

マッコウクジラの鳴音による
水中位置推定手法に関する研究

Underwater Localization of
Sperm Whales using Clicks

2010年2月

早稲田大学大学院基幹理工学研究科
情報理工学専攻 マルチメディアシステム研究

廣津 良

Ryo HIROTSU

目次

1	序論	1
1.1	本論文の背景と目的	1
1.2	本論文の概要	6
2	観測対象としてのマッコウクジラ	7
2.1	本章の概要	7
2.2	鯨類を取り巻く環境	7
2.3	マッコウクジラの特徴	9
2.3.1	学名と由来	9
2.3.2	生態	9
2.4	マッコウクジラの鳴音	10
2.4.1	鳴音の分類	11
2.4.2	bent-horn モデル	12
2.5	従来 of 観測手法	17
2.5.1	目視観測	17
2.5.2	音響観測	18
2.5.3	バイオロギング	18
2.5.4	音響とバイオロギングの複合観測	19
2.6	本章のまとめ	19

3	マッコウクジラ観測システム	21
3.1	本章の概要	21
3.2	観測システムの全体図	21
3.3	二基のハイドロフォンアレイによる水中測位	22
3.3.1	SBL システムによる方位推定の原理	23
3.3.2	LBL システムによる位置推定の原理	27
3.4	位置推定誤差	30
3.4.1	誤差の要因	30
3.4.2	位置推定誤差の見積もり	32
3.5	アレイの展開方法	34
3.6	自律型海中ロボット AUV による水中観測	35
3.6.1	AUV の特徴	36
3.6.2	Aqua Explorer 2000	37
3.7	本章のまとめ	39
4	位置推定手法	41
4.1	本章の概要	41
4.2	位置推定手法の全体図	41
4.3	各アレイでの方位推定とクラス分け	43
4.3.1	クリック検出	43
4.3.2	方位推定	46
4.3.3	クラス分け	48
4.4	クラスマッチングと位置推定	52
4.4.1	マッチングの問題点	53
4.4.2	全クラスマッチング	54
4.4.3	対応クラスの発見	56
4.5	リアルタイム性	56

目次	iii
4.6 本章のまとめ	57
5 計算機実験結果	59
5.1 本章の概要	59
5.2 2003年度小笠原実験	60
5.2.1 実験概要	60
5.2.2 観測機器	60
5.2.3 観測状況	63
5.2.4 解析データ	64
5.3 計算機実験環境	65
5.4 クリック検出結果	71
5.5 方位推定結果	74
5.6 クラス分け結果	74
5.7 クラスマッチング	80
5.7.1 候補クラスの決定	80
5.7.2 対応クラスの決定	81
5.8 位置推定結果	85
5.9 考察	86
5.9.1 マルチパス	88
5.9.2 スムージング	89
5.9.3 速度	90
5.9.4 クラスの結合	93
5.9.5 深度変化とICI	103
5.9.6 今後の課題	116
5.10 本章のまとめ	123
6 結論	125

iv	目次
謝辭	129
參考文獻	131
研究業績	143

第1章

序論

1.1 本論文の背景と目的

深海を行動する水中生物は、その観測手段が限られていることから未だ多くの謎に包まれている。マッコウクジラを例に挙げれば、彼らはクリックと呼ばれる鳴音を発し、水深 1000 メートル以上まで潜行して巨大な大王イカなどを捕食していることが分かっているが [19, 28, 38, 32, 65]、深海を自由に行動する彼らの潜水行動を観測することは非常に困難であるため、その生態には未知な部分が多い。またマッコウクジラはワシントン条約で保護されている絶滅危惧種であることから、低周波なアクティブソナーを用いて調査するといった生態に悪影響を与える恐れのある方法 [56] により観測することができない。このため、これまでは海面に浮上してきたわずかな時間に、船上からの目視による観測が主であった [43]。

近年、マッコウクジラのような、深海で行動し、鳴音を発する水中生物に対する観測手法として、データロガーを用いたバイオリギングと [5, 6, 4, 77]、複数のハイドロフォンを用いた音響観測が提案・実施されてきている [14, 39, 44, 48, 53, 63, 74, 75]。データロガーを用いたバイオリギングでは、深度計・傾斜計・加速度計等の複数の計測機器を搭載したデータロガーと呼ばれる機器を観測対象となる目標に吸着させる [23]。搭載した計測機器からのデータを内部の

メモリに記録させ、数時間から数日後にロガーを回収し、内部の機器データを解析することでその潜水行動を解明することを目的とする[5, 6, 4]。一方、複数のハイドロフォンを用いた音響観測では、それぞれのハイドロフォンに到来する鳴音の時間差を解析することで、位置を推定し、その潜水行動を明らかにする。同時に、各ハイドロフォンで確認された鳴音の波形や音圧の違いを解析することで、指向性などの音響的特徴も合わせて解明する。また、データロガーにハイドロフォンを搭載し、バイオロギングと音響観測を複合させた手法も提案されている[29, 62, 76, 80, 81, 82]。しかし、データロガーは着脱が非常に困難であり、生態に悪影響を与える可能性を否定することはできない。またデータロガーを用いた手法では限られた個体しか観測することができないため、群れでの行動特性を解明することは難しい。

柳澤研究室では、東京大学生産技術研究所浦研究室との共同研究の中で、自律型海中ロボット AUV(Autonomous Underwater Vehicle) と複数のハイドロフォンアレイを用いた水中生物への新しい観測手法を提案している[12, 60, 69, 70]。AUVにより、水中に行動する海洋生物への追跡調査を実現し、その生態を解明することができれば、深海に生息する生物への新しい観測手法と新しい AUV の運用法を確立することができる。AUV は遠隔無人探査機 ROV(Remote Operated Vehicle) や有人潜水艇と異なり、アンビリカルケーブルにより母船と繋がっておらず音響通信と自動制御プログラムにより自身の取るべき行動を決定し、一般的には海底ケーブルの調査、海底面の計測、海底資源の探索などに用いられる[13, 15, 20, 26, 30]。

本研究では、観測対象としてマッコウクジラを選択し、30cm の間隔で格子状に配置された 4 つのハイドロフォンで構成されるハイドロフォンアレイを 1 つの SBL(Short Baseline) システムとし、それぞれのハイドロフォン間での鳴音の到達時間差を計算することで、音源からの到来方向の推定を行う。このハイドロフォンアレイを数百 m のベースラインで 2 基用意することで、LBL(Long

Baseline) システムを構築し，各アレイでの鳴音の到来方向推定結果とアレイの位置情報を元に三角測量による位置推定を行う．マッコウクジラは潜行中に鳴音を発し続けることが報告されているため [75, 76]，鳴音を発するたびにその位置を推定することで，水中での行動軌跡を得ることができ，その潜水行動を知る事が可能となる．そして，アレイにより得られた鳴音を解析し，得られた位置情報を元に，AUV による追跡観測を行う．2 基のハイドロフォンアレイは海上の観測船から数 m の深さで投下され音響観測を行うが，AUV にハイドロフォンアレイを取り付け，AUV を 1 つの SBL システムとして扱い，観測船からのアレイとで LBL システムを構築することで，位置推定を行うことが可能となる [51, 59, 60, 69]．将来的には，複数の AUV にそれぞれハイドロフォンアレイを取り付け，AUV 同士による LBL システムを実現し，人手によらない長期的な観測の実現を目指している．

マッコウクジラは通常，数頭から十数頭の群れで行動することが報告されているため [37]，観測中では，複数頭から発せられた数千個もの鳴音がハイドロフォンで確認される．三角測量による位置推定では，同一のクジラから発せられた鳴音の到来方向推定結果をそれぞれのアレイから選ばなければならない．このためそれぞれのアレイで，鳴音から個体を識別することが必要となる．マッコウクジラの鳴音による個体識別は，鳴音と体内反射音の時間差 IPI (Inter Pulse Interval) を利用した手法が提案されている [21]．マッコウクジラの頭部前方から発せられた鳴音が，頭部後方にある air sac に反射することで，体内反射音が生成され，鳴音と体内反射音の時間差は，個体の頭部の長さ依存する値であるため，個体を識別することができるという考え方である．しかし，IPI は体長に依存した値であるため，体長が同じ個体では IPI が同じ値になり識別ができない，また，マッコウクジラの体の向きとアレイへの向きにより IPI が変動するという研究成果もあり [53, 81, 82]，異なる位置に展開されたアレイで観測される IPI は，同一の個体であっても異なる値を取る可能性がある．

本論文で提案するマッコウクジラの位置推定手法は，SBL システムにより計算される鳴音の到来方向を元に，鳴音のクラス分けを行い，クラスを動的に構築する．到来方向を元に鳴音をクラス分けすることで，付近にいるマッコウクジラの頭数を把握し，位置推定を行う際の候補をクラスとしてリストアップする．2基のアレイで構築されるクラス情報をリアルタイムに共有することで，対応するクリックを探すのではなく，対応するクラスを探すことにより，探索候補を削減し，クラス同士をマッチングさせることで，群れで行動するマッコウクジラへの位置推定を実現する．

本論文で提案するマッコウクジラの位置推定手法は大きく以下の二つに分けられる，方位推定によるクラス分けとクラスマッチングによる位置推定である．方位推定によるクラス分けは，それぞれのアレイで独立して行われ，クラスマッチングによる位置推定ではそれぞれのアレイでのクラス情報を元に行う．まずアレイで受信される音声に対し，5msec 毎に音声をセグメント化し，セグメント毎のエネルギーをこれまでの平均エネルギーと比較することで，クリックの検出を行う．クリックが存在すると判断されたセグメントに対し，各アレイで相互相関係数を計算し，到達時間差を求め，到来方向を推定し，アレイに取り付けられた傾斜計・磁気計を用いて，求められた相対方位を絶対方位へと変換する．計算された方向ベクトルと，これまでに構築したクラスが持つ方向ベクトルとの成す角を計算し，成す角が角度閾値以内で，最小のクラスに新しく検出された鳴音を分類する．計算される方向ベクトルは誤差を含むことから，分類された鳴音の検出時間を元に，クラスに属する鳴音の方向ベクトルを平均化する．これをクラスが持つ方向ベクトルとすることで，動的なクラス分けを実現する．

クラスマッチングによる位置推定では，まずそれぞれのアレイで構築されたクラス情報を受け取ることから始まる．対応するクラスを発見するマッチングを行い，観測船に搭載された GPS の位置情報と，マッチングされたクラス同

土の方向ベクトルを元に，最小自乗法を用いた三角測量による位置推定を行う．ここで，2頭のクジラからの鳴音をそれぞれのアレイでクラス分けした場合を考えてみると，各アレイでクラスが2個ずつできるため，対応させる組み合わせは2通りあり，推定される位置は4つある．誤った組み合わせでマッチングしてしまう場合，本来ならば存在しないはずのクジラの位置を求めてしまうことになる．このミスマッチを避けるために，本論文では，相手の全てのクラスとマッチングさせる全クラスマッチングを行い，クジラが存在する可能性のある全ての位置を推定する．その後，クラスの活動時間や，方向ベクトルの特徴量を元に対応するクラスを発見し，対応するクラスのマッチング結果を抜き出すことで，マッコウクジラの水中での位置を推定する．

他のマッコウクジラの音響観測では，1つのハイドロフォンを広範囲に複数個展開する方法や [44, 45, 46, 61, 53, 73]，船からハイドロフォンアレイを牽引し，クジラの動きに合わせて，アレイと観測船を移動させる方法がある [63, 81, 82]．既存の手法では，1頭の個体に対して位置を推定することは容易であるが，複数いる場合，クジラとハイドロフォンの位置関係によって，到達する鳴音の順番が異なる事から対応する鳴音の発見が難しく，位置推定が困難である．また推定できたとしても，クジラが複数いるかどうかの判断は，得られた位置情報の軌跡から人が判断しなければならない．本手法では30cm間隔のハイドロフォンで方位推定を行うため，複数いる場合も到達時間差計測による方位推定は可能である．そしてクラス同士のマッチングにより位置を求めるため，得られた位置情報が，どの個体のものかという判断をシステムが下すことも可能である．

本論文で提案する位置推定手法を，2003年度に小笠原諸島近海で行った海洋実験 [69, 70] により得られた実際のマッコウクジラの音声に対し，適用し，六頭のマッコウクジラの位置を推定することに成功した．これまでに報告されているマッコウクジラが潜水時にターゲットにアプローチするために現れる ICI (Inter Click Interval) の減少 [39] が，群れをなして泳いでいる5頭のマッコウクジラ

から確認することができた。これらの5頭は同じ方向に広がりながら動いていることから、群れで行動するマッコウクジラが互いに協力しながら水中でターゲットを探している可能性を示すことができた。

1.2 本論文の概要

本論文は本章を含め以下の6章から構成される。

第2章「観測対象としてのマッコウクジラ」では、鯨類を取り巻く環境、マッコウクジラの生態、鳴音について述べ、従来の観測手法について紹介する。

第3章「マッコウクジラ観測システム」では、自律型海中ロボット AUV を用いたマッコウクジラの観測システムについて述べる。二基のハイドロフォンアレイによる方位推定と位置推定の原理を示し、位置推定誤差の見積もり結果から得られるアレイの展開方法を示す。また自律型海中ロボット AUV について、その一般的な活用法・特徴を述べ、追跡調査の用いる AUV の性能を示す。

第4章「位置推定手法」では、本論文で提案する二基のハイドロフォンアレイからマッコウクジラの鳴音を解析する手法を述べる。各アレイで行うクリックの検出・方位推定・クラス分けについて述べ、それぞれのアレイでの解析結果をマッチングさせる際の問題点と、それを解決する手法について述べ、提案手法のリアルタイム性について言及する。

第5章「計算機実験結果」では、実際の海洋実験で得られた音声データに対し、提案手法により得られた実験結果を示す。それぞれのアレイでのクリック検出、方位推定、クラス分けの結果を示し、クラスのマッチングとマッチングにより得られた位置推定結果を示す。提案手法による解析結果より、マルチパスの影響、位置情報により得られる速度、深度変化が ICI (Inter Click Interval) に与える影響についてそれぞれ考察し、提案手法の今後の課題を示す。

第6章「結論」では本論文全体を統括する。

第2章

観測対象としてのマッコウクジラ

2.1 本章の概要

本章では、観測の対象とするマッコウクジラについて述べる。マッコウクジラは長期間潜行することから、従来は水面に浮上した際に船上からの目視観測しか行うことができず、その水中での生態の多くは未知であったが、近年、データロガーや音響観測によりその潜水行動が明らかになってきている。

本章は、マッコウクジラに限らず、鯨類全般を取り巻く環境について述べ、調査対象として選択したマッコウクジラの特徴を述べる。音響解析の対象となるマッコウクジラの鳴音について述べ、特に Møhl らが鳴音を発生させるモデルとして提案した bent-horn モデル [45] について述べる。またマッコウクジラの観測方法として挙げられる、目視観測、音響観測、バイオロギング、音響とバイオロギングの複合観測について述べる。

2.2 鯨類を取り巻く環境

日本を始めとする世界各国で、鯨類は貴重な食料、あるいは様々な道具の材料として古くから利用されてきた。20世紀初頭にノルウェーで捕鯨法を使った漁業が開発され、日本・ロシア・ノルウェーが中心となって船団式の大規模な捕鯨

が行われるようになった。それまでの近海での操業に代わり、高緯度海域での大量捕獲が続き、大型ヒゲクジラを中心に頭数が激減した。1960年代からIWC(国際捕鯨委員会)による捕鯨規制が始まり、1982年には脱退したノルウェーが資源量が回復したとして商業捕鯨を再開しようとしており、世界各国で話題を呼んでいる。日本は商業捕鯨中止後も捕鯨調査を含め積極的に鯨類の生息状況の把握に努めている。しかしながら、生息頭数の推定には船上からの目視によるデータが主となっているため不正確であり、いくつかの種類については商業捕鯨に耐えられるほど回復しているという日本の主張に対し、欧米と中心とした反捕鯨国は正確なデータが必要であると反発している。

大型鯨類に関して調査が難しいとされているのは、体長が大きいことや数千kmに及ぶ季節移動を行うことから、長期間の飼育による観測が難しく、潜行中のクジラの生態を正確に把握することができないためである。多くの研究者たちは、クジラが潜行中に発する鳴音に注目し、鳴音を解析することで得られる水中行動や音響特性に注目した生態に影響を与えないパッシブな音響解析を行ってきている。近年、深度計・速度計などの各種センサーを搭載したデータロガーをクジラの体表に取り付け、潜水行動を記録する研究が盛んにされており、小型のアクティブソナーを備えたデータロガーをクジラの体表に取り付けるといった試みがされているが、ロガーの取り付け・取り外し・回収の困難さや、クジラの生態環境に悪影響が出る可能性があることも指摘されている。

小型鯨類に関してはジュゴン、バイジー、カマイルカなどの絶滅危惧種の音響観測による水中行動の調査や[1, 2, 8, 25, 31, 35, 36, 55, 58, 66]、音響観測により推定される河川に生息している頭数の調査[3]、また小型鯨類の鳴音のビームパターンを解析し、工学への適用性を模索するという生物学的な研究も多く存在する[10, 11, 24]。

日本語にはイルカとクジラという言葉があり、英語にはWhale, Dolphin, Porpoiseという言葉での分類が存在するが、生物学上の分類は同一の鯨類として見

なされ、基本的な行動は類似している事がわかっている。鯨類の発する鳴音にはコミュニケーション用とエコロケーション用の鳴音があるとされており、ほとんどの鯨類がその両者を有することが確認されている。

2.3 マッコウクジラの特徴

2.3.1 学名と由来

マッコウクジラはクジラ目ハクジラ亜目マッコウクジラ科に属する海洋哺乳類である。その学名は *Physeter Macrocephalus* であり、*hyster* はギリシャ語で「吹く人」を意味し、*Macrocephalus* はギリシャ語で「長い」を意味する *makros* と頭を意味する *kephale* に由来する。英名は Sperm Whale であり、これはマッコウクジラの頭部から取れる脳油の色がその由来である [37]。

2.3.2 生態

マッコウクジラは基本的に世界中の海で観測されている。頭部は巨大な箱型をしており、体長の 40% を占めることもある。噴気孔は 1 つで頭の左前方にあり、噴気は斜め後ろに上がる。体色は褐色あるいは濃灰色であり、皮膚には特に頭の後方にしわが寄っているように見える。背中には丸みがかった三角形のこぶがあり、その後ろに正中線に沿って小さな隆起が続いている。

2.3.2.1 回遊行動

マッコウクジラは 1 頭から数十頭からなる群れで行動し、高齢の雄は普通 1 頭でいるか小さな群れで行動すし、繁殖期には、育児中の雌の群れに加わって交尾をする。繁殖期以外に見られる大きな群れは、独身群、若齢・未成熟群、雌の若齢個体を含む育成群のいずれかである。

回遊行動は雄と雌で異なり，雄の活動範囲は雌と未成熟な雄よりも極方向に広がっている．雌と若齢個体は，北緯 40 度以上北，南緯 40 度以上南では滅多に観測されていない．性別及び年齢によらずほとんどの個体は春と夏に行動範囲を極寄りに移動し，秋には温帯から熱帯へ戻ってくる．

2.3.2.2 潜水行動

マッコウクジラは水深 1000m の海底ケーブルに絡まった個体が発見されており，またソナー技師が水深 2000m と 2800m にいる個体を発見・追跡した例があり，潜水は 1000m 以上の深さまで及ぶ．また 1 回の潜水で 1 時間以上水中で回遊することが可能である．一般的な鯨類と同様に，深い潜水後に水面で勢いよく噴気を 1 回以上上げる．その後は潜水の長さにもよるが，1 時間以上水面に留まり，次の潜水に入るまで数十回の噴気を挙げることもある．

2.3.2.3 捕食行動

捕食は主にイカを食べるとされており，蛸，鮭，メバル・カサゴ類，リンゴコッド，ガンギエイなどの魚類も食する事がある．胃の内容物から石，砂，ガラス，深海性の海綿，カニの肉，ヒゲクジラの肉片，二枚貝，人間の靴などが発見され，これはマッコウクジラが時々海底で餌を掘り起こして食べているためと考えられる [19, 32]．水中を動くイカ等を捕食する際には，エコロケーションで捕食行動を行うイルカやコウモリと同様に，後述するクリークと呼ばれる非常に短い間隔で鳴音を発し続け，ターゲットへアプローチするとされる．

2.4 マッコウクジラの鳴音

マッコウクジラはクジラの中でも強く鋭いクリック (Click) と呼ばれるパルス波を発生する [28, 38]．マッコウクジラの鳴音は複数のパルスからなるマルチパルス構造になっており，クリックがマルチパルス構造となるモデルとして Møhl

表 2.1. 鳴音の分類 .

