歳魚	イカナゴ成魚	ツノナシオキアミ
イカナゴ当歳魚	0.00		
イカナゴ成魚	29.50***	0.00	
ツノナシオキアミ	46.55***	11.15***	0.00

***有意水準0.1%で有意

次に、判別方法を選択する際に重要となる、判別対象群間の分散共分散行列の同源性について、ボックスのM統計量で検定を行った（帰無仮説：各群の分散共分散行列は等しい）。トレーニングデータによるボックスのM値は605.99となり、この統計量に相当するカイ2乗値による検定では、有意水準0.1%で帰無仮説は棄却され、各群の分散共分散行列は等しいとは言えないと推定された ($\chi_0^2=539.01 > \chi^2(56; 0.001)=94.46$)。一般に使われる1次の線形判別関数は、群間の等分散性を前提条件にしていることから、判別方法としては2次判別関数によるか、マハラノビス汎距離による方法が妥当と考えられた。

3 2次判別関数による判別

トレーニングデータから求められた各判別対象群の2次判別関数の係数を表4に、判別の中率を表5に示した。この2次判別関数により全ケースから求めた判別の中率は、各群共に100%となった。判別対象として選んだ任意の1ケースの観測値を除いた108ケースから判別関数を構成し、得られた判別関数を使って除いた1ケースの判別を行うジャックナイフ法による的中率の評価では、イカナゴ当歳魚、ツノナシオキアミは的中率が100%になったが、イカナゴ成魚は90%となり、20ケース中2ケースがイカナゴ当歳魚に誤判別された。

表4 各判別対象群の2次判別関数係数

イカナゴ当歳魚	MVBS120	MVBS38	PERIMETER	ALTITUDE	TEMP	SAL	CHLORO	定数
MVBS120	-0.011							
MVBS38	0.003	-0.003						
PERIMETE	0.046	0.100	-3.350					
ALTITUDE	0.221	-0.120	-5.437	-30.239				
TEMP	0.017	-0.011	1.350	9.326	-2.013			
SAL	0.057	-0.139	7.255	0.032	1.282	-33.717		
CHLORO	-0.009	-0.001	0.582	2.709	-1.093	-4.946	-0.416	
定数	-3.318	4.324	-231.112	-53.631	-7.282	2199.530	172.375	-36096.000

イカナゴ成魚	MVBS120	MVBS38	PERIMETER	ALTITUDE	TEMP	SAL	CHLORO	定数
MVBS120	-0.045							
MVBS38	0.020	-0.006						
PERIMETE	0.556	0.023	-4.907					
ALTITUDE	-0.707	-0.159	2.325	-84.265				
TEMP	-0.032	-0.055	-6.665	-102.480	-38.335			
SAL	0.554	0.016	-3.184	74.603	40.749	-22.593		
CHLORO	-0.167	0.043	1.137	-1.498	-0.305	1.552	-0.824	
定数	-22.562	0.401	218.930	-1450.970	-548.928	1102.500	-53.878	-16058.200

ツノナシオキアミ	MVBS120	MVBS38	PERIMETER	ALTITUDE	TEMP	SAL	CHLORO	定数
MVBS120	-0.038							
MVBS38	0.043	-0.027						
PERIMETE	0.174	0.271	-4.101					
ALTITUDE	-1.119	-0.200	6.389	-169.010				
TEMP	0.024	0.106	-5.584	-20.774	-17.490			
SAL	1.362	-0.606	-28.673	-43.816	-275.216	-1182.860		
CHLORO	0.548	-0.470	-4.268	-13.604	-60.675	-541.381	-64.603	
定数	-48.273	18.733	1057.290	1729.190	9655.740	82692.500	18905.100	-1445570.000