鳴音の種類	ICI [sec]	特徴
Usual Click	0.5 ~ 1	最も頻繁に発せられる
Slow Click	5 ~ 7	5 から 7 秒間隔で発せられる
Creak	-	非常に短い頻度で発せられるクリック 多い時は秒間で 200 回以上発せられる
Codas	-	不規則に発せられるため観測例が少ない

らが提案した bent-horn モデルを示す．鳴音のパルス長は一般的に数 msec であり，数 kHz ~ 30kHz 近くまで周波数成分が存在するが，中心周波数は 10 ~ 15kHz である．音圧の強さは 80dB 近くまで上がることがあり，海中では十数 km 程度の範囲には届くといわれている．

2.4.1 鳴音の分類

連続して発せられる鳴音は，その鳴音と次の鳴音の間隔 ICI(Inter Click Interval) によって 4 つに分類され，この分類を表 2.1 に示す．

Slow Click は雄のマッコウクジラだけが発し，特殊な環境下で発音されるとされる [28]．Codas は，クジラの中でもマッコウクジラのみに見られる独特の鳴音であり，コミュニケーションにおいて重要な要素とする研究報告がある [57]．Usual Click と Creak はエコロケーションを行っていると考えられ，コウモリやイルカなどの他のエコロケーションを行う動物に構造や方法が似ている．Creak は非常に短い間隔で発せられる Usual Click といえ，捕食の際に用いる狭い範囲におけるエコロケーションのための鳴音であるとされる．Usual Click はこれに対し長い間隔で発せられるため，捕食の前段階として用いる広い範囲のエコロケーションのための鳴音であるとされる．

マッコウクジラの鳴音はコーダ (Coda) があまり観測されないことから、クリック (Usual, Slow Click) とクリーク (Creak) とに大きく分けられる。クリークは、クリックを短い間隔で連続して発する鳴き方であることから、マッコウクジラが発する鳴音を、一般的にクリックと呼ぶ。クリックとクリークの音声サンプルを図 2.1 に示す。図 2.1 はクリックとクリークの音声波形と、そのスペクトログラムをそれぞれ示し、白枠でクリックとクリークの部分を囲んで表している。図 2.1 より、クリックの周波数が 20kHz 付近まで広がっており、またクリークがクリックを連続して発したものであることが分かる。

2.4.2 bent-horn モデル

マッコウクジラのクリックのマルチパルス構造を解明するモデルとして、2001 年に Møhl らにより bent-horn モデルが提案された [44]。bent-horn モデルは Zimmer らなどにより近年研究が盛んに行われており、その有効性が立証されてきている [34, 39, 53, 80, 81, 82]。

2.4.2.1 鳴音発生の仕組み

bent-horn モデルにおける鳴音発生のメカニズムの模式図を図 2.2 に、図中に示されている記号の意味を表 2.2 に示す。bent-horn モデルでは以下のような手順で鳴音が発生し、マルチパルス構造となる。

1. 音唇でクリックとなる音響エネルギーが発生する。
2. 音響エネルギーの一部が観測装置 (ハイドロフォン) へと伝わる。これを p_0 とする。
3. 残りの音響エネルギーが鯨蝟を通り、頭部後方にある Frontal air sac に伝わり、反射される。

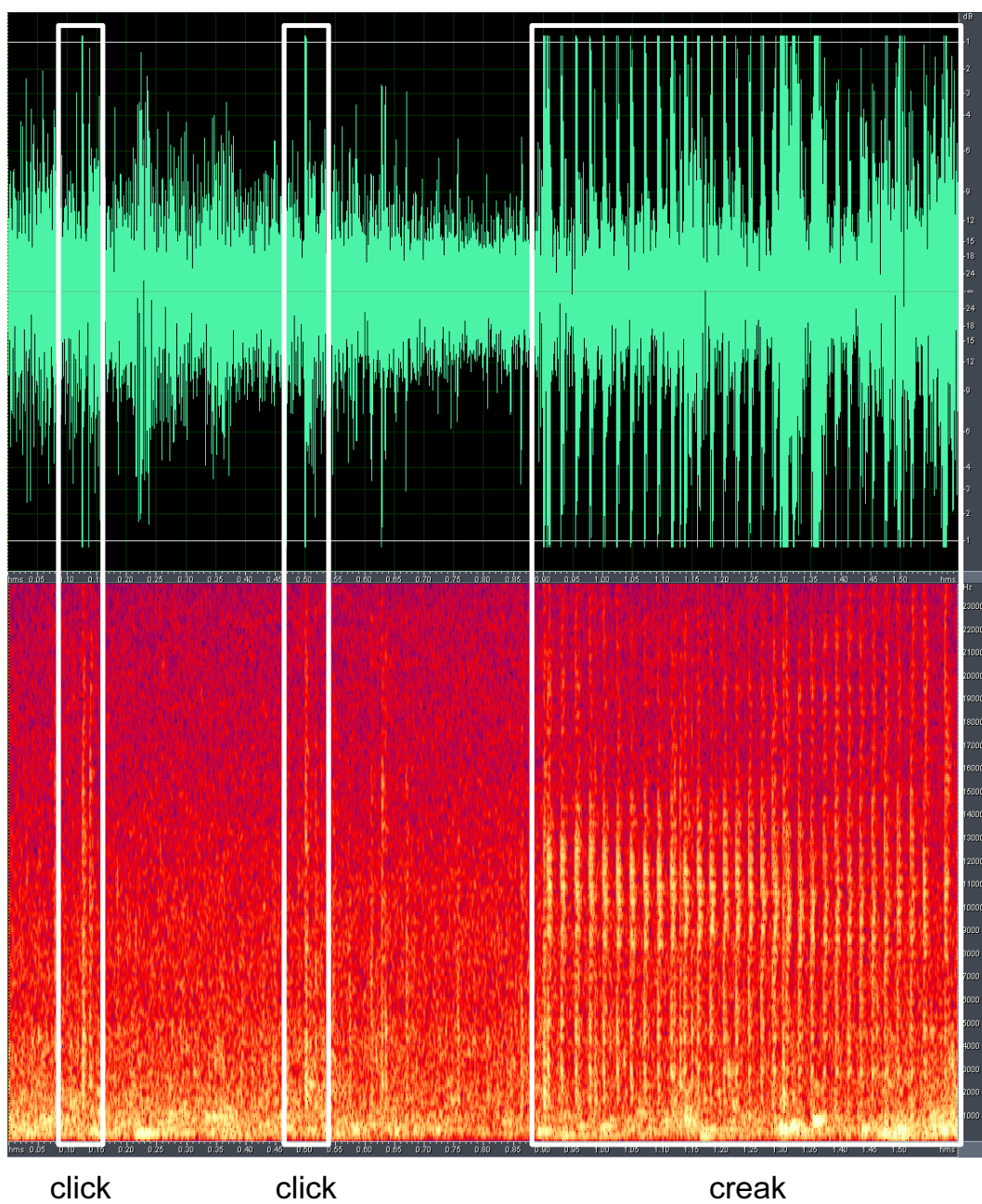


図 2.1. クリックとクリークの音声サンプル。

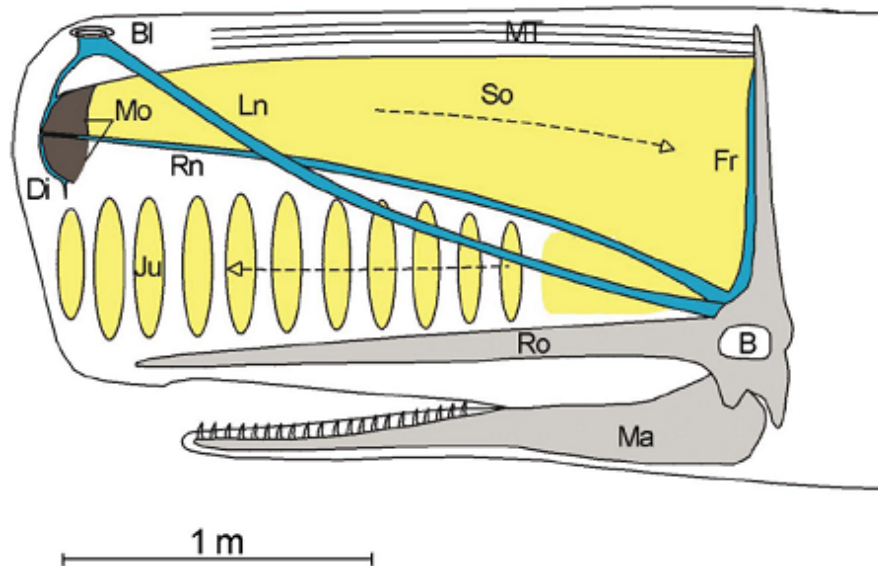


図 2.2. bent-horn モデル [39, 47, 82] .

4. 反射されたエネルギーの一部が海へ漏れ，ハイドロフォンへ伝わる．これを $p_{1/2}$ とする．
5. またエネルギーの一部が前方へと反射され Junk を通り，海へと漏れ，観測装置に伝わる．これを p_1 とする．
6. Frontal air sac で反射されたエネルギーのうち， $p_{1/2}, p_1$ でない残りのエネルギーは，再び鯨蝟を通り，頭部前方にある Distal air sac へと伝わる
7. Distal air sac で，Frontal air sac で行われた 3～6 のように sac でエネルギーが反射され，観測装置でパルス $p_{3/2}, p_2$ が確認される．
8. 以上を繰り返すことで，ハイドロフォンに複数のパルスが確認される．

表 2.2. 図 2.2 の記号一覧.

記号	意味
BL	Blow hole(噴気口)
MT	筋肉
MO	Monkey Lips(音唇)
Ln	Left nose(左の鼻穴)
Rn	Right nose(右の鼻穴)
So	Spermatic oil(鯨蠟)
Di	Distal air sac(頭部前方にある Air Sac)
Fr	Frontal air sac(頭部後方にある Air Sac)
Ju	Junk(ジャンク)
Ro	上顎
B	骨
Ma	下顎

2.4.2.2 マルチパルス

bent-horn モデルでは, Frontal air sac の近くにある音唇を震わせることで, クリックとなる音響エネルギーが発生される. この音響エネルギーがハイドロフォンなどの観測装置へとクリックの主成分のパルス p_0 として伝わる. p_0 は他のパルスと比べ, 音圧エネルギーとともに非常に大きい. 音唇で発せられた音響エネルギーの中で p_0 とならない残りのエネルギーが後ろにある鯨蝟に伝わり, 頭部後方にある Frontal air sac へと伝わる. ここで air sac とは空気の詰まった嚢のような器官であり, 音響エネルギーが到達すると反射される.

Frontal air sac へと到達した音響エネルギーは3つに分かれて反射される. 1つ目がパルス $p_{1/2}$, 2つ目がパルス p_1 , そして残りのエネルギーが前方へと再び反射され Distal air sac へと伝る. 1つ目のパルス $p_{1/2}$ は Frontal air sac に到着したエネルギーが反射され, 海へと漏れることで, 観測機器で確認されるパルスである. パルス $p_{1/2}$ は最初のパルス p_0 や p_1 と比べ, 音圧・エネルギーともに弱まっている. パルス p_1 は, 前方の Junk を通り観測装置へと伝わり, 後部の air sac で反射されたエネルギーが前方へと反射されて伝わることから体内反射音と呼ばれている.

残りのエネルギーは再び鯨蝟を通り Frontal air sac へと伝わる. ここで Distal air sac と同様に, エネルギーが反射されることで, パルス $p_{3/2}, p_2, \dots$ が生成されるが, 2回 air sac で反射されているため, 音圧が非常に小さくなっており確認することが難しい.

2.4.2.3 指向性

Zimmer らはクリックの指向性に関する考察を, 最初に発生されるクリックの主成分となる p_0 と, 後部で一度反射されて生成される体内反射音 p_1 について行った. 文献では, クリックの主成分となる p_0 に関しては指向性を確認することができず, 体内反射音 p_1 に関しては前方に強い指向性が確認されたと報告し

ている．体内反射音に指向性が存在する理由として，前方に反射されているという点と，Junk がレンズのような役目をしてビーム幅を絞っているという点を挙げている． p_1 は $p_1/2$ ほどの減衰が見られないのは，Junk が p_1 を増幅しているのではないかとしている．

2.4.2.4 IPI(Inter Pulse Interval)

最初に発生されるパルス p_0 と体内反射音 p_1 の到達時間差を IPI(Inter Pulse Interval) として定義する．二つのパルスの到達時間差はマッコウクジラの体長により決定されるため，IPI は個体を識別するためのパラメータとして提案されていたが [21]，体軸の向きにより IPI が少しずつ変化することが Zimmer らにより報告され，IPI のみによる個体識別は難しいとする考え方が一般的である [81, 82]．

2.5 従来の観測手法

マッコウクジラに対する観測手法として，船上からの目視観測，ハイドロフォンによる音響観測，データロガーによるバイオリギング，そして音響とバイオリギングを組み合わせた複合的観測について，それぞれの特徴を述べる．

2.5.1 目視観測

目視観測は，海面に浮上してきたマッコウクジラに対し，船上から双眼鏡等でマッコウクジラの尾びれなどの身体的特徴を観測，もしくは写真撮影することで行う．得られた特徴からマッコウクジラの個体識別や，生息頭数の調査をライトランセクト法やキューカウンティング法により行う．

目視観測による生息頭数調査のためには，発見時までの距離情報が必要であるので，調査を行うブロック，調査コースの設定が重要となる．このため，時期や海域の適切性，調査距離の見積もり等を行い，どれくらいの発見が期待でき

るかを考慮する必要がある。可能であれば予備調査を行い、事前の情報を入手することが有効であるが、これが難しい場合には過去の目視データや捕獲データを参考とする。

2.5.2 音響観測

音響観測は、1つのハイドロフォンを用いる方法と、複数のハイドロフォンを用いる方法に大きく分けられる。ハイドロフォンを1つのみを使用する場合は、マッコウクジラの潜水行動や音響特性の調査というよりも、付近にマッコウクジラが存在するかどうかを海中の音を聞くことで判断するために用いられ、実際の海洋実験では装置を展開する前の初探として用いられることが多い。

複数のハイドロフォンを用いる場合は、一般的に各ハイドロフォンに到来するクリックの差を解析する。このクリックの到来時間差を解析することで、マッコウクジラがクリックを発した瞬間の位置を推定する。マッコウクジラがクリックを発し続ければ位置情報のトラジェクトリを得ることができ、その水中行動を解明することができる。得られた位置情報と音声データを組み合わせることにより、クリックの音響特性を考察する。複数のハイドロフォンの展開方法は、広範囲にハイドロフォンを配置する方法と、船からハイドロフォンを牽引しマッコウクジラを船で追跡しながら音響観測を行う方法とがある。

2.5.3 バイオロギング

バイオロギングは、マッコウクジラの体表にデータロガーを取り付けて行う観測方法である。データロガーの内部に搭載される計測機器は、電源、無線送受信装置、温度計、GPS測位システム、深度計、加速度計、磁気計、ハイドロフォン、及びデータを記録するメモリ等が挙げられる。ロガーを観測対象に取り付ける方法として、体の一部に穴をあけロガーを金具で固定させる固着型と、吸盤で張り付く吸着型がある。マッコウクジラは一般的に固着型のロガーを用

いて観測されており，一定時間がたつと自然に体表から離れ海面に浮上する．浮上後に内部に搭載された無線送受信装置の信号を元にロガーを回収する．

バイオリギングでは，加速度データと深度データを元に潜水行動を数時間から数日といった長期間で観測する．またこれらの潜水行動のデータと，ローガに取り付けたハイドロフォンから得られた音声データを深度や位置データとからめて，その捕食行動に関し調査を行う．