表5 2次判別関数による判別的中率

全ケースによる判別の中率

グループ名	判別された群			合計	ケース数	的中率%
	イカナゴ当歳魚	イカナゴ成魚	ツノナシオキアミ			
社 心 監 視	イカナゴ当歳魚	50	0	0	50	100
	イカナゴ成魚	0	20	0	20	100
	ツノナシオキアミ	0	0	39	39	100
	合計	50	20	39	109	100

ジャックナイフ法による判別の中率

グループ名	判別された群			合計	ケース数	的中率%
	イカナゴ当歳魚	イカナゴ成魚	ツノナシオキアミ			
社 心 監 視	イカナゴ当歳魚	50	0	0	50	100
	イカナゴ成魚	2	18	0	20	90
	ツノナシオキアミ	0	0	39	39	100
	合計	52	18	39	109	98

4 マハラノビスの汎距離による判別

次に、判別群間の等分散性が成り立たない時に使われる、マハラノビスの汎距離による判別を行った。これは、各判別対象群のケースが7次元正規母集団から抽出されたと仮定して、未知の観測値と各判別対象群母平均との差の2乗を、それぞれの母分散共分散行列で標準化した距離を求め(マハラノビスの汎距離)、その距離が最小となる群に属すると判定する方法である。あるj群からの汎距離は、以下で与えられる。

表6 マハラノビスの汎距離計算に必要な特性値

イカナゴ当歳魚
母平均推定量

変数	MVBS120	MVBS38	PERIMETER	ALTITUDE	TEMP	SAL	CHLORO
標本平均	-67.225	-88.134	0.852	0.560	8.979	32.690	4.288

母分散共分散行列推定量の逆行列(標本不偏分散共分散行列の逆行列)

変数	MVBS120	MVBS38	PERIMETER	ALTITUDE	TEMP	SAL	CHLORO
MVBS120	0.044	-0.007	-0.091	-0.442	-0.035	-0.114	0.018
MVBS38	-0.007	0.012	-0.200	0.240	0.023	0.278	0.002
PERIMETER	-0.091	-0.200	13.401	10.874	-2.700	-14.509	-1.163
ALTITUDE	-0.442	0.240	10.874	120.957	-18.653	-0.064	-5.419
TEMP	-0.035	0.023	-2.700	-18.653	8.052	-2.565	2.186
SAL	-0.114	0.278	-14.509	-0.064	-2.565	134.868	9.892
CHLORO	0.018	0.002	-1.163	-5.419	2.186	9.892	1.664

イカナゴ成魚
母平均推定量

変数	MVBS120	MVBS38	PERIMETER	ALTITUDE	TEMP	SAL	CHLORO
標本平均	-60.597	-63.091	1.535	0.263	9.963	33.009	1.874

母分散共分散行列推定量の逆行列(標本不偏分散共分散行列の逆行列)

変数	MVBS120	MVBS38	PERIMETER	ALTITUDE	TEMP	SAL	CHLORO
MVBS120	0.181	-0.039	-1.111	1.414	0.064	-1.108	0.334
MVBS38	-0.039	0.024	-0.045	0.318	0.109	-0.031	-0.085
PERIMETER	-1.111	-0.045	19.627	-4.649	13.330	6.368	-2.273
ALTITUDE	1.414	0.318	-4.649	337.060	204.961	-149.206	2.995
TEMP	0.064	0.109	13.330	204.961	153.339	-81.499	0.611
SAL	-1.108	-0.031	6.368	-149.206	-81.499	90.372	-3.103
CHLORO	0.334	-0.085	-2.273	2.995	0.611	-3.103	3.295

ツノナシオキアミ
母平均推定量

変数	MVBS120	MVBS38	PERIMETER	ALTITUDE	TEMP	SAL	CHLORO
標本平均	-61.762	-74.419	1.707	0.418	9.139	33.200	2.822

母分散共分散行列推定量の逆行列(標本不偏分散共分散行列の逆行列)