2.5.4 音響とバイオリギングの複合観測

音響とバイオリギングの複合観測とは，データロガーを取り付けた個体に対し，海面から展開した複数のハイドロフォンにより音響観測を行う手法である．音響観測により得られた三次元の位置情報と，ロガーのデータから得られる位置情報とを比較し，音響観測の正誤評価を行う．またロガーに取り付けたハイドロフォンの音声と，海面から展開したハイドロフォンの音声を比較させることで，クリックの音響特性を考察する．それぞれのハイドロフォンでの音声を比較するため，付近で複数頭のマッコウクジラが鳴いている場合に観測を行うことは難しく，ある一頭のクジラに対して観測を行う．ロガーで得られた音声をクリックが発せられた時の音声とし，周囲の音声と比べることで指向性に関する調査を行うことが可能となる．

2.6 本章のまとめ

本章では，鯨類を取り巻く環境として大型鯨類や小型鯨類，そして観測対象となるマッコウクジラについて述べ，マッコウクジラの生態として，その回遊行動・潜水行動・捕食行動について述べた．本論文で解析対象とするマッコウクジラの鳴音について分類し，鳴音のマルチパルス構造に関するモデルとして提案されている bent-horn モデルについて述べ，その発生の仕組み，マルチパルス構造，指向性について述べた．そしてマッコウクジラの観測方法として提

案されている，目視観測，音響観測，バイオロギング，音響とバイオロギングを組み合わせた複合観測について述べた．

第3章

マッコウクジラ観測システム

3.1 本章の概要

本章では、自律型海中ロボット AUV(Autonomous Underwater Vehicle) と、二基の SBL(Short Baseline) アレイによるマッコウクジラの観測システムについて述べる。観測システムの全体図を示した後に、二基の SBL アレイによる水中測位についてその方位推定と位置推定の原理をそれぞれ示す。二基のアレイによる位置推定推定誤差について、その誤差要因を考察し、水平面と垂直面の推定誤差について述べ、誤差の見積もりから得られるアレイの展開方法について述べる。続いて AUV を用いた観測について、一般的な AUV の特徴を述べた後に、観測に用いる AUV について述べる。

3.2 観測システムの全体図

本論文が対象とするマッコウクジラの観測システムの全体図を図 3.1 に示す。2 艘のボートから数 m の深さにそれぞれハイドロフォンアレイを投下し、音源への方向推定を行う。それぞれのアレイで推定される音源への方向と、GPS により得られるアレイの位置情報を元に三角測量による位置推定を行う。それぞれのアレイにはハイドロフォンの他に傾斜計・磁気計が搭載されており、到来

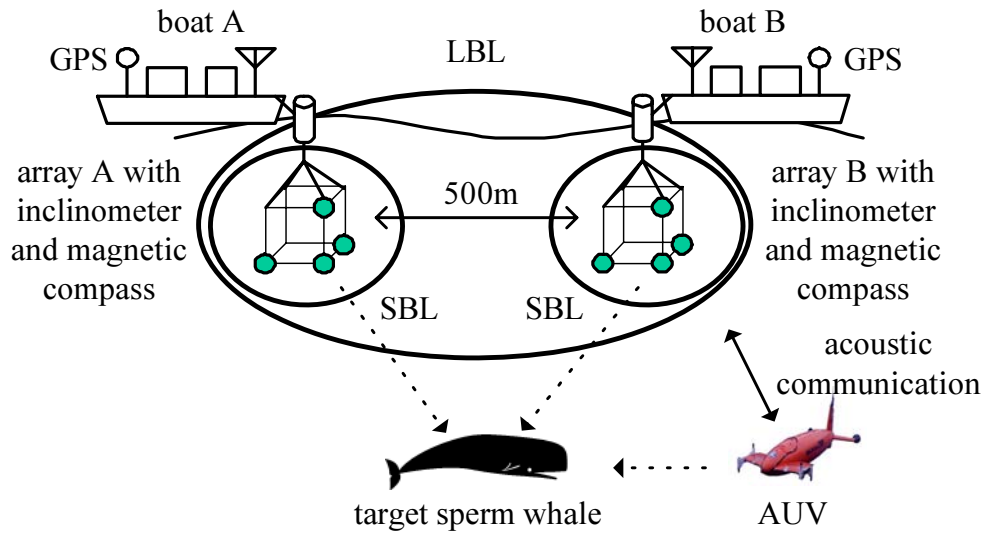


図 3.1. AUV を用いたマッコウクジラ観測システムの全体図 .

方向の推定をする際に傾きの補正と相対方向から絶対方向への変換が可能である . AUV は , 解析結果の送受信や , 追跡ターゲットの決定を音響通信により行い , マッコウクジラの追跡調査を実現する .

3.3 二基のハイドロフォンアレイによる水中測位

実験で用いるハイドロフォンアレイは , 4 つのハイドロフォンをベースラインが 1m 以内の格子状に配置している SBL (Short Baseline) アレイである . 音響観測による位置推定では , 1 つの SBL アレイを音源の到来方向を推定する SBL システムとして扱い , それぞれの SBL システムで推定される到来方向と , GPS より得られる位置情報を元に三角測量による位置推定を行う LBL (Long Baseline) システムから構成される .

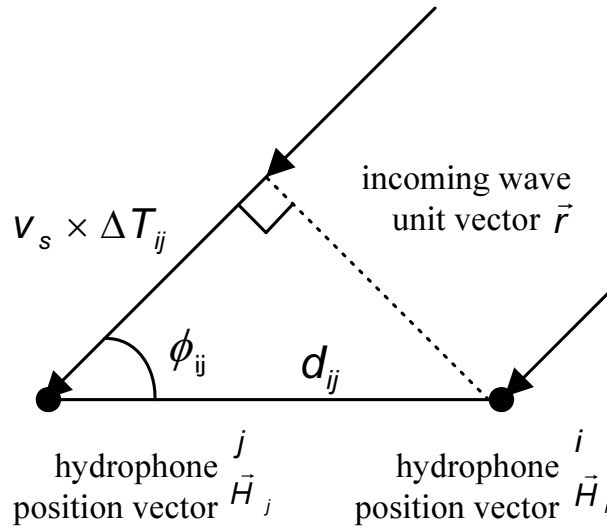


図 3.2. 到来方向推定の原理 .

3.3.1 SBL システムによる方位推定の原理

それぞれのハイドロフォン間の鳴音の到達時間差を計算することで、音源からの到来方向を求める。この SBL システムによる到来方向推定の原理を図 3.2 に示す。

3.3.1.1 到来方向推定

ハイドロフォン \$i\$ と \$j\$ での到達時間差を \$\Delta T_{ij}\$ とし、ハイドロフォン同士を結ぶ直線と音源への方向との成す角度を \$\phi_{ij}\$ と定義する。ハイドロフォン間の距離を \$d_{ij}\$ とし、水中音速を \$v_s\$ とした時、\$\phi_{ij}\$ は以下のように表すことができる。

$$\cos \phi_{ij} = v_s \Delta T_{ij} / d_{ij} \quad (3.1)$$

ハイドロフォン \$i\$ の極座標上での位置ベクトルを \$\vec{H}_i\$ とし、ハイドロフォンへの入射波の三次元ベクトルを \$\vec{r}\$ とする時、

$$d_{ij} \cdot \cos \phi_{ij} = (\vec{H}_j - \vec{H}_i) \cdot \vec{r} \quad (3.2)$$

以上より,

$$(\vec{H}_j - \vec{H}_i) \cdot \vec{r} = v_s \cdot \Delta T_{ji} \quad (3.3)$$

ハイドロフォンへの入射波の三次元ベクトル, すなわち到来方向 \vec{r} は以下の方程式を解くことで得られる.

$$\begin{pmatrix} (\vec{H}_2 - \vec{H}_1)^T \\ (\vec{H}_3 - \vec{H}_1)^T \\ (\vec{H}_4 - \vec{H}_1)^T \end{pmatrix} \vec{r} = \begin{pmatrix} v_s \cdot \Delta T_{12} \\ v_s \cdot \Delta T_{13} \\ v_s \cdot \Delta T_{14} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

以上より, 音源への到来方向の推定は少なくとも3組のハイドロフォンによる時間差を計算することで行うことができる.

3.3.1.2 鳴音の到達時間差

各ハイドロフォン間の鳴音の到達時間差を計算するために, 鳴音が含まれる音声セグメントに対して相互相関を施し, 到達時間差を計算する. ハイドロフォン i と j で受信される音声信号を x_i, x_j とし, 相互相関係数 $X_{corr(x_i, x_j)}$ は高速フーリエ変換 FFT (Fast Fourier Transform) と逆高速フーリエ変換 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) により以下のように表すことができる.

$$X_{corr(x_i, x_j), k} = IFFT(FFT(x_i) \cdot \overline{FFT(x_j)})_{real, k} \quad (3.5)$$

相互相関係数 $X_{corr(x_i, x_j)}$ のピーク点 k 番目の値は, 信号 x_i と x_j の時間差に等しい. ピーク点の近傍2点をサンプリングし, 2次曲線近似を行い, 近似曲線上のピーク点から到達時間差を求める.

3.3.1.3 カーブフィッティングによる到達時間差補正

相互相関係数のピーク点のサンプル値が与えられている場合, その近傍は2次曲線により近似できる. このため最小自乗法によるカーブフィッティングに

より，2次曲線に当てはめ，得られた2次曲線のピーク点の位置を，到達時間差で求めるべきピーク点の位置とみなすことで，到達時間差の計算の時間分解能を向上することができる．

標本化周期を Δ とし，X 軸上の等間隔のサンプル点 $x = n\Delta$ 上に関数のサンプル値 $y(n)$ が与えられているものとする．ここで，これらのサンプル値の中から最大の振幅を持つものを見つけ，そのサンプルの前後から関数のピークの主極に含まれるサンプルを選択し，これらのサンプル値を2次関数 $p(x)$ により結ぶ．この時に，平均最小自乗誤差が最小になるような $p(x)$ を定める． $p(x)$ のピーク点 x_p を解析的に求める時，2次関数 $p(x)$ を以下のように表す．

$$p(x) = a_0 + a_1 \times x + a_2 \times x^2 \quad (3.6)$$

この時平均自乗誤差 e は，以下のようになる．

$$e = \sum_n (y(n) - \sum_{i=0}^2 a_i (n\Delta)^i)^2 \quad (3.7)$$

ここで， n に関連した総和は選択された全てのサンプル値を対象とする． e の最小化の条件を以下に示し，これにより $p(x)$ の係数 a_0, a_1, a_2 は，連立1次方程式 3.8 の解として求められる．

$$\frac{\Delta e}{\Delta a_i} = 0 \quad (i = 0, 1, 2) \quad (3.8)$$

$$\sum_{j=0}^2 a_j \sum_n (n\Delta)^{i+j} = \sum_n y(n) (n\Delta)^i \quad (i = 0, 1, 2) \quad (3.9)$$

ここで2次関数 $p(x)$ のピーク点は，以下のように求められる．

$$x_p = \frac{-a_1}{2 \times a_2} \quad (3.10)$$

式 3.8 を解くことでピーク点 x_p が求められる．最大値を持つサンプルは $x = 0$ の点において得られるものとし，これを中心に前後に N 個のサンプルを取るも

のたとすると式 3.8 の解は，以下ようになる．

$$a_1 = \frac{\sum_{n=-N}^N n \times y(n)}{N \times (N+1) \times (2N+1) \times \Delta/3} \quad (3.11)$$

$$a_2 = \frac{\sum_{n=-N}^N n^2 \times y(n) - N \times (N+1) \times \sum_{n=-N}^N y(n)/3}{N \times (N+1) \times (2N-1) \times (2N+1) \times (2N+3)\Delta^2/45} \quad (3.12)$$

従ってピーク点は以下の様に表すことができる．

$$x_p = \frac{-(2N-1)(2N+3)/30\Delta \sum_{n=-N}^N y(n)/3}{\sum_{n=-N}^N n^2 y(n) - N(N+1)/3 \sum_{n=-N}^N y(n)} \quad (3.13)$$

3.3.1.4 非線形最小自乗時法による角度補正

相互相関とカーブフィッティングによる補正を行った後に，最終的に方向推定のために到来方向の三次元ベクトルを求めなければならない．4つのハイドロフォンを配置した場合には，6通りの時間差があり，全ての時間差から到来方向を求める際に非線形最小自乗法を用いる．非線形最小自乗法として様々な演算方法があるが，Marquardt-Levenberg 法を適用する [50]．観測値として，到達時間差 ΔT から計算される鳴音の到来方向を用いて，観測ベクトル \vec{v}_{obs} を以下のように定義する．

$$\vec{v}_{obs} = (v_s \cdot \Delta T_{12} \ v_s \cdot \Delta T_{13} \ v_s \cdot \Delta T_{14} \ v_s \cdot \Delta T_{23} \ v_s \cdot \Delta T_{24} \ v_s \cdot \Delta T_{34})^T \quad (3.14)$$

計算値として，クリックの到来方向ベクトル \vec{r}_ϕ とハイドロフォン i の位置ベクトル \vec{H}_i の成す角度をベクトルの内積から計算し，これを計算値ベクトル \vec{v}_{cal}

として以下のように定義する．

$$\vec{v}_{cal} = \begin{pmatrix} (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \cdot \vec{r}_\phi \\ (\vec{H}_3 - \vec{H}_1) \cdot \vec{r}_\phi \\ (\vec{H}_4 - \vec{H}_1) \cdot \vec{r}_\phi \\ (\vec{H}_3 - \vec{H}_2) \cdot \vec{r}_\phi \\ (\vec{H}_4 - \vec{H}_2) \cdot \vec{r}_\phi \\ (\vec{H}_4 - \vec{H}_3) \cdot \vec{r}_\phi \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

観測値ベクトルと計算値ベクトルの差の自乗和 $|\vec{v}_{obs} - \vec{v}_{cal}|^2$ を最小化の対象とする．三次元の到来方向ベクトル \vec{r}_w の初期値は式 3.4 を LU 分解することによって得る．

3.3.2 LBL システムによる位置推定の原理

図 3.3 に，二次元平面上での位置推定の模式図を示す．音源 S の位置を (x, y) とし，二基のアレイ A_1 と A_2 の位置をそれぞれ $(0, 0)$ ， $(L, 0)$ とする．音源までのそれぞれのアレイからの距離を r_1, r_2 とし，二基のアレイから音源までの方向と X 軸の成す角度をそれぞれ θ_1, θ_2 とする．図 3.3 より，以下の関係式が成り立つ．

$$x/r_1 = \cos\theta_1 \quad (3.16)$$

$$(x - L)/r_2 = \cos\theta_2 \quad (3.17)$$

$$y/x = \tan\theta_1 \quad (3.18)$$

$$y/(x - L) = \tan\theta_2 \quad (3.19)$$

上式より，以下の関係式が求められる．

$$x \tan(\theta_1) = (x - L) \tan(\theta_2) \quad (3.20)$$

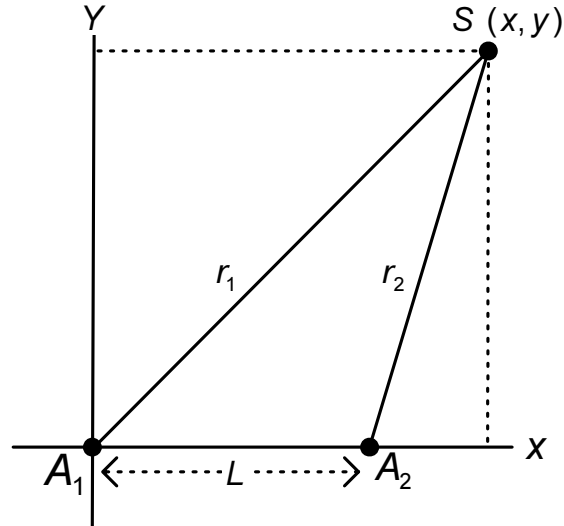


図 3.3. 位置推定の原理 .

以上より , x, y, r_1, r_2 について以下の関係式が成立する .

$$x = \frac{L \tan \theta_2}{(\tan \theta_2 - \tan \theta_1)} = \frac{L \cos \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \quad (3.21)$$

$$y = \frac{L \tan \theta_1 \tan \theta_2}{(\tan \theta_2 - \tan \theta_1)} = \frac{L \sin \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \quad (3.22)$$

$$r_1 = \frac{L \sin \theta_2}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \quad (3.23)$$

$$r_2 = \frac{\sin \theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \quad (3.24)$$

以上より , 2次元平面上での音源 S の位置 (x, y) と音源までの距離 r_1, r_2 は , アレイの位置とアレイでの到来方向 θ_1, θ_2 がわかれば計算することができる .

3.3.2.1 最小自乗法による位置推定

音源の3次元の位置情報は2つの方向ベクトルの交点として三角測量により求められる . 計算される方向ベクトルは誤差を含むことから , それぞれのアレイからの方向ベクトルが交点を持つことは考えづらく , ベクトルはねじれの関

係となる．このため最小自乗法を用いて，位置の推定を行う．それぞれのアレイで計算される音源への方向ベクトルを \vec{v}_1 , \vec{v}_2 とし，以下のように定義する．

$$\vec{v}_1 = (v_{1x} \ v_{1y} \ v_{1z})^T \quad (3.25)$$

$$\vec{v}_2 = (v_{2x} \ v_{2y} \ v_{2z})^T \quad (3.26)$$

地球座標系でのアレイの位置ベクトルをそれぞれ \vec{g}_1 , \vec{g}_2 とし，以下のように定義する．

$$\vec{g}_1 = (g_{1x} \ g_{1y} \ g_{1z})^T \quad (3.27)$$

$$\vec{g}_2 = (g_{2x} \ g_{2y} \ g_{2z})^T \quad (3.28)$$

音源であるマッコウクジラの真位置 \vec{P} を以下のように定義する．

$$\vec{P} = (x \ y \ z)^T \quad (3.29)$$

それぞれのアレイから音源までの距離を k_1 , k_2 とし，それぞれのアレイでの誤差ベクトルを \vec{E}_1 , \vec{E}_2 とすると，以下の関係式が成立する．

$$\vec{E}_1 = \vec{P} - (\vec{g}_1 + k_1 \vec{v}_1) \quad (3.30)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{P} - (\vec{g}_2 + k_2 \vec{v}_2) \quad (3.31)$$

ここで，距離の測定誤差 E を以下のように定義する

$$E = |\vec{E}_1|^2 + |\vec{E}_2|^2 \quad (3.32)$$

以上より，測定誤差 E は，音源の位置を表す変数 k_1, k_2, x, y, z と，アレイで計測できる変数 $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{g}_1, \vec{g}_2$ の関数として表すことができる．誤差 E を変数 k_1, k_2, x, y, z でそれぞれ微分し， E を最小化するように以下の方程式をLU分解により解き，解を得ることで，音源に関する位置情報 k_1, k_2, x, y, z を計算する．

$$\vec{A}\vec{x} = \vec{b} \quad (3.33)$$

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} v_{1x}^2 + v_{1y}^2 + v_{1z}^2 & 0 & -v_{1x} & -v_{1y} & -v_{1z} \\ 0 & v_{2x}^2 + v_{2y}^2 + v_{2z}^2 & -v_{2x} & -v_{2y} & -v_{2z} \\ v_{1x} & v_{2x} & -2 & 0 & 0 \\ v_{1y} & v_{2y} & 0 & -2 & 0 \\ v_{1z} & v_{2z} & 0 & 0 & -2 \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

$$\vec{x} = (k_1 \ k_2 \ x \ y \ z)^T \quad (3.35)$$

$$\vec{b} = \begin{pmatrix} v_{1x}g_{1x} + v_{1y}g_{1y} + v_{1z}g_{1z} \\ v_{2x}g_{2x} + v_{2y}g_{2y} + v_{2z}g_{2z} \\ g_{1x} + g_{2x} \\ g_{1y} + g_{2y} \\ g_{1z} + g_{2z} \end{pmatrix} \quad (3.36)$$

3.4 位置推定誤差

広範囲に展開したハイドロフォン間の到来方向を用いた位置推定の誤差モデルについては、Spiesberger や Wahlberg らによって提案されてきた [46, 61, 73]。しかし、本論文の位置推定手法では、海面付近に投下されたベースラインが1m以下のハイドロフォン間の到達時間差を用いているため、広範囲に展開したハイドロフォン間の到来方向推定誤差に関するモデルを本論文での手法に適用することは難しい。

3.4.1 誤差の要因

本論文における位置推定誤差の要因として、以下の三点が挙げられる。

- SBL システムの方位推定誤差
- 水中の温度差による音の屈折
- GPS の位置推定誤差

3.4.1.1 SBL システムの方位推定誤差

SBL システムの方位推定誤差は、方位推定の分解能・精度、アレイの傾きを補正する傾斜計や、相対方位から絶対方位に変換する磁気計の精度に依存し、この誤差は水平方向・垂直方向の双方に影響を与える。SBL システムの方位誤差を測定するため、次のような水槽実験を行った。ハイドロフォンのベースラインは0.3mとし、音源はハイドロフォンから3m離れており、双方の位置を固定する。音源から10kHzのバースト信号のサイン波が発生される。この時、ハイドロフォンを水平方向と垂直方向にそれぞれ回転させ、方位推定の測定誤差を水平方向と垂直方向で計測する。方位推定の平均誤差は、水平方向で0.10度、垂直方向で0.607度であった。

3.4.1.2 水中の温度による音の屈折

水中の温度・塩分濃度は一定でないため、アレイで観測される音の到来方向と、実際の音源への到来方向には誤差がある。高深度から音が到来する場合には、一般的には音の経路は上方に曲がることを確認されている。方向推定はベースラインが1m以下のハイドロフォン同士で行うため、音の屈折は方位推定時には影響を与えない。しかし、計算される音源への方位は実際のものとは比べ上方に曲がっているため、主に位置推定結果の垂直成分に誤差が発生する。

音の屈折の誤差を見積もるため、実験海域である小笠原諸島近海の温度分布を投下式水温水深計 XBT (Expendable Bathyermograph) により測定した。水中音速を導出する式は、Mackenzie, Coppens, Del Grosso, Willson, Chen & Millero らが提案しており [16, 17, 22, 40]、本論文では Del Grosso の式を用いた。水中音速 c は、水温 T 、塩分 S 、圧力 P の関数として表される。

$$c = f(t, s, p) \quad (3.37)$$

Del Grosso の実験式を以下に示す .

$$C = C_1 + C_T + C_S + C_P + C_{TSP} \quad (3.38)$$

$$C_1 = 1402.392$$

$$C_T = 4.5721T - 4.4532 * 10^{(-2)}T^2 + 2.6045 * 10^{(-4)}T^3 + 3.3603 * 10^{(-3)}T^4$$

$$C_S = 1.329523S + 1.289558 * 10^{(-4)}S^2$$

$$C_P = 1.5983 * 10^{(-2)}P + 2.478901 * 10^{(-7)}P^2 - 8.485727 * 10^{(-12)}P^3$$

$$C_{TSP} = -1.275628 \times 10^{(-2)}TS + 6.477152 \times 10^{(-4)}TP$$

$$+2.760566 \times 10^{(-2)}P^3 - 1.65695 \times 10^{(-8)}TP^2$$

$$+5.536118 \times 10^{(-13)}TP^3 - 4.466674 \times 10^{(-8)}T^3P$$

$$-1.681126 \times 10^{(-11)}S^2P^2 + 9.684032 \times 10^{(-5)}T^5S$$

$$+4.952146 \times 10^{(-7)}TS^2P - 3.373123 \times 10^{(-5)}TSP$$

(3.39)

以上より計算された水中音速プロファイルを図 3.4 に示す . なお , 塩分は 35% で一定とした . 求められた水中音速プロファイルと Snell の法則により , 音源の深さがわかっている場合に , 深さ成分の方向誤差が推定できる .

3.4.1.3 GPS の位置誤差

アレイの位置は船に設置されている GPS の位置情報で決定される . しかし , GPS には推定誤差が含まれていることから , アレイが判断する自己位置と , 真の位置には誤差が発生する . このため , GPS の位置誤差は , 三角測量による位置推定時に影響する .

3.4.2 位置推定誤差の見積もり

二基のアレイと音源の位置を決定し , SBL システムの方位推定誤差 , 音の屈折 , GPS 測位誤差を考慮することで , LBL システムの位置推定時の誤差を水平方向と , 垂直方向でそれぞれ見積もりを行う . アレイの位置をそれぞれ $(x, y) =$

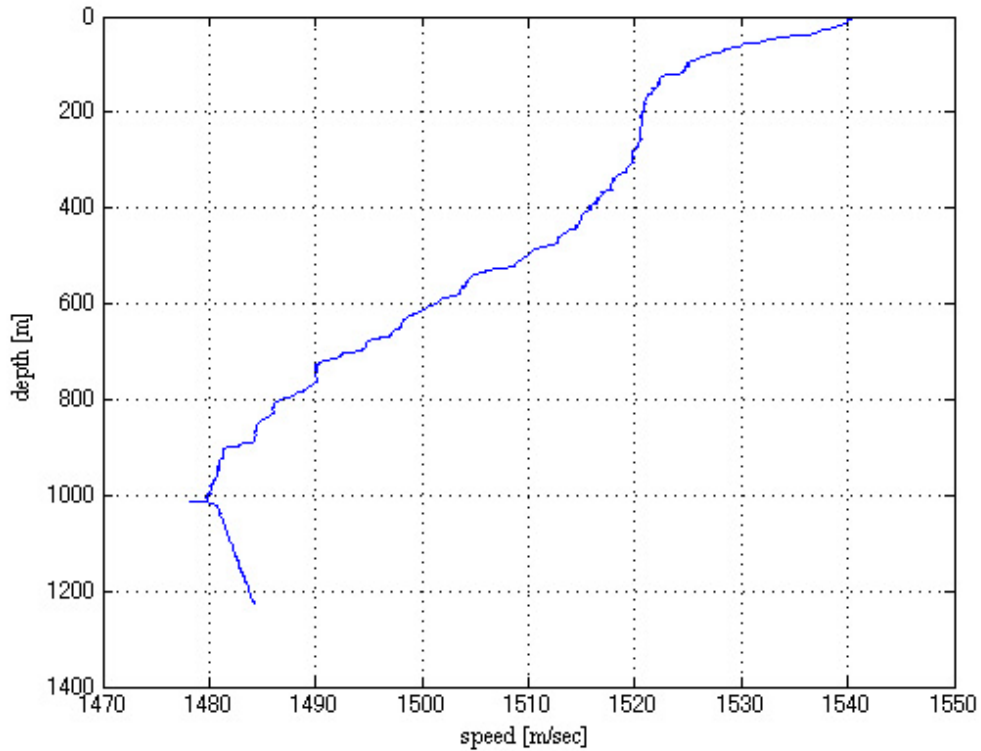


図 3.4. 水中音速プロファイル .

($-200, -150$), ($200, 150$) とし, 音源の位置を 50m 刻みで変化させる . この時, それぞれのアレイから音源への正しい方向ベクトルに対して, SBL システムの方位推定誤差を加え, また GPS の位置推定誤差を 10m とし, 最小自乗法による位置推定の式 3.33 を 2 次元平面に適用することで, 計算された推定位置と, 予め定めた音源位置との距離の誤差を計算する . 水平面での位置推定誤差の見積もり結果を図 3.5 に示す . 図の黒点がアレイの位置を示し, 色の濃さで誤差の大きさを表す . なお, 誤差の最大値を 50m としして図を描写している .

垂直方向の推定誤差を見積もるために, アレイの位置をそのままに, 音源の位置を $(x, y) = (0, 0)$ とし, 深さを 0 ~ 1000m から 50m の間隔で変化させる . 先ほどと同様に音源への正しい方向ベクトルに, SBL システムの方位推定誤差と,

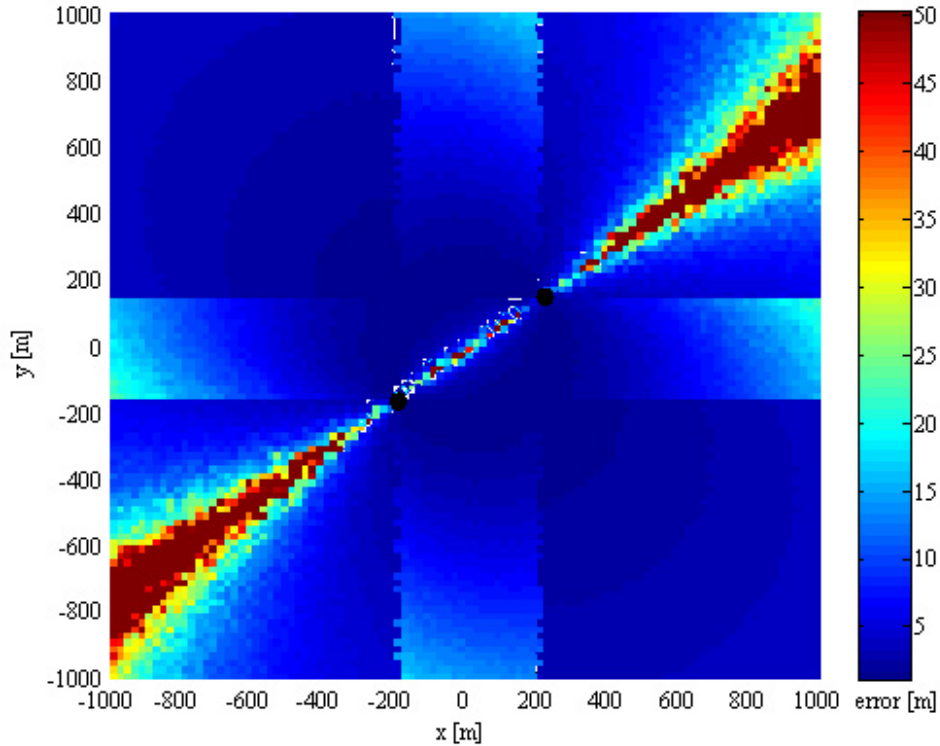


図 3.5. 水平面での位置推定誤差の見積もり.

図 3.4 から計算できる音の屈折誤差を加え，計算された位置と設定した位置との誤差を計算し，この計算結果を図 3.6 に示す．

3.5 アレイの展開方法

図 3.5 と図 3.6 を比べると，垂直方向の方が誤差が大きい．ハイドロフォンのうち 3 つが水平方向に配置されているため，到来時間差の計算精度が垂直方向よりも良く，垂直方向の到来方向は音の屈折の影響も考慮しているからである．図 3.5 より，アレイを結んだ直線上の範囲で位置推定の誤差が大きくなっていることが分かる．このため，二基のアレイを結ぶ直線がクジラの進行方向に対して直角になるように展開すれば，水平方向の位置推定は個体識別を行うに足る

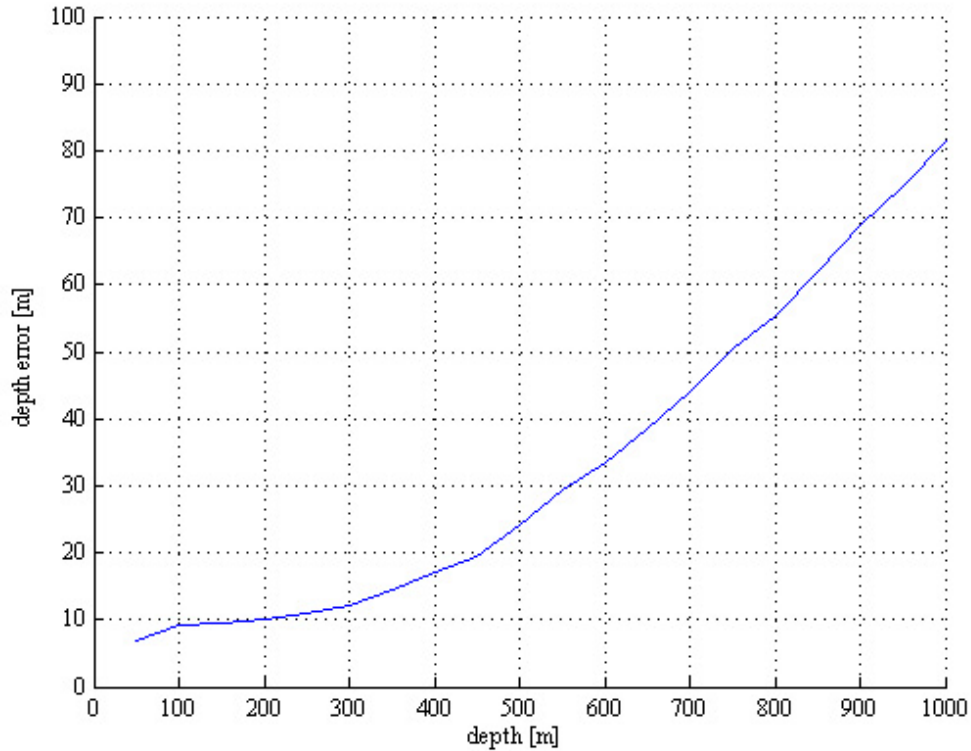


図 3.6. 深さ成分の位置推定誤差の見積もり。

精度を得ることができる。また垂直方向では、マッコウクジラの大きさが 30m 以下であることを考慮しても、600m 以下の深度にいる複数の個体が非常に近くに泳いでいる際に、それぞれを識別することは難しいといえる。

3.6 自律型海中ロボット AUV による水中観測

自律型海中ロボット AUV (Autonomous Underwater Vehicle) は、海中で起こる様々な事象を解明されるために開発されたロボットの総称である [20, 79]。海中ロボットは陸上用のものと異なり、水中では浮力があるために行動力が大幅に向上するため、3次元運動を可能にするような設計が行われている。AUV の運用として、海底ケーブルの保守・点検や、海底面の地図の作成、海底資源の

調査，海中構造物の保守点検などが挙げられる．

3.6.1 AUV の特徴

海中ロボットは大きく分けて次の3つに分類される．

- 有人潜水艇
- 有索式無人ロボット (ROV: Remote Operated Vehicle)
- 自律型無人ロボット (AUV)

有人潜水艇は，JAMSTEC[27] 保有のしんかいシリーズに代表されるようなロボットで，海中ロボットに人間が乗り込み，各種のセンサーからロボットの状態を判断し，運用する水中ロボットである．マニピレータを用いた細かい作業を行える利点を持つが，人間が乗り込むため，酸素・空間を用意しなければならないという欠点をもつ．また海洋支援船が必須であり，人間が搭乗するという前提から危険な海域に送り出すことはできない．

ROV は，海上支援船からアンビリカルケーブルを繋ぎ，有線上で情報のやり取りをしながら海域の調査を行う無人ロボットである．有人潜水艇と比べ危険な海域での運用が可能であるという利点があるが，行動範囲がアンビリカルケーブルの届く範囲に限定され，複雑な航行を行うとケーブルが絡まってしまうという欠点も持つ．

AUV はこれら他のロボットにあるデメリットを克服したロボットであると言える．アンビリカルケーブルを必要とせずに，自律行動が可能であるという利点を持つため，危険海域での調査及び制約の無い行動範囲を持って活動することが可能である．しかしながら，バッテリー駆動であるという事から活動時間に制約がある事と，人工知能の開発が必要不可欠であるという難点も存在する．

3.6.1.1 AUV に搭載する AI(Artificial Intelligence)

AUV は人工知能が必要であるが、AI には強い AI と弱い AI という概念がある。強い AI とは、人間の知能を人工的に実現することを意味し、海中において人間に置き換わる知能を持つロボットの AI ということになる。これに対し弱い AI とは、人間の知能の働きを増幅し支援することを目指し、有人潜水艇や ROV のようなロボットの操縦をより簡易に行える働きをする AI である。AUV においては、海中でほぼ独立で行動するため、人間の補助としてではなく、独立した行動体として強い AI が求められている。しかし、人間にとって代わるほどの AI が必要というわけではなく、人間の目的に沿った行動が行えれば良く、その目的を遂行できる程度の知識を持った AI を用いれば良い。

3.6.1.2 AUV の種類

AUV の欠点を克服するための電力運用や、自律行動システムの開発は難しく、世界的に AUV を用いて作業を遂行したり、有効な結果が得られたという例は少ない。AUV の研究開発は世界的には多く、多岐にわたり実用化されているが、その多くは長期間の運用できるという利点を利用したものであり、その運動性を十分に発揮する点にまで至った例はあまり報告されていない。

国内で活動している代表的な AUV としては、東京大学生産技術研究所保有の Tri-Dog[33]、TUNA-SAND[52]、IKURA[64]、R 計画の R-one Robot[68] や r2D4[49]、JAMSTEC が開発したうらしま [27]、KDDI(現 KCS) 保有の Aqua Explorer 2[9]、Aqua Explorer 2000[7] などが挙げられる。

3.6.2 Aqua Explorer 2000

AUV は用途・目的に応じて設計することが理想とされるが、マッコウクジラの追跡に関しては既存の AUV を用いることを考える。近年、データロガーによりマッコウクジラの潜水行動時の潜水速度が明らかにされてきているため、追

表 3.1. AUV と比較した鯨類の運動能力 .