変数	MVBS120	MVBS38	PERIMETER	ALTITUDE	TEMP	SAL	CHLORO
MVBS120	0.150	-0.085	-0.347	2.238	-0.047	-2.723	-1.097
MVBS38	-0.085	0.107	-0.543	0.401	-0.212	1.212	0.941
PERIMETER	-0.347	-0.543	16.403	-12.779	11.169	57.347	8.536
ALTITUDE	2.238	0.401	-12.779	676.043	41.550	87.644	27.210
TEMP	-0.047	-0.212	11.169	41.550	69.959	550.440	121.352
SAL	-2.723	1.212	57.347	87.644	550.440	4731.516	1082.778
CHLORO	-1.097	0.941	8.536	27.210	121.352	1082.778	258.415

表7 トレーニングデータのマハラノビス汎距離とその判別結果

ケースNO	観測群	各判別対象群母平均推定量から観測値までのマハラノビス汎距離			汎距離最小値	判別群		
		イカナゴ当歳魚	イカナゴ成魚	ツノナシオキアミ		イカナゴ当歳魚	イカナゴ成魚	ツノナシオキアミ
1	イカナゴ当歳魚	2.4	52.6	524.8	2.4	*		
2	"	5.2	700.6	1098.2	5.2	*		
3	"	27.9	1066.1	1106.5	27.9			
4	"	6.9	70.9	445.2	6.9	*		
5	"	4.2	741.6	1146.9	4.2	*		
6	"	6.3	706.5	1198.1	6.3	*		
7	"	8.9	133.3	1876.2	8.9	*		
8	"	2.5	75.7	645.6	2.5	*		
9	"	12.0	258.8	779.1	12.0	*		
10	"	4.1	39.5	472.4	4.1	*		
11	"	3.9	60.1	569.3	3.9	*		
12	"	21.6	528.3	1652.1	21.6			
13	"	6.3	122.4	1737.4	6.3	*		
14	"	5.1	80.3	1637.7	5.1	*		
15	"	6.5	815.5	1394.9	6.5	*		
16	"	6.3	699.9	981.3	6.3	*		
17	"	7.5	703.0	1273.1	7.5	*		
18	"	7.9	80.1	475.1	7.9	*		
19	"	2.5	63.1	487.4	2.5	*		
20	"	6.8	113.8	1698.3	6.8	*		
21	"	9.6	800.9	1097.4	9.6	*		
22	"	2.4	41.5	467.8	2.4	*		
23	"	5.5	68.5	306.4	5.5	*		
24	"	2.9	35.1	456.6	2.9	*		
25	"	3.2	50.0	274.2	3.2	*		
26	"	4.9	73.3	517.7	4.9	*		
27	"	9.4	105.8	1843.9	9.4	*		
28	"	5.3	764.9	924.7	5.3	*		
29	"	5.1	62.2	369.0	5.1	*		
30	"	6.9	679.8	234.7	6.9	*		
31	"	7.7	29.8	435.2	7.7	*		
32	"	7.1	62.3	1586.1	7.1	*		
33	"	6.5	337.5	1145.9	6.5	*		
34	"	3.5	30.5	436.1	3.5	*		
35	"	10.6	311.9	826.5	10.6	*		
36	"	6.7	823.9	1067.5	6.7	*		
37	"	6.7	83.5	1751.2	6.7	*		
38	"	8.1	573.9	297.2	8.1	*		
39	"	7.7	797.1	444.5	7.7	*		
40	"	7.5	321.1	925.9	7.5	*		
41	"	5.9	785.9	748.1	5.9	*		
42	"	3.3	44.3	514.1	3.3	*		
43	"	6.3	64.3	512.2	6.3	*		
44	"	10.6	41.0	330.8	10.6	*		
45	"	7.1	778.1	1117.5	7.1	*		
46	"	7.2	130.2	1698.8	7.2	*		
47	"	2.9	65.1	556.7	2.9	*		
48	"	7.4	20.8	395.8	7.4	*		
49	"	4.0	69.7	591.8	4.0	*		
50	"	6.6	770.3	329.8	6.6	*		
51	イカナゴ成魚	12.6	10.3	1547.6	10.3	*	*	
52	"	21.9	9.0	1128.4	9.0		*	
53	"	30.2	5.7	631.4	5.7		*	
54	"	36.4	9.5	513.6	9.5		*	
55	"	34.4	2.1	536.4	2.1		*	

マハラノビス汎距離の最小値群(判別群)

* 各判別対象群の平均を中心とした7次元99%等確率偏差楕円範囲に入るもの

表7 トレーニングデータのマハラノビス汎距離とその判別結果(続き)

ケースNO	観測群	各判別対象群平均から観測値までのマハラノビス汎距離			汎距離最小値	判別群		
		イカナゴ当歳魚	イカナゴ成魚	ツノナシオキアミ		イカナゴ当歳魚	イカナゴ成魚	ツノナシオキアミ
56	イカナゴ成魚	34.0	2.1	597.4	2.1		*	
57	"	41.6	3.0	613.7	3.0		*	
58	"	42.5	1.9	497.1	1.9		*	
59	"	39.4	6.3	502.7	6.3		*	
60	"	40.2	6.1	521.6	6.1		*	
61	"	52.6	11.3	539.1	11.3		*	
62	"	27.2	3.1	492.7	3.1		*	
63	"	29.8	2.2	495.8	2.2		*	
64	"	18.6	7.9	1888.1	7.9		*	
65	"	10.7	6.3	1980.0	6.3	*	*	
66	"	7.1	9.6	1984.1	7.1	*	*	
67	"	26.4	10.3	1922.6	10.3		*	
68	"	71.9	12.3	634.8	12.3		*	
69	"	53.9	7.1	235.9	7.1		*	
70	"	57.6	7.1	235.5	7.1		*	
71	ツノナシオキアミ	20.0	20.4	5.7	5.7			*
72	"	21.8	40.2	9.1	9.1			*
73	"	15.8	18.7	5.8	5.8	*		*
74	"	15.3	21.6	4.8	4.8	*		*
75	"	13.4	14.4	7.8	7.8	*	*	*
76	"	11.4	13.6	4.6	4.6	*	*	*
77	"	8.6	12.4	7.0	7.0	*	*	*
78	"	12.4	21.0	9.0	9.0	*		*
79	"	19.9	30.6	6.7	6.7			*
80	"	14.2	15.1	3.4	3.4	*	*	*
81	"	9.8	10.0	10.2	9.8	*	*	*
82	"	15.4	19.8	5.0	5.0	*		*
83	"	19.8	21.7	6.2	6.2			*
84	"	12.3	14.8	6.8	6.8	*	*	*
85	"	11.9	26.6	8.8	8.8	*		*
86	"	14.4	24.5	6.3	6.3	*		*
87	"	11.7	12.0	5.3	5.3	*	*	*
88	"	11.1	10.4	4.8	4.8	*	*	*
89	"	12.7	21.8	9.1	9.1	*		*
90	"	26.3	15.8	6.5	6.5		*	*
91	"	23.5	13.5	5.5	5.5		*	*
92	"	24.7	21.4	6.2	6.2			*
93	"	22.2	23.8	8.3	8.3			*
94	"	26.3	23.6	6.0	6.0			*
95	"	22.1	13.0	7.6	7.6		*	*
96	"	21.7	20.3	3.8	3.8			*
97	"	29.2	38.9	12.0	12.0			*
98	"	24.8	27.8	5.9	5.9			*
99	"	26.6	21.2	4.4	4.4			*
100	"	87.6	786.3	9.8	9.8			*
101	"	86.4	764.1	6.8	6.8			*
102	"	92.7	724.1	9.8	9.8			*
103	"	95.1	680.5	5.3	5.3			*
104	"	81.1	718.1	6.5	6.5			*
105	"	105.5	680.1	9.8	9.8			*
106	"	86.9	659.6	5.3	5.3			*
107	"	89.5	707.0	4.8	4.8			*
108	"	93.3	731.9	3.8	3.8			*
109	"	93.5	716.9	11.7	11.7			*