名称	最大潜水深度	潜水時間	遊泳速度
マッコウクジラ	3000m	平均 1 時間	平均 8km/h
マスイルカ	260m	平均 8 分	平均 26km/h
シロナガスクジラ	150m	平均 15 分	平均 20km/h
ザトウクジラ	100m	平均 10 分	平均 9km/h
R-One	400m	20 時間	最高 6.5km/h
r2D4	4000m	12 時間	最高 5.8km/h
Aqua Explorer 2	500m	8 時間	最高 5.8km/h
Aqua Explorer 2000	2000m	16 時間	最高 5.8km/h

跡に特化した AUV を設計することも視野に入れている。追跡という観点からは、マッコウクジラの運動性能を超えることが必要となるが、現在の AUV ではマッコウクジラの運動性能を超えるものはなく、その性能に近い AUV を選択せざるを得ない。表 3.1 に、鯨類の運動能力と代表的な AUV の比較を示す。マッコウクジラの運動性能にある程度近く運行可能な AUV は r2D4、Aqua Explorer 2000 が挙げられる。Aqua Explorer 2000 は r2D4 より小型の AUV であり、専用の運用母船が使えないという状況では、小型の方が運用に関する負担は減るため、よりマッコウクジラの追跡に注力することが可能となる。これらから、マッコウクジラの追跡には Aqua Explorer 2000 が最適であると考えられる。

Aqua Explorer 2000 の外観を図 3.7 に、仕様を表 3.2 にそれぞれ示す。Aqua Explorer 2000 は海底ケーブル設置前の海底状況調査と、非埋没・埋没ケーブルの設置状況調査で活躍しており、2004 年・2005 年度には小笠原近海でマッコウクジラの追跡実験に使用されている。直接海上支援船からの音響リンクによる遠隔測位が可能であるほか、事前のプログラミングにより各センターからの



図 3.7. Aqua Explorer 2000 「AE2000」.

データに基づいて支援船の制御無しに海底ケーブル上をトラッキングしながら各種調査が可能な AUV である。

3.7 本章のまとめ

本章では、自律型海中ロボットと二基のハイドロフォンアレイを用いたマッコウクジラ観測システムについて述べた。二基の SBL アレイによる水中測位の原理を、SBL システムによる方位推定、LBL システムによる位置推定についてそれぞれ示し、相互相関、カーブフィッティングによる補間、最小自乗法による音源の到来方向推定、及び最小自乗法を用いた三次元位置推定の原理式を示した。二基のアレイによる位置推定で発生する誤差に関して、その要因を挙げ、水平面・垂直面で誤差の見積もりを行い、アレイの展開方法について述べた。マッコウクジラの水中観測を行う AUV について、一般的な AUV の特徴を挙げ、追跡に用いる AUV である Aqua Explorer 2000 の性能について示した。

表 3.2. Aqua Explorer 2000 の仕様 .

重量	300kg
寸法	300mm × 1300mm × 900mm
連続潜行時間	16 時間
電源	充電式リチウム電池 , 129V , 2.8kwh
構造材	ポリエチレン
設計潜水深度	2000m
基本仕様	スチルカメラ・TV カメラによる記録 ケーブルドッキング及び埋葬深度の計測

第4章

位置推定手法

4.1 本章の概要

本章では、マッコウクジラの位置推定手法を提案する。本手法は、二基のハイドロフォンアレイから得られる音声データ、ハイドロフォンに取り付けられた傾斜計・磁気計などの機器データ、そしてGPSの位置データより、マッコウクジラの位置を自動的に推定することを目的する。本手法の全体図を示した後、それぞれのアレイで独立して行うクリックの検出、鳴音の到来方向の推定、鳴音のクラス分け手法についてそれぞれ示し、二基のアレイで構築されたクラスから対応する相手側のクラスを発見するクラスマッチング手法について述べる。本手法は、AUVによるマッコウクジラの追跡観測を実現させることを目標としているため、推定されるマッコウクジラの位置についてそのリアルタイム性について考察を行う。

4.2 位置推定手法の全体図

位置推定手法の全体の処理の様子を図4.1に示す。二基のアレイをそれぞれアレイA、アレイBとし、アレイからの入力となるデータセットは、格子状に取り付けらハイドロフォンより得られた4チャンネルの音響データ、アレイの

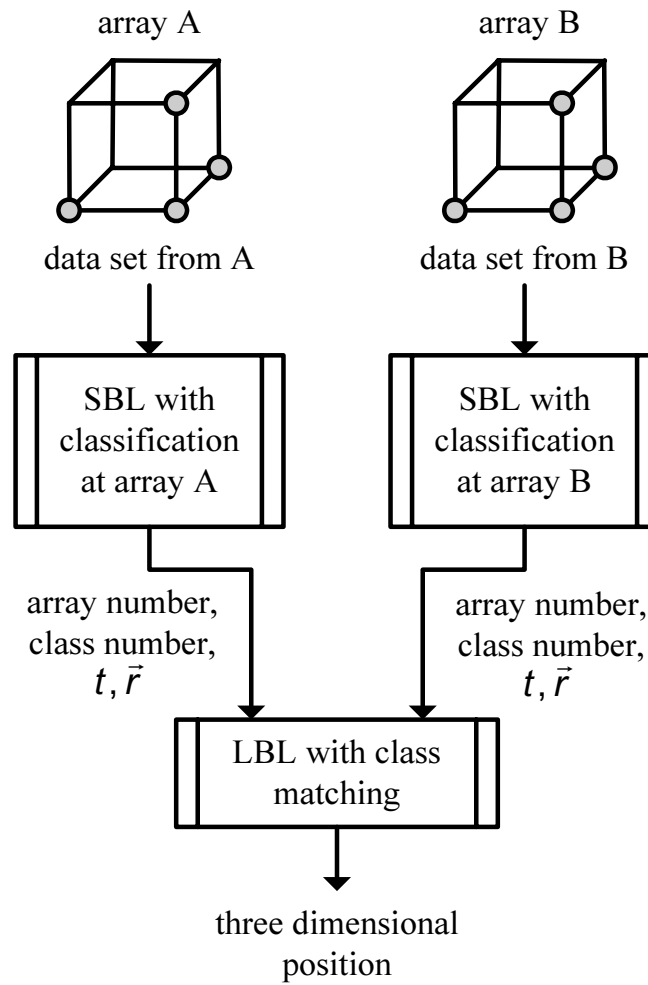


図 4.1. 提案手法の全体図 .

傾きを示す傾斜計のデータ，音源への方向を相対方向から絶対方向へと変換する磁気計，そしてアレイの位置を示す GPS データである．これらのデータセットに対し，それぞれのアレイで，クリックの検出，SBL システムによる方向推定を行い，得られた方向推定結果を元に鳴音をクラス分けし，それぞれのアレイでクラスを構築する．構築されたクラス情報を元に，対応するクラスを発見するクラスマッチングを行い，対応するクラス同士のデータを用いて LBL システムによる位置推定を行うことで，マッコウクジラの三次元位置情報を得る．

4.3 各アレイでの方位推定とクラス分け

それぞれのアレイで行う SBL システムによる方位推定とクラス分けの様子を図 4.2 に示す．まず，それぞれのハイドロフォンから 5msec の音声データを読み込み，読み込んだセグメント内にクリックが存在するかどうかを判定し，クリックが存在すると判断したら，方向推定を行う．海面からの反射音のミス検出を排除したら，クリックのクラス分けを行い，更新されたクラス情報を次の解析ステップに送信する．

4.3.1 クリック検出

クリック検出の様子を図 4.3 に示す．各ハイドロフォンで得られる音響データは複数のクジラのクリックを含んでいる可能性がある．クリックはマルチパルス構造の中で最も強い成分のパルス p_0 の長さは一般的には 5msec 以内である．クリックとクリックの間隔 ICI は 0.5 ~ 2sec である事から，ハイドロフォン 1 チャンネルの音響データを 5msec のセグメント毎に分割し，それぞれのセグメントに対してクリック検出を行う．

クリックの検出は図 4.3 に示すように，自動で行われ，検出された時間を元に，他のハイドロフォンのデータを抜き出し，図 4.4 に示す方位推定を行う．クリックは，シーノイズや過渡ノイズと比べエネルギーが高いので，単純な音圧

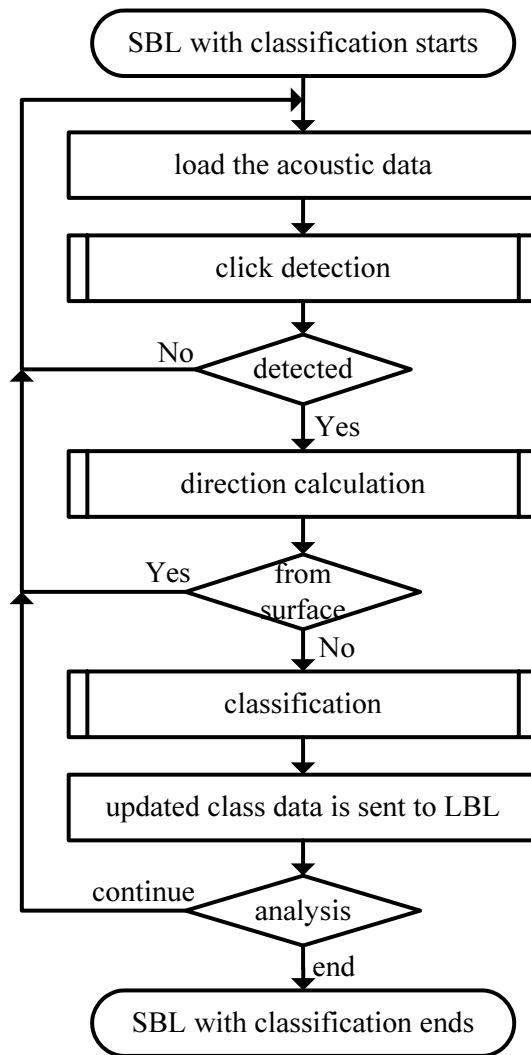


図 4.2. 各アレイでの方位推定とクラス分けの処理フロー .

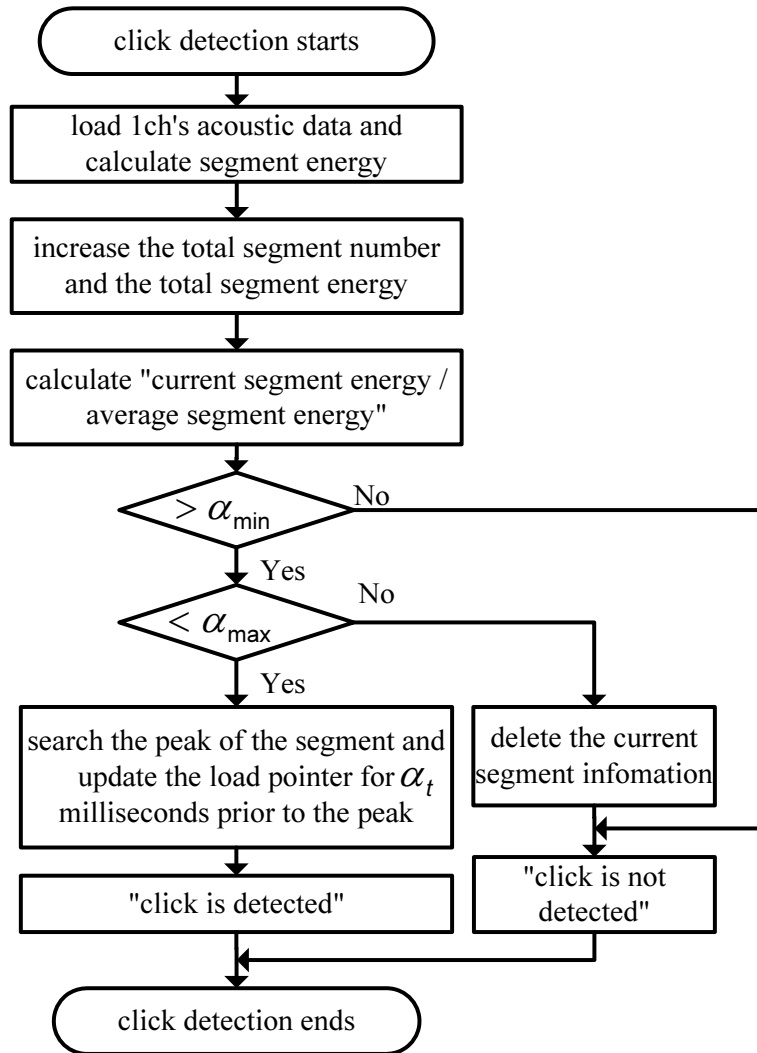


図 4.3. クリック検出の処理フロー .

ベースのスレシヨルティングによるクリック検出を行うのではなく、エネルギーベースで閾値を設け、セグメントにクリックが含まれているか判定する [12]。各セグメントのエネルギーを、これまでのセグメントの平均エネルギーと比較し、平均エネルギーの α_{min} 倍よりも小さいセグメントにはクリックが含まれていないと判断する。ここで、平均エネルギーの α_{max} 倍よりも大きいセグメントに対しては、エネルギーが大きいと見做し、クリックの検出は行わない。

クリックが検出された後に、セグメント内で音圧最大の点を見つけ、最大点の時間から α_s msec 戻り、この戻った時間を基準に他の3チャンネルの音声を抜き出す。海洋実験ではハイドロフォンが5mの深さに投下されているため、最初のパルス p_0 の約3~7 msec 後に海面反射音を確認される。海面反射音はハイドロフォンへ直接伝わった直達音よりも高周波成分が主であるが、そのエネルギーはノイズと比べて大きいため、読み込み点の更新をしないと、海面反射音をクリックとして解析してしまう恐れがある。

4.3.2 方位推定

図4.4に、音源への方位推定の処理フローを示す。方位推定では、クリック検出部でクリックが存在すると判断されたセグメントの最大音圧点の時間から α_s msec 前を、音声抜き出しの開始時間として、4チャンネルの音声セグメントを抜き出す。抜き出された音声セグメントに対し、2チャンネルの音声に対し、相互相関関数を求め、ピーク点の近傍5点をカーブフィッティングすることで、到達時間差の計測を行う。6つ全てのチャンネルの組み合わせに対して、到達時間差を計算し、検出したクリックの相対的な到来方向を推定する。推定された到来方向を、アレイからの傾斜計・磁気計の値で補正することで、到来方向を絶対方向で算出する。

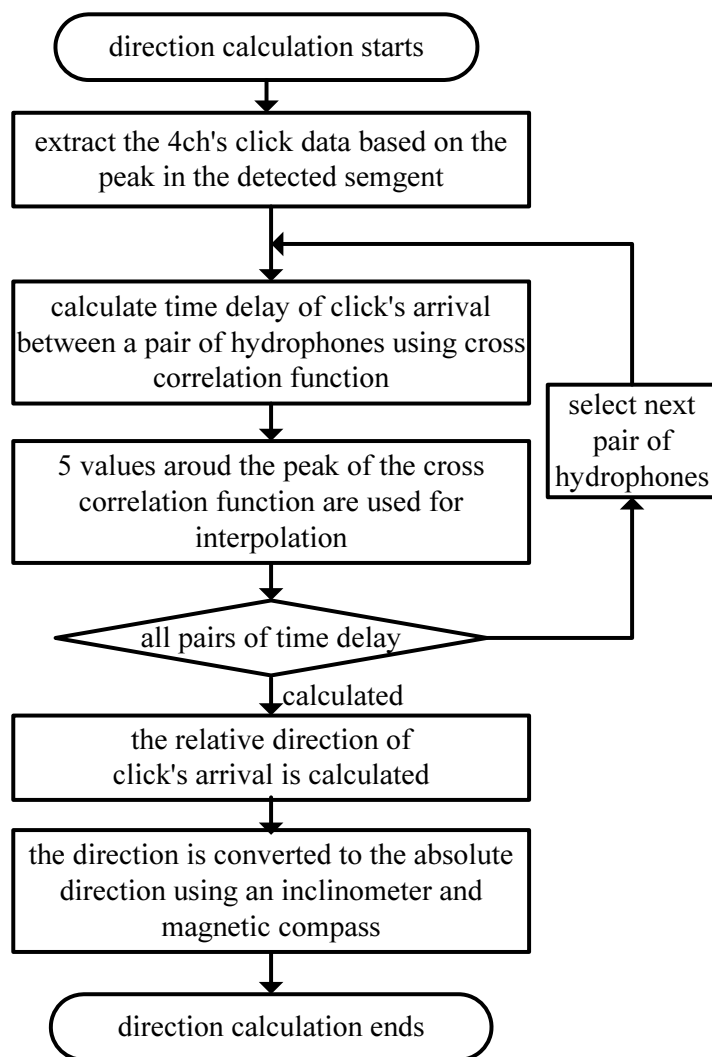


図 4.4. 方位推定の処理フロー .