マハラノビス汎距離の最小値群(判別群)
 * 各判別対象群の平均を中心とした7次元99%等確率偏差楕円範囲に入るもの

$$d_j^2 = (x - \mu_j)^T \Sigma_j^{-1} (x - \mu_j)$$

ここで、

d_j^2 j群からのマハラノビスの汎距離

$x = (x_1, x_2, \dots, x_7)^T$ 未知の7変数観測値ベクトル

$\mu_j = (u_1, u_2, \dots, u_7)^T$ j群の7変数母平均ベクトル

Σ_j^{-1} j群の7変数母分散共分散行列の逆行列

母平均、母分散共分散行列は未知であるので、それぞれの不偏推定量であるトレーニングデータの標本平均（以下、重心と呼ぶ）、標本不偏分散共分散行列の逆行列を求め（表6）、トレーニングデータ各ケースの汎距離を計算して、最小値による判別を行った（表7）。

判別の結果、イカナゴ当歳魚は的中率が100%となったが、イカナゴ成魚は1ケースがイカナゴ当歳魚と誤判別され（的中率95%）、ツノナシオキアミも1ケースがイカナゴ当歳魚と誤判別された（的中率97%）。全体の的中率は98%であった。ツノナシオキアミの誤判別ケース（ケースNO.81）の場合は、3群の汎距離がほぼ等しい結果になっていた。

マハラノビスの汎距離による判別方法の利点として、各判別対象群の母集団が7次元正規分布をする場合、その母平均からのマハラノビス汎距離は自由度7のカイ2乗分布をすることが挙げられる。この特性を利用して、任意の確率でデータが含まれる範囲（7次元等確率偏差楕円）のマハラノビス汎距離を求めることができる（表8）。トレーニングデータについて、各判別対象群の重心を中心とした7次元99%等確率偏差楕円範囲（ $d^2 \leq 18.5$ 以下、99%範囲と呼ぶ）に入るケースを表7に示した。イカナゴ

成魚、ツノナシオキアミは、最小汎距離で判別されたケースは総て99%範囲に入ったが、イカナゴ当歳魚では同方法で判別された全ケースの内、2ケースは99%範囲に入らなかった。99%範囲に入らないケースを判別保留とした場合のマハラノビスの汎距離による最終的な判別の中率を表9に示した。イカナゴ当歳魚の判別の中率は96%、イカナゴ成魚は95%、ツノナシオキアミは97%となり、全体的中率は96%になった。

トレーニングデータとして使用しなかったイカナゴ当歳魚177ケースについて、マハラノビスの汎距離で判別を行い、その判別の中率を確認した（表10）。結果として総てのケースでイカナゴ当歳魚群重心からの汎距離が最小となったが、その内99%範囲に入ったものは164ケースで、他の13ケースは99%範囲外になり判別保留と判断された（的中率93%）。保留となったイカナゴ当歳魚ケースの特性について検討するため、トレーニングデータでの保留のケースも合わせて、変数別に99%範囲内のケースとの比較を行った。保留ケースのデータ分布が一部の变数で正規分布から偏っていたことから、ノンパラメトリックな手法である、マン・ホイットニのU検定を行った。結果として、時空間が同じ標本であることから魚群分布水深に関する変数、魚群分布環境に関する変数では有意差が検出されなかった。魚群エネルギーに関する変数の内120kHz平均体積散乱強度が有意水準0.1%で有意差があり、保留群の値が特に大きくなった。また、38kHz平均体積散乱強度が有意水準5%で有意差があり、保留群の値が大きくなった。さらに、魚群形状に関する変数が有意水準1%で有意差があり、保留群の値が小さくなった。