4.3.3 クラス分け

クラス分けは、それぞれのアレイでの方向推定の結果を元に行われる。クラス分けを行う主な目的は、対応するクリックの解析結果を他のアレイから探す際のマッチング候補の絞り込むことと、その時に必要となる情報をできる限り抑えることである。

クラス C と、クラスの要素 $\{n, T, t, \vec{R}, \vec{r}\}$ は以下のように定義される。

$$C = \{n, T, t, \vec{R}, \vec{r}\} \quad (4.1)$$

$$T = \{t_i\} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4.2)$$

$$\vec{R} = \{\vec{r}_i\} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4.3)$$

ここで、 n はそのクラスに属するクリックの個数、すなわちクラスが持つデータのサイズを示す。各クリックの検出時間を T 、及びその到来方向ベクトルを \vec{R} とし、クラスに属するクリックの中で最新の検出時間を t 、到来方向ベクトルの代表値を \vec{r} とし、以下の式で表す。

$$\vec{r} = \sum_{i=1}^n \vec{R}_i / n \quad (4.4)$$

図4.5に、クリックをクラス分けする処理フローを示す。クラス分けでは、リスト構造の分類リストを構築し、分類リストの中に、クラスのデータ、クラスに属するクリックのデータを保持する。分類リストのインデックスにはクラスの代表値を保持し、そのクラスに属するクリックの検出時間、到来方向ベクトルなどのクリックデータがインデックスに続いて格納される。この様子を図4.6に示す。クリック検出部、及び方向推定部で解析・パラメータの算出が行われた新しいクリックをクラス分けする際に、その検出時間 t_{add} と方向ベクトル \vec{r}_{add} を元に、分類リスト内の存在する既存のクラスに属するか否かをまず判定する。

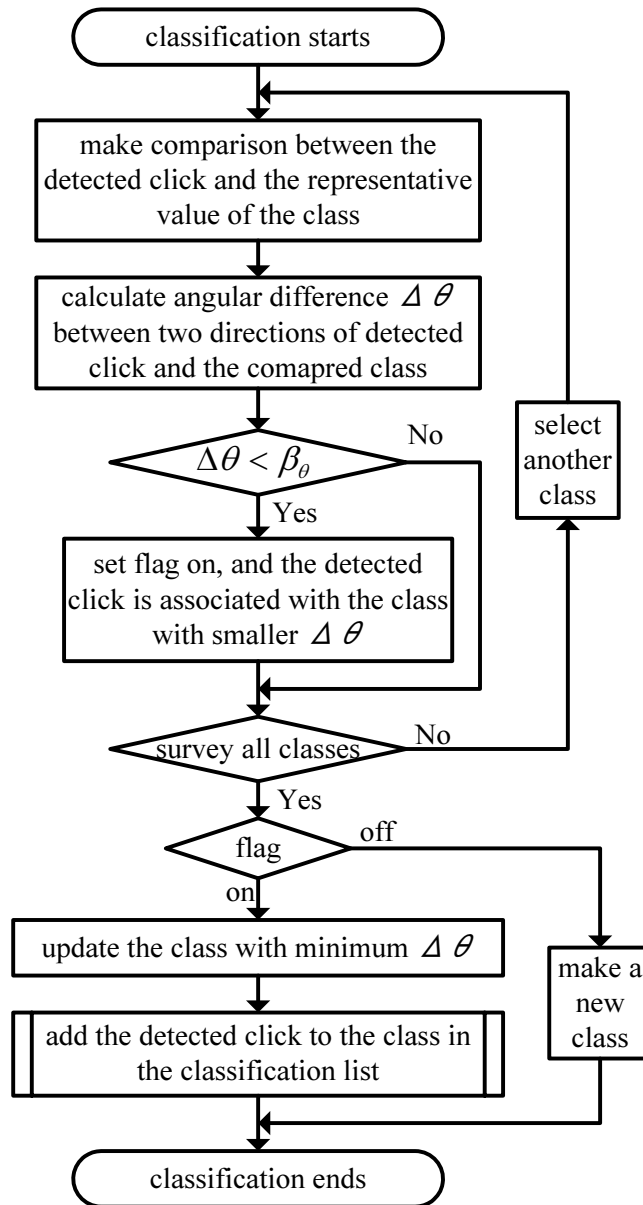


図 4.5. クラス分けの処理フロー .

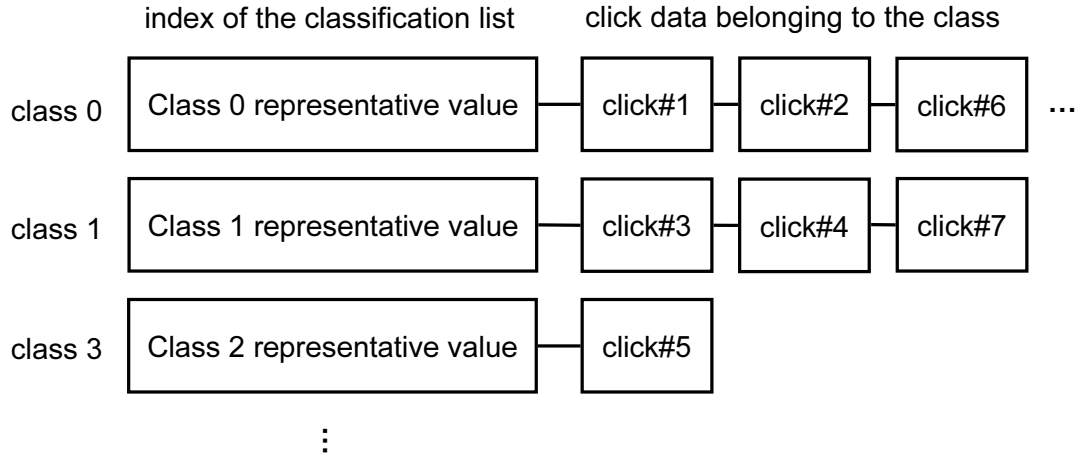


図 4.6. 分類リスト.

この時、新しいクリックの方向ベクトルと、クラスが持つ方向ベクトルの成す角度 $\Delta\theta$ を計算する。

$$\Delta\theta = \arccos(\langle \vec{r}, \vec{r}_{add} \rangle / (|\vec{r}| |\vec{r}_{add}|)) \quad (4.5)$$

成す角 $\Delta\theta$ をクラス分け角度閾値 β_θ と比較し、角度閾値以内のクラスが無い場合は、新しいクリックを元にクラスを作成する。閾値以内のクラスがある場合には、その中から成す角度が最小のクラスに新しいクリックを分類する。分類リストへのクリックを追加する処理を図 4.7 に示す。

分類リスト内のクリックを追加する際に、まず該当するクラスのインデックスにアクセスし、クラスに属する全クリックと、追加するクリックの検出時間差 Δt を以下のように計算する。

$$\Delta t = t_{add} - t_i \quad (4.6)$$

検出時間差 Δt が時間閾値 β_t よりも大きければ、比較したクラスのクリックは古いものであると判断し、分類リストから削除する。追加するクリックとの検出時間差から古いクリック情報を削除した後に、クラスの代表値の更新を行

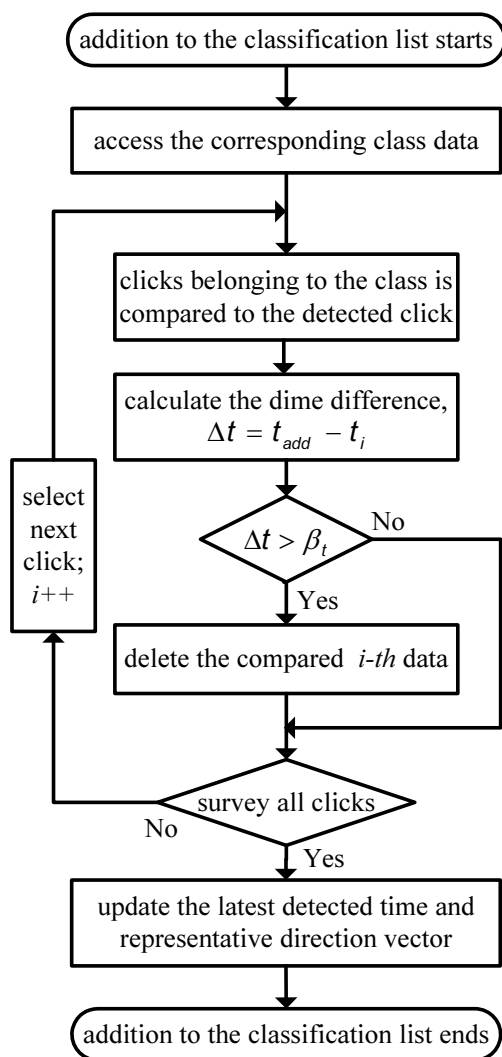


図 4.7. 分類リストへのクリック追加の処理フロー .

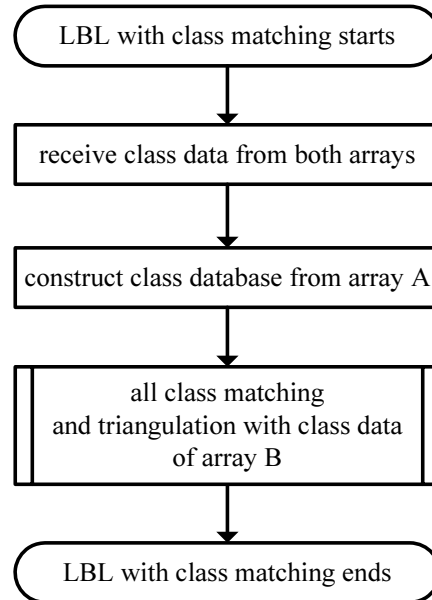


図 4.8. LBL システムによる位置推定の処理フロー .

う . 代表値の最新検出時間 $t = t_{add}$ とし , 代表値の方向ベクトル \vec{r} を式 4.4 で計算し , これをインデックスに格納する . 図 4.4 で計算される方向ベクトルは , 誤差を含むことから , ある時間閾値 β_t 以内で平均化を行うことで , 方向ベクトルのゆらぎを減少させる .

クラス分けが終了したら , アレイの識別番号 , クラス番号 , クラス代表値の検出時間 t , 方向ベクトル \vec{r} を , 次のステップに送信し , 位置推定を行う .

4.4 クラスマッチングと位置推定

図 4.1 に示したように , 各アレイで行う方位推定をクラス分け (図 4.2) で得られたクラス情報を用いて , 相手側のアレイで構築されたクラスから対応するクラスを発見し , LBL システムによる位置推定を行う . 図 4.8 に , LBL システムによる位置推定の処理フローを示す .

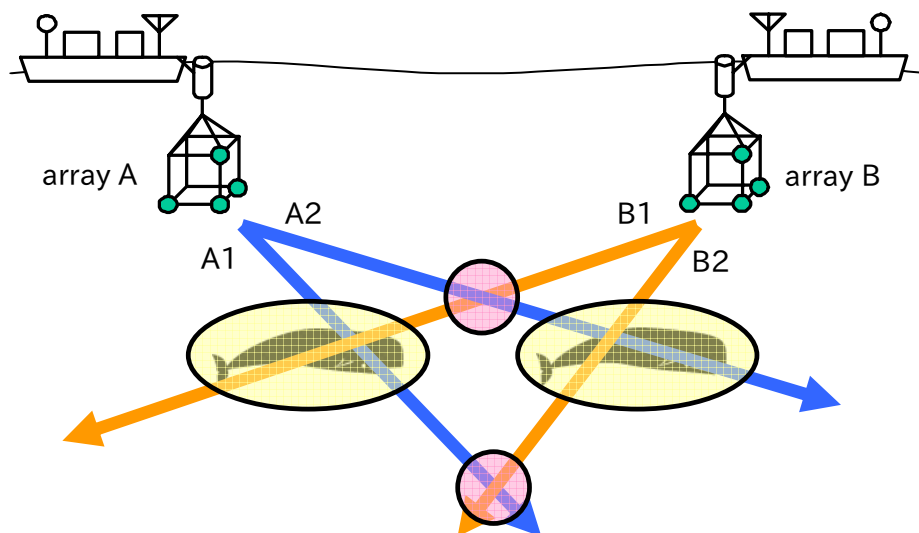


図 4.9. クラスのミスマッチと位置推定ミス例.

4.4.1 マッチングの問題点

二基のアレイからの得られる方向ベクトルをマッチングさせ位置を推定する際に、図 4.9 に示すような問題が発生する可能性がある。図 4.9 では、二基のアレイ A, B から二頭のクジラ Target1, Target2 のクリックを解析し、位置の推定を行う様子を示している。二頭のクジラからのクリックに対して、二つのアレイでクラス A1, A2, B1, B2 が構築される。二頭のクジラの位置を推定するためには、クラス A1 と B1, A2 と B2 をそれぞれマッチさせ、マッチさせたクラスの方向ベクトルと、アレイの位置情報を用いて、式 3.33 により三角測量を行えばよい。しかし、クラスをマッチさせる際に、A1 と B2, A2 と B1 を対応させると、本来ならば存在しないはずのクジラの位置を推定してしまい、正しく位置推定を行うことができない。

図 4.9 のようなクラスのミスマッチを防ぐには、クリックから個体を識別できるようなパラメータを求め、クラスマッチングの際に、この個体識別パラメータを元に対応するクラスを発見すればよい。Goold らはマッコウクジラの個体

識別のパラメータとして IPI を提案しているが [21], Zimmer らなどが報告しているように [81, 82], 同一の個体では IPI が同じ値になる事が予想されること, 体軸の変化により IPI が変化するため, 離れたところに展開されているアレイでは同一の個体の IPI が同じ値にならないことが考えられることなどから, IPI を用いた対応するクラスの発見は難しい.

4.4.2 全クラスマッチング

本論文で提案する位置推定手法において, 位置推定を行う際には, 相手側の全てのクラスとマッチングさせる全クラスマッチングを行い三角測量による位置推定を行うことで, クジラが存在する可能性のある全ての位置を求める. 図 4.9 の場合なら, 二頭の正しいクジラの位置と, 2 つの間違って位置の計 4 つの候補位置を求める. そして, それぞれのアレイでのクラスの方向ベクトルの変化に注目し, 変化の特徴点から対応するクラスを発見し, 対応するクラス同士をマッチングさせ得られた位置推定させた結果を, 提案手法により求められるマッコウクジラの位置とする.

図 4.10 に全クラスマッチングによる処理フローを示す. まずそれぞれのアレイから送られてくるクラスデータを受け取る. アレイ A のクラスデータならばデータベース化し, アレイ B のクラスデータを受け取った際にアレイ A のクラスデータベース内に存在する全てのクラスとマッチングさせる. この際に, クラスの検出時間を比較し, この時間差 Δt が, 時間閾値 γ_t sec よりも大きければ, クラス同士の検出時間が離れすぎているのでマッチングはしない. 二つのクラスの方向ベクトルを用いて, 三角測量による位置推定を行い, 求められた位置が水面より上でないこと, アレイからの距離が距離閾値 γ_L 以内であることをチェックし, 計算された位置を保存する.

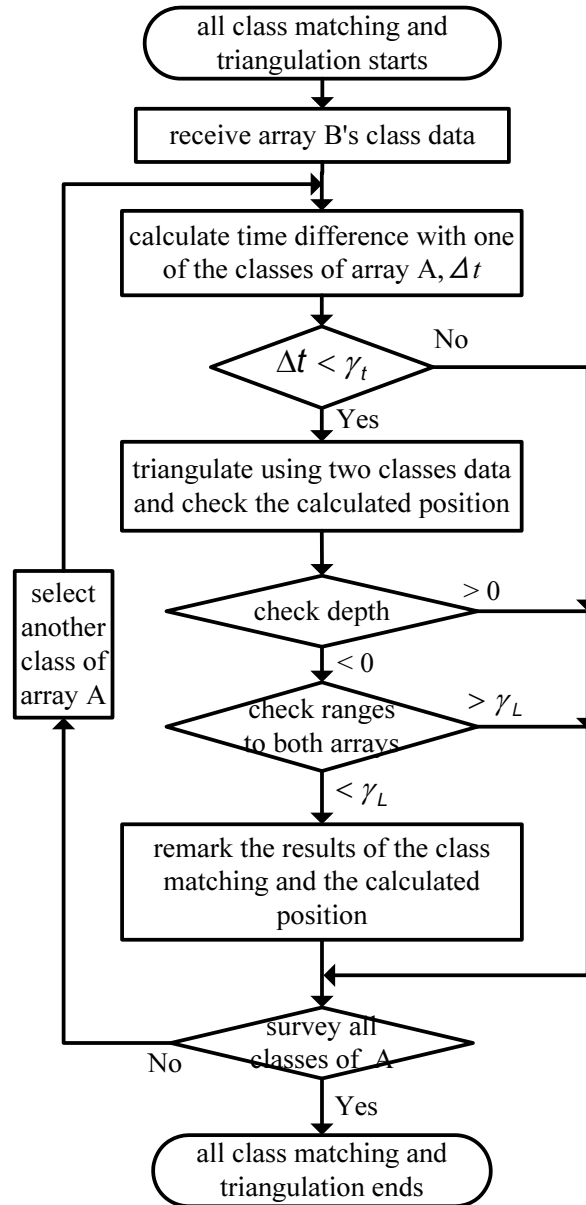


図 4.10. 全クラスマッチングの処理フロー .