表8 7次元等確率偏差楕円のマハラノビス汎距離

存在確率(%)	マハラノビス汎距離
80	9.8
85	10.7
90	12.0
95	14.1
99	18.5

表9 マハラノビス汎距離によるトレーニングデータの判別の中率

グループ名	判別された群				合計	的中率%
	イカナゴ当歳魚	イカナゴ成魚	ツノナシオキアミ	保留		
イカナゴ当歳魚	48	0	0	2	50	96
イカナゴ成魚	1	19	0	0	20	95
ツノナシオキアミ	1	0	38	0	39	97
合計	50	19	38	2	109	96

* 保留は、汎距離の最小群が決まっても、その7次元99%等確率偏差楕円範囲外になったもの

表10 マハラノビス汎距離によるイカナゴ当歳魚テストデータの判別の中率

グループ名	判別された群				合計	的中率%
	イカナゴ当歳魚	イカナゴ成魚	ツノナシオキアミ	保留		
実際の群 イカナゴ当歳魚	164	0	0	13	177	93

* 保留は、汎距離の最小群がイカナゴ当歳魚と決まっても、その7次元99%等確率偏差楕円範囲外になったもの

5 正準変量によるデータの分布と変数の評価

7変数による7次元空間内のトレーニングデータの分布を視覚的に把握することは不可能なので、7変数の特性を直交する2つの正準変量に集約した。正準変量は、7変数を使った1次線形の合成変量で、群間変動に対する群内変動の比を最大にする条件で線形式の重み（係数）が決められている。この線形式により計算された正準得点は、群内のデータ分布のばらつきが最小に、群の重心間のばらつきが最大になるように写像変換されることから、群の判別が最も効果的になる判別空間内に分布する（図3）。

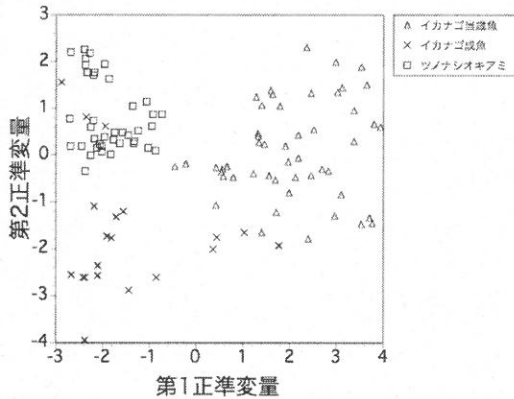


図3 正準得点分布図

この図から、イカナゴ当歳魚の正準得点は、分散の程度が大きいものの他の2群と分布の重心が離れていることから、明瞭に判別できることが分かる。イカナゴ成魚の正準得点は、分布のまとまりが明瞭に見られず、分散の程度も大きく、一部は他の2群と分布が重なっていることが見てとれる。ツノナシオキアミの正準得点は分散の程度が小さく、重心の周辺にまとまった分布をしていることが分かる。この様な判別空間上の分布特性は、7次元空間上でのマハラノビス汎距離の判別結果にも明瞭に出ている（表7）。イカナゴ当歳魚群の重心は他の2群から離れていることから、イカナゴ当歳魚のケースは、他の2群の重心からの汎距離が99%範囲には入らず、総てのケースでイカナゴ当歳魚群重心からの汎距離が最小になった。イカナゴ成魚群のケースでは、イカナゴ当歳魚群と分布が一部重なっていることや、両群の分布のばらつきが大きいことから、イカナゴ当歳魚群重心との汎距離が最小になるケースや、成魚群重心からの汎距離が最小になる

が、当歳魚群重心からの汎距離も99%範囲に入るケースが見られた。ツノナシオキアミ群のケースでは、分布のばらつきが小さいことから、ほとんどのケースで同群の重心からの汎距離が最小になったが、他の2群のばらつきが大きいことから、それらの重心からの汎距離も99%範囲に入るケースが多くみられた。