4.4.3 対応クラスの発見

図 4.10 の全クラスマッチングによる位置推定結果から，対応するクラス同士のマッチングによる位置結果を抜き出すために，二基のアレイが同じ深さに投下されている事に着目する．二基のアレイは図 3.1 に示したように，約 500 m 離れて展開されており，この時， x 軸 (東西) や y 軸 (南北) を揃えて展開はしないが，アレイはそれぞれ 5 m の深さに投下される．同じ深さにアレイが投下されているということは，マッコウクジラが急速に潜行する，浮上するといった行動を取った際に， z 軸 (深さ方向) の方向ベクトルの変化が，同じタイミングでそれぞれのアレイにて確認されるということである．また，同じクジラからのクラスであるならば，クラスが出現する時間や消える時間も同じであると考えられるため，クラスが持つ時間情報も，対応するクラスの発見に用いる．以上より，対応するクラスの発見には，クラスが出現・消失した時間，深さ方向の方向ベクトルの変化や形状といった特徴，及びその特徴が確認された時間を，他のアレイで構築されたクラスと比較することで行う．

4.5 リアルタイム性

AUV を用いたマッコウクジラの観測では，マッコウクジラのクリックからリアルタイムに位置を推定できることが重要となる．位置情報をリアルタイムに得ることで，追跡対象となるターゲットの決定や，AUV への追跡の具体的な指示を出すことができる．本章で本論文で提案してきた位置推定手法は，入力となるアレイからの音声データ，傾斜計・磁気計・GPS などの機器データを用いて全自動で行う．解析で用いる閾値は，解析前にあらかじめ設定しておき，解析中に変更することはしない．ここで，本手法により自動的に得られるマッコウクジラの位置情報とは，全クラスマッチングによる結果であるため，マッコウクジラが存在する可能性のある候補位置を指す．AUV によるターゲットの追

跡に必要なのは、クジラが存在する可能性のある候補位置でなく、クジラがきちんと存在する位置である。このため、対応するクラスの発見をリアルタイムに行うことができれば、そのマッチング結果を抜き出し、マッコウクジラの位置をリアルタイムに推定することが可能となる。

4.6 本章のまとめ

本章では、二基の hidroフォンアレイを用いたマッコウクジラの位置推定手法を提案した。本手法は、大きく分けて、(1) 各アレイでの方位推定とクラス分けと、(2) クラスマッチングと位置推定に分けられる。(1) 方位推定とクラス分けについて、その処理を行うためのクリックの自動検知、各 hidroフォン間の到達時間差を利用したクリックの到来方向ベクトルの算出、リスト構造の分類リストを用いたクラス分け手法について述べた。各アレイで行われるクラス分けにより構築されたクラスデータを用いて、(2) クラスマッチングと位置推定を行う。対応しないクラス同士をマッチングさせると、三角測量による位置推定で推定ミスが起きるため、これを防ぐ手法として、存在する全てのクラスとマッチングをさせ、クジラが存在する可能性のある位置全てを求める全クラスマッチングについて述べた。全クラスマッチングによる位置推定結果から、対応するクラス同士のマッチング結果のみを抜き出すために、クラスの特徴量に注目した対応クラスの発見法について述べ、提案手法全体のリアルタイム性について言及した。

第5章

計算機実験結果

5.1 本章の概要

本章では、提案手法による計算機実験の結果、及び結果に対し考察を行う。計算機実験に用いたマッコウクジラの音声を取得された2003年度に小笠原諸島近海で実施された海洋実験 [59, 67, 70, 71, 72] について、その概要と取得されたデータについて述べる。マッコウクジラの音声と機器のデータを用いたオフラインでの計算機実験の実装環境、設定した閾値について述べ、提案手法による実験結果を示す。実験結果は、それぞれのアレイでのクリック検出結果、方位推定結果、クラス分け結果について示す。各アレイのクラス分けの結果より、対応するクラスを決定し、それによって得られたマッコウクジラのトラジェクトリを示す。マルチパスが実験結果に与える影響、位置情報により求められる速度、深度とICIの関係についてそれぞれ考察し、提案手法の課題について述べる。

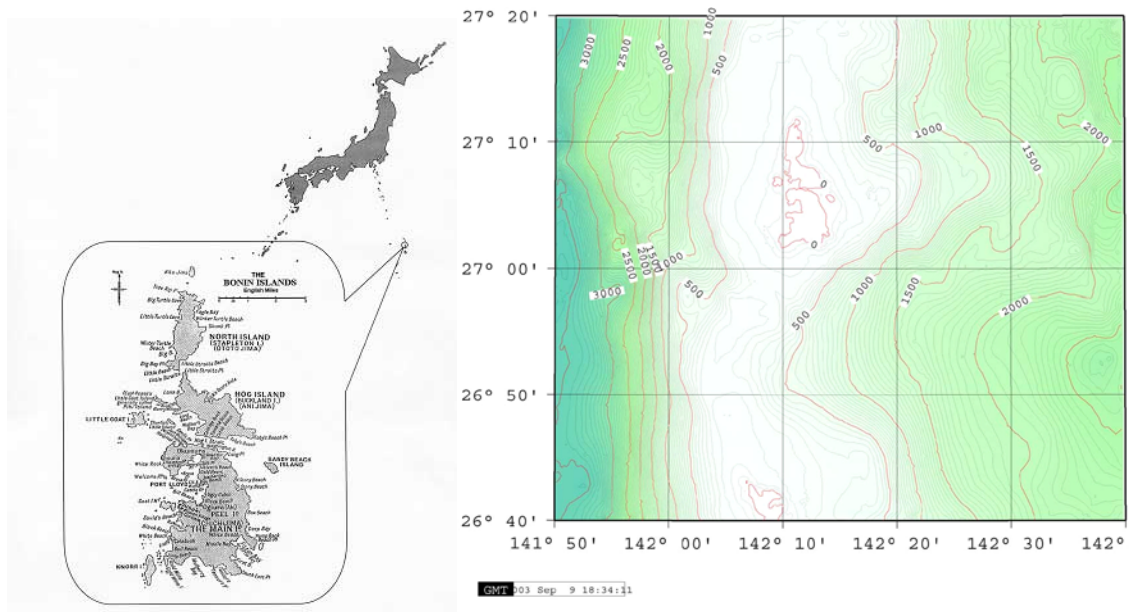


図 5.1. 小笠原諸島父島 [59] .

5.2 2003 年度小笠原実験

5.2.1 実験概要

2003 年度，8 月に小笠原諸島父島近海にて，二基のハイドロフォンアレイを用いたマッコウクジラの観測実験が行われた．2003 年度の実験では，AUV を用いずに二艘の観測船 (Assistant Boat, Support Vessel) からハイドロフォンアレイを海上から投下し，位置推定を行った．観測実験を行った海域について図 5.1 に，観測システムの概略図を図 5.2 にそれぞれ示す．

5.2.2 観測機器

それぞれの観測船に搭載された機器の全体構成について図 5.3 に示す．各観測船では SBL システムによる方位推定を行い，両船間に形成した無線通信を用いて LBL システムによる位置推定を行う．搭載される観測機器は，4 つのハイ

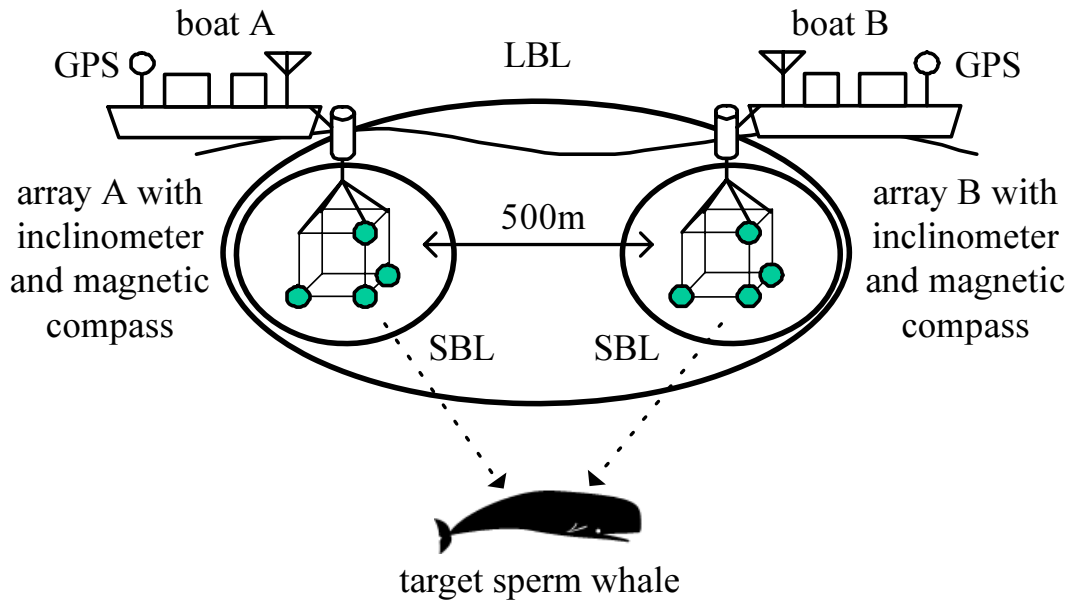


図 5.2. 2003 年度小笠原実験でのマッコウクジラ観測システム概略図。

ドロフォンからなるハイドロフォンアレイ, 分岐装置, プリアンプ, 解析用 PC, 記録用 PC, FPGA(Field Programmable Gated Array) ボード, GPS, 無線送受信機である。

5.2.2.1 ハイドロフォンアレイ

ハイドロフォンアレイは, 図 5.4 に示したように, 格子状に設計され, 各頂点にハイドロフォンが 30 cm のベースラインで計 4 つ配置されている。ハイドロフォンの他にも, 傾斜計と磁気計が取り付けられており, アレイの傾きの補正と, クリックの到来方向を絶対方位に変換する。ハイドロフォンのサンプリング周波数は 50kHz であり, ビットレートは 16bit である。

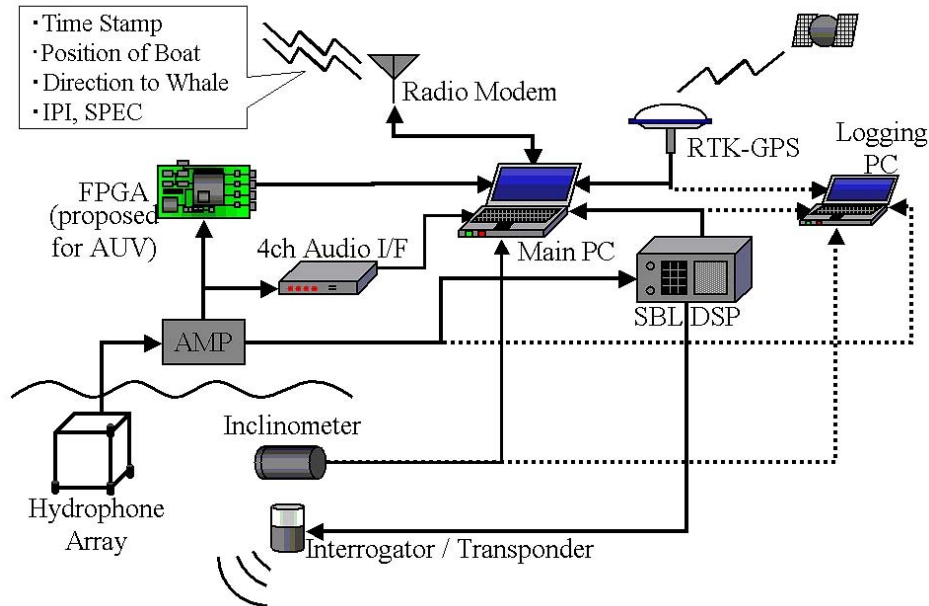


図 5.3. 観測船に搭載された機器の全体構成 [59] .

5.2.2.2 FPGA ボード

FPGA ボードは、クジラの到来方向を求めるための、クリック検出と到来方向推定を高速に処理するために設計・運用された [59, 60, 67] . 図 5.5 に、実際の海洋実験で用いられた FPGA ボードを示す . ボード上に配置されているものは FPGA , 4 基の 12bitA/D コンバータ, RS-232C シリアルポート 1 基である . FPGA チップとして Xilinx Virtex 2XC2V3000 [78] を用いている . FPGA ボードの仕様を表 5.1 に示す .

5.2.2.3 解析用 PC ・記録用 PC

ハイドロフォンアレイからの音響データ, 及び他の機器類のデータは, 解析用 PC と記録用 PC にそれぞれ送信される . 解析用 PC では, 入力されるデータに対し解析 [59] を行い, 記録用 PC では, 実験後に解析を行うために機器類の

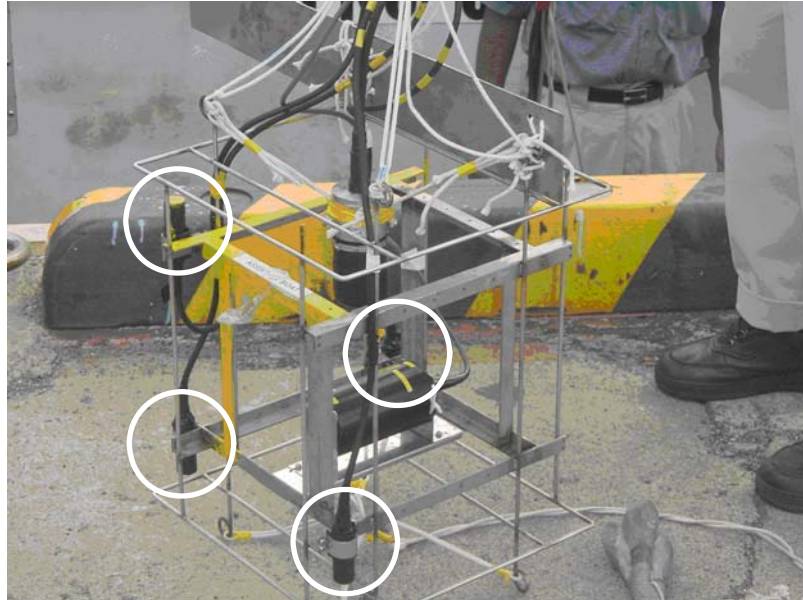


図 5.4. 海洋実験で用いたハイドロフォンアレイ [59] .

データを記録する．記録用 PC には，音声データは wav ファイル形式で保存され，傾斜計・磁気計・GPS の機器データは txt ファイルで記録されている．

5.2.3 観測状況

実験は，2003 年 8 月 17 日～25 日にかけて行われ，海上での観測は，17 日，18 日，20 日，21 日に行われた．図 5.6 に 2 艘の観測船の航路図を示す．実験中は，それぞれの観測船からの目視観測によりマッコウクジラの噴気や背中が発見を行う．それと同時に水中に聴音用のハイドロフォンを投下し，付近で鳴いているマッコウクジラの確認も行う．マッコウクジラの見発後，観測船をクジラの近くまで接近させ，距離を約 500 m 程に展開させた後に，エンジンを停止させてハイドロフォンアレイを水中に投下する．実験中はハイドロフォンアレイとは別に，聴音用のハイドロフォンを降ろし，マッコウクジラのクリックが聞こえなくなるまで約 1 時間の観測を行った．

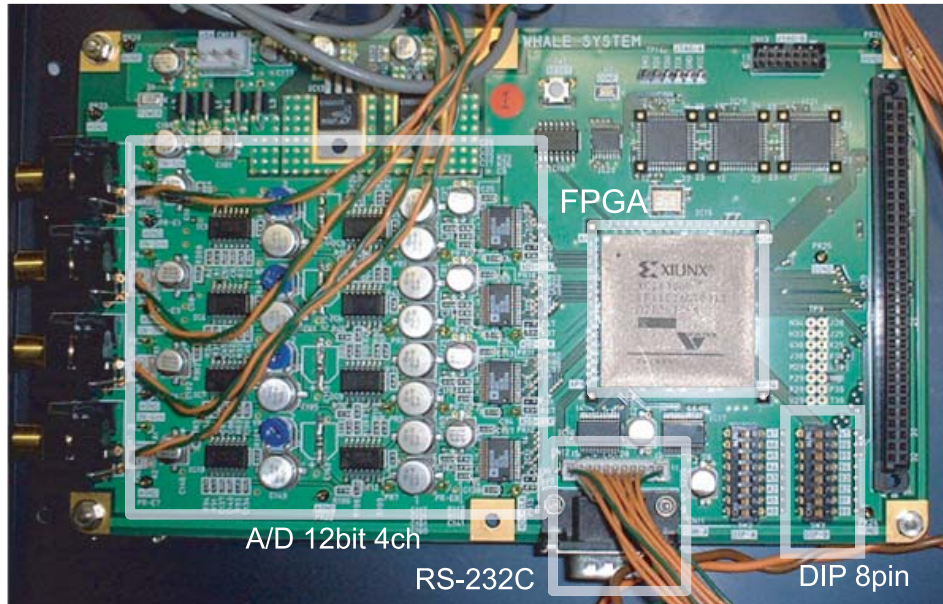


図 5.5. FPGA ボード [60, 67] .

5.2.4 解析データ

本論文で提案手法の評価に用いる実験データは、2003年度の8月21日に取得されたものを用いる。実験で使用された観測船 Assistant Boat と Support Vessel を、本論文ではポート A、ポート B とし、それぞれの観測船から降ろしたハイドロフォンアレイをそれぞれアレイ A、アレイ B とする。それぞれのアレイで録音された約 40 分間の 4 チャンネルの wav ファイル形式の音声データと、傾斜計・磁気計・GPS の値を記録した txt ファイルを計算機実験に用いる。

アレイ A で観測されたマッコウクジラのクリックサンプルを図 5.7 に、アレイ B で確認されたマッコウクジラのクリックサンプルを図 5.8 にそれぞれ示す。図 5.7, 図 5.8 共に、1 秒間の音声データを抜き出し、その波形とスペクトログラムを示し、マッコウクジラのクリックを白枠で囲っている。図 5.7, 図 5.8 より、クリックは背景雑音と比べエネルギーが高く、特に 0~5kHz に強い成分が

表 5.1. FPGA ボードの仕様 .