前述のとおり、今回は各群の分散共分散行列が同等とは言えないことから、1次線形モデルに基づく正準変量は判別に適用できないが、変数の重みを比較するために、各変数の群内分散が1となるように基準化した各正準変量の1次線形式係数と、各正準変量の固有値、正準相関係数、累積寄与率を表11に示した。第1正準変量の寄与率が83%と大きいことから、その係数を各変数間で比較すると、魚群中央位置の表層塩分や表層クロロフィルa濃度などの魚群分布環境に関する変数の係数が大きく、次いで魚群分布水深に関する変数、魚群形状に関する変数の係数が続き、魚群エネルギーに関する変数の係数が最も小さい結果になった。

表11 分散で基準化した正準変量特性値

変数	第1正準変量	第2正準変量
MVBS120	0.11	0.17
MVBS38	-0.19	-0.89
PERIMETER	-0.25	0.42
ALTITUDE	0.76	0.09
TEMP	-0.60	-0.09
SAL	-1.59	0.87
CHLORO	-1.32	1.22
固有値	3.65	0.76
正準相関係数	0.89	0.66
累積寄与率	0.83	1.00

考 察

実際に仙台湾周辺海域で収録した音響データの解析では、閾値-70dBからプランクトン反応が除かれ魚群の形状が明確になることから、なるべく低い閾値で魚群形状を確定するには-70dBが妥当な値であると言える。この値の場合、イカナゴ魚群の後方散乱エネルギーは損失することなく解析できるが、ツノナシオキアミでは一部のエネルギーが失われるものの、その割合は10%未満であると推定された。

本研究では、判別対象群の分散共分散行列が等しくないと推定されたことから、判別分析の方法として2次判別関数による場合と、マハラノビスの汎距離による場合を検討した。2次判別関数の場合では、全ケースを使った判別の中率が100%となり良好な結果になったが、一般にトレーニングデータのケース数が少なく、項が多い2次の判別関数を適用すると、高い判別の中率が得られることが知られている。しかし、その結果は選択したトレーニングデータに大きく依存したものであり、得られた判別関数を使って他のデータを判別した際の中率は、下がる場合が多い。また、今回の判別対象群は春季仙台湾周辺海域の優占種ではあるが、音響調査で得られた魚群反応の総てをこの3群のどれかに判別してしまうことは、現実的ではない。観測データの判別を3群以外として保留する客観的な基準が実務上必要となる。この点から判別の中率は2次判別関数より劣るものの、マハラノビスの汎距離による判別が、実用上価値があると思われる。

今回検討した判別方法では、イカナゴ成魚の判別の中率が他の2群に比べて低くなり、イカナゴ当歳魚に誤判別された。正準得点の分布(図3)を見ても、イカナゴ成魚群の判別空間上でのばらつきが大きいことが分かる。このことは、選択した魚群特性変数では完全な差を識別できないことを示している。今後イカナゴ成魚群の判別の中率を高めるためには、他の2群との差を際立たせる新たな視点による変数の導入が必要である。また、イカナゴ成魚は他の2群と比べ、魚群平均体積散乱強度の標準誤差が大きい(表2)。無鰭魚であるイカナゴ成魚は、遊泳姿勢により後方散乱強度が変化することが知られていることから³⁾、今後は遊泳角度の影響を十分検討することが、正確なTS推定と共に、魚種判別精度を向上させるためにも重要であると思われる。さらに、中層トロール曳網域に両群が混在しており、実際は当歳魚の魚群を成魚としたトレーニングデータ自体の誤りの可能性もあることから、魚種確認中層トロールの採集精度向上も今後の検討事項である。

今回保留と判断されたイカナゴ当歳魚の一部のケースについては、120kHzの平均体積散乱強度が特に大きく、魚群形状が小さい特性があることが分かった。このこと

から、平均体長が小さいイカナゴ当歳魚の密集群である可能性や、中層トロールでは採集されなかった未確認の魚種(もしくはプランクトン)である可能性が考えられ、その判断は今後の課題である。

各変数の判別にあたっての重みを検討するために、参考として基準化した第1正準変量の1次線形式係数を比較した結果、判別には魚群分布環境に関する変数や魚群分布水深に関する変数の役割が大きいことが推察された。Lawson他⁴⁾も、南アフリカ大陸棚での浮魚類の魚種判別において、音響計測で得られる情報だけではなく、出現位置・表面水温・現場水深・出現時刻等の補助的な情報を加えることで、判別の中率が增加することを報告している。今までの調査では、環境観測項目は魚種分布生態を把握するための補助情報としていたが、魚種判別という音響調査の基本的作業にあつては、最も重要な情報であることが認識された。特に、魚群分布環境に関する変数として使用した表層水温、塩分、クロロフィルa濃度は、各判別対象群の分布水塊指標として機能していると考えられた。これらは、計量魚探と同様に調査航走中連続データが自動計測・記録されることから、魚種判別に活用できることは、今後の調査効率の向上に十分寄与すると思われる。

今回の判別分析にあたっては、イカナゴ当歳魚群以外のトレーニングデータ数が少ないことや、毎年変動の大きい環境変数への依存度が高い結果となったことから、この判別方法をロバストにするためには、今後の調査によりトレーニングデータを増やして同化する必要がある。さらに、調査中に操業する沿岸漁船へのリアルタイムな漁況情報提供にも、迅速で客観的な魚種判別は不可欠な手段であることから、今回得られた判別方法を活用すると共に、その適用範囲の拡大に努めたい。

要 約

春季仙台湾周辺海域に分布する優占種であり、ミンククジラの餌生物として重要であると共に、沿岸漁船漁業の漁獲対象資源であるイカナゴ、ツノナシオキアミについて、計量魚探による音響調査時の魚種確認中層トロール採集で得られたデータを基に、魚群音響エネルギー・

形状・分布水深・分布環境に関する計測データから、魚探反応魚種を判別する方法を検討した。その結果、判別対象群の母平均推定量とのマハラノビスの汎距離が最短になる群を判別群とすることで、的中率が96%になる判別方法が得られ、今後の音響調査の効率化と客観性が高められた。

謝 辞

本調査の実施にあたり御協力頂いた、水産庁、遠洋水産研究所、日本鯨類研究所の職員の方々、北海道大学北方生物圏フィールド科学センター清水大介氏、安間洋樹氏に、心から感謝申し上げます。また、調査立案時には、調査総括である東京海洋大学加藤秀弘教授より有益なご助言を頂きました。ここに厚くお礼申し上げます。

本調査は、遠洋水産研究所、日本鯨類研究所および宮城県が共同で実施したものである。

参考文献

- 1) ICES Fisheries Technology Committee (2007) Species identification techniques for multispecies assessments, bycatch reduction and automated data processing, Report of the Working Group on Fisheries Acoustics Science and Technology, 48pp, 19-24
- 2) K. Miyashita, I. Aoki, K. Seno, K. Taki and T. Ogishima (1997) Acoustic identification of isada krill, *Euphausia pacifica* Hansen, off the Sanriku coast, north-eastern Japan, Fisheries Oceanography, 6:4, 266-271
- 3) 中川稜 (2003) 伊勢湾産イカナゴの音響資源評価, 東京大学大学院農学生命科学研究科 平成15年度修士論文, 78pp.
- 4) Gareth L. Lawson, Manuel Barange, and Pierre Freon (2001) Species identification of pelagic fish schools on the South African continental shelf using acoustic descriptors and ancillary information, ICES Journal of Marine Science, 58, 275-287