FPGA	ICI Xilinx Virtex2 XC2V3000
寸法	120mm × 240mm
入力	12bit A/D 4ch
出力	RS-232C 57.6kbps (入力も可能)
その他	内部設定用 DIP 8pin

あることがわかった。また，図 5.9，図 5.10 に，それぞれのアレイで確認されたノイズのサンプルを示す。図 5.9，図 5.10 で共に見える非常に強いエネルギーをもった信号は，実験中に二つのポートで音響通信を行う際に用いたトランスポンダの音である。図 5.9，図 5.10 を比較すると，アレイ A の音声には，電源からくると思われるスパイクノイズが頻繁に確認されている。

5.3 計算機実験環境

提案手法は，マッコウクジラの音声解析を行うソフトウェアに実装した。解析ソフトウェアは C++ で記述されて，Microsoft Visual C++ 2005 Express Edition[42] を用いてコンパイルを行った。解析ソフトウェアは，アレイ A と B の計 8 チャンネルの音声ファイルと，各アレイでの機器データをリアルタイムに読み込み，それぞれの解析結果を csv ファイルの形式で出力する。解析はマルチスレッド環境で実行され，各アレイでの方位推定とクラス分け，位置推定にそれぞれ専用のスレッドを割り当て実行させることで，処理の高速化を図る。なお解析結果はスレッド間通信を用いてやり取りされる。

表 5.2 に解析で用いる閾値等のパラメータの設定を示す。4 つのハイドロフォンのベースラインは 30cm であることから，クリックが存在すると判断されたセグメントの音圧ピーク点から戻る時間 $\alpha_s = 1\text{msec}$ とし，またハイドロフォン

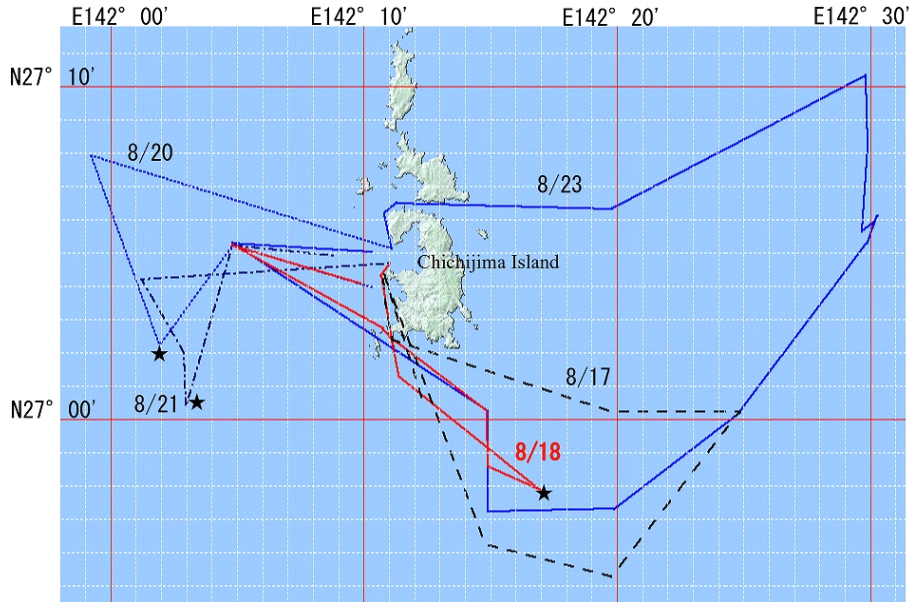


図 5.6. 2003 年度小笠原実験の航路図 [59].

アレイは海面から 5m の深さに投下されることから海面反射音を二重検出しな
 いたための次の読み込み点への更新時間 $\alpha_s = 10\text{msec}$ とする．現在のセグメント
 エネルギーと平均エネルギーを比較し，エネルギーの割合からクリックが存在
 するかを判断する閾値 $\alpha_{min} = 2.0$ ，エネルギーが大きすぎないかを判断する閾
 値 $\alpha_{max} = 20$ については，パラメータを変えてクリックの検出実験を行い，適
 当な値としてこれを設定した．

クラスの代表値を求める時間閾値 β_t については，クリックと次のクリックの
 間隔 ICI が一般的には $0.5 \sim 2\text{sec}$ であること，またクリックを検出できない可能
 性があることを考慮し， $\beta_t = 10\text{sec}$ と定めた．クラス分けの角度閾値 β_θ につい
 ては，この角度閾値を小さくとるとクジラが急激な方向変化をした際にクラス
 が途切れることが実験で確認され，逆に閾値を大きくとると別のクジラを同一
 のクラスと判定してしまうため，実験を行い $\beta_\theta = 15\text{deg}$ として定めた．位置推
 定の際に用いる距離の閾値 γ_L と，クラスを全クラスマッチングさせる際の時間

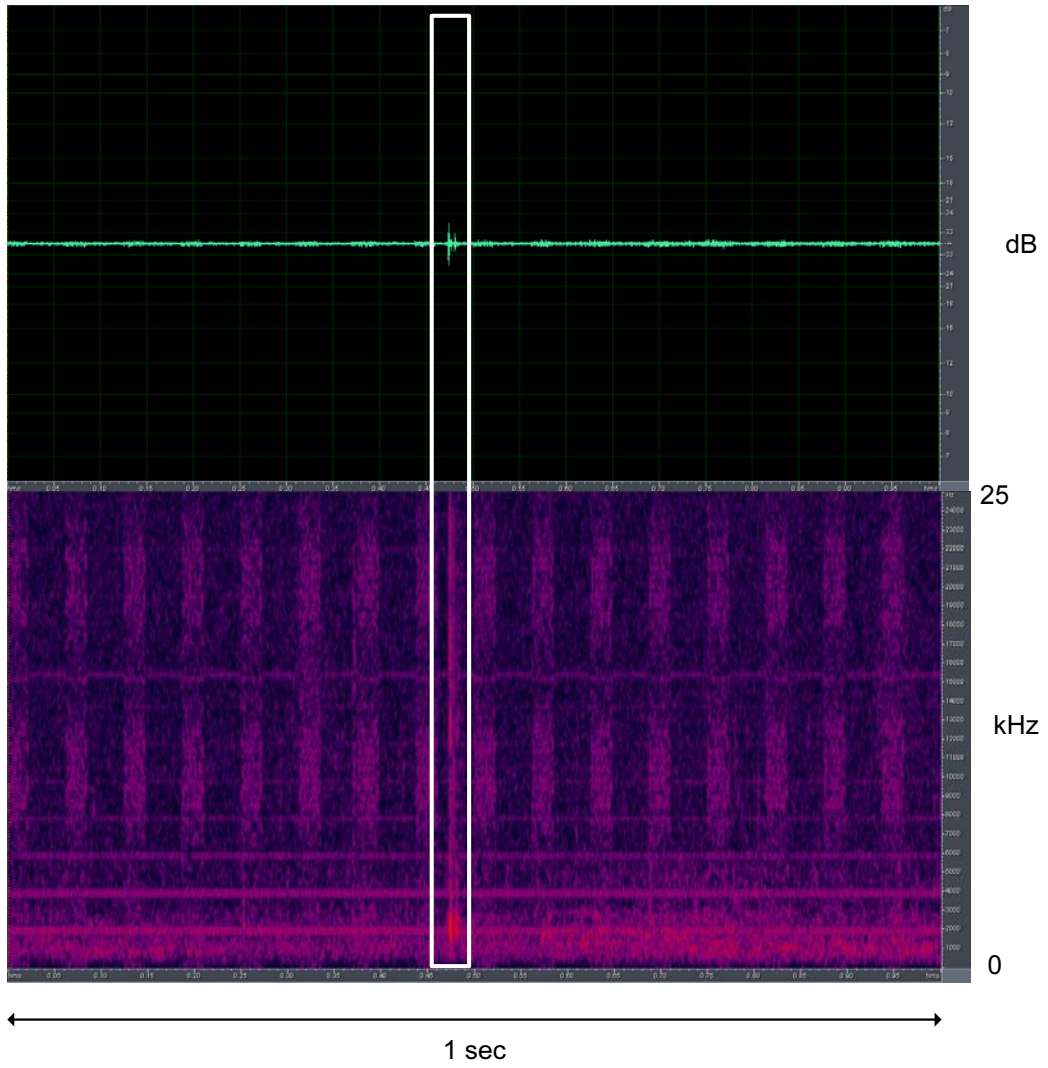


図 5.7. アレイ A で確認されたクリックサンプル .

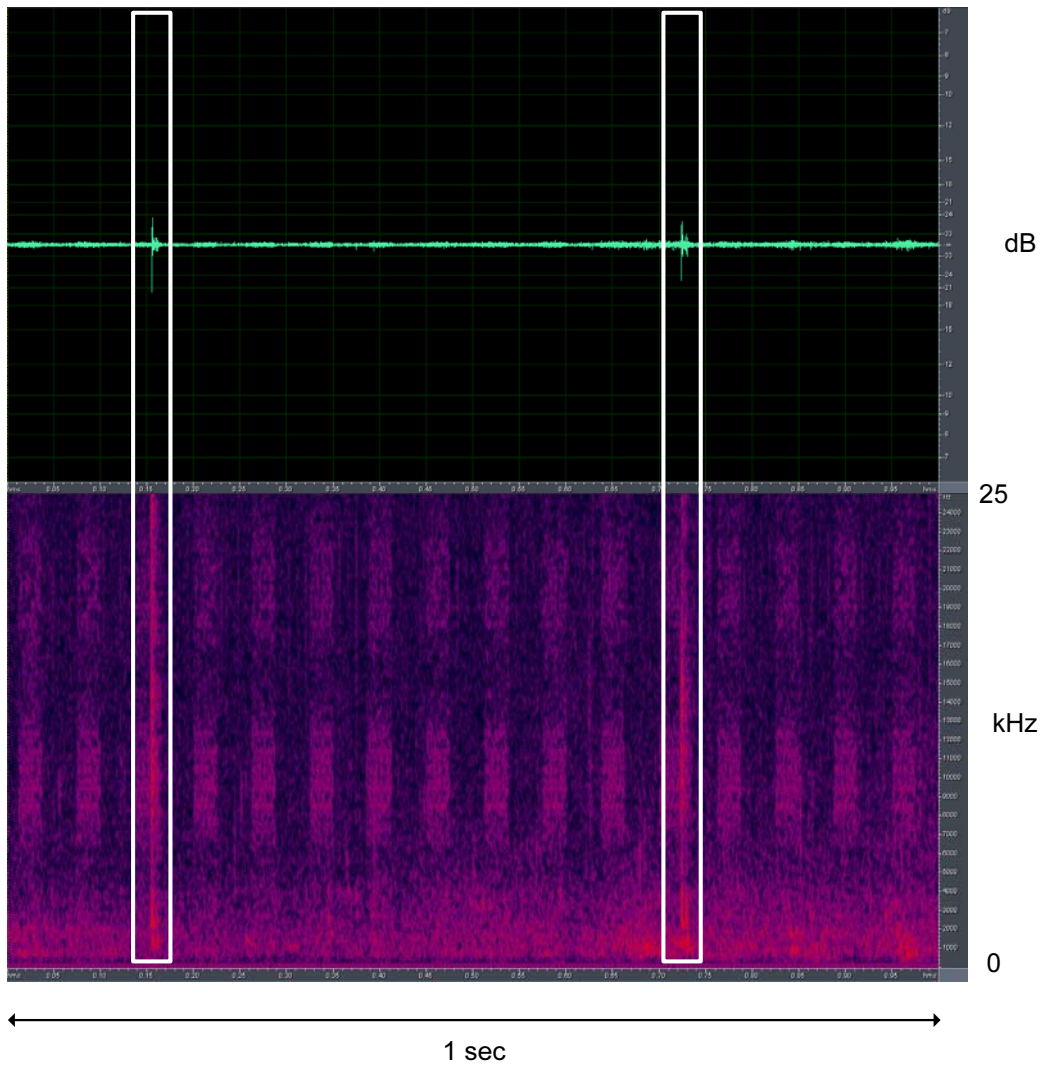


図 5.8. アレイ B で確認されたクリックサンプル .

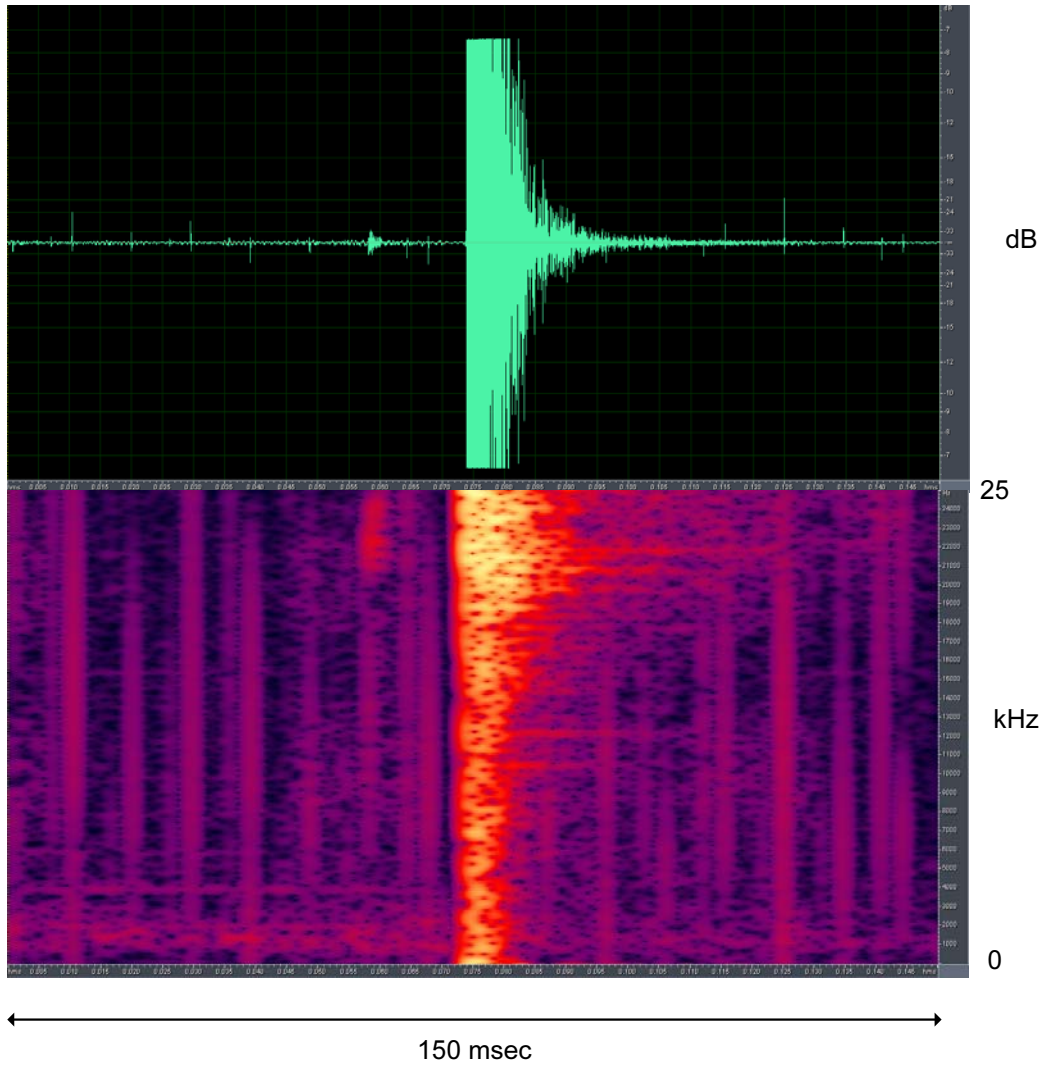


図 5.9. アレイ A で確認されたクリックでないノイズサンプル .

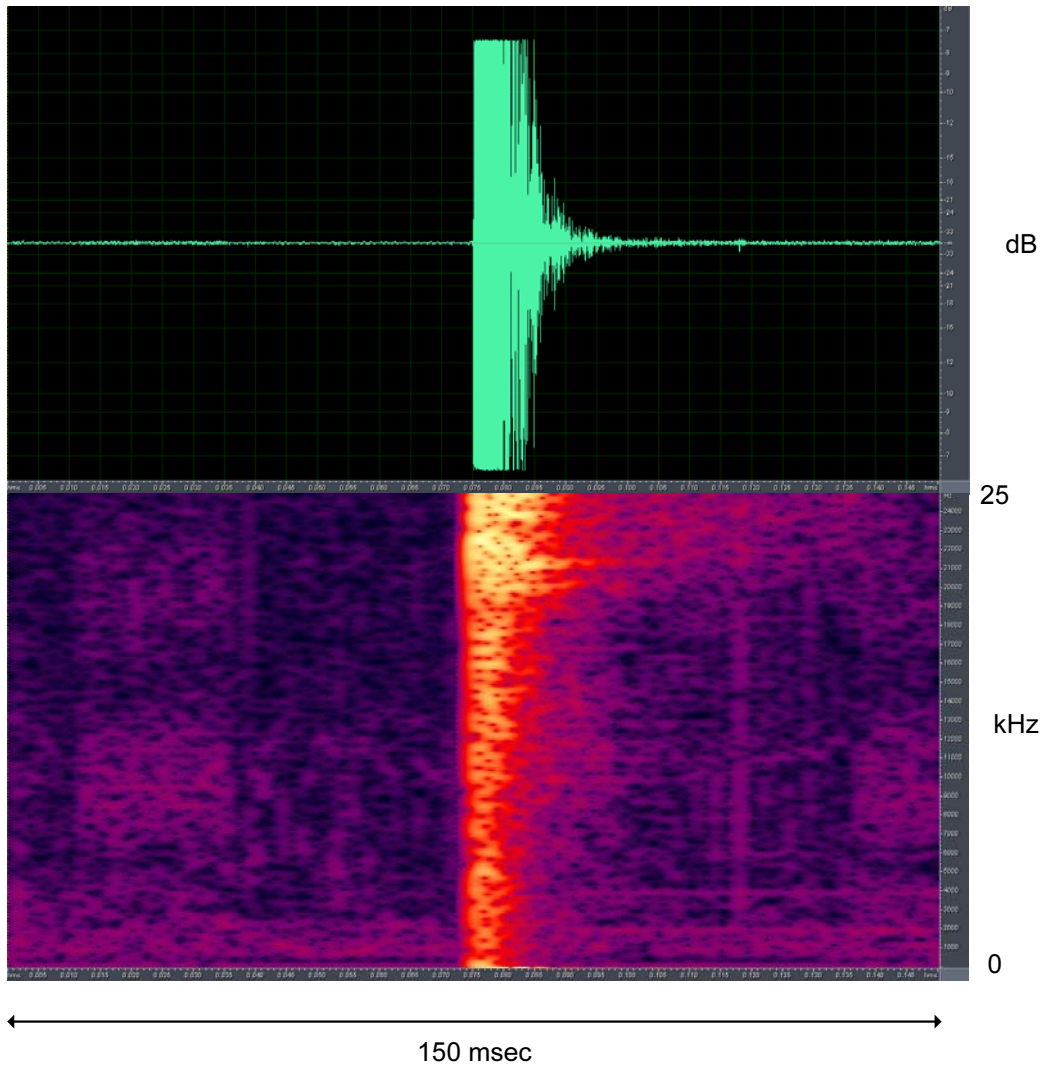


図 5.10. アレイ B で確認されたクリックでないノイズサンプル.

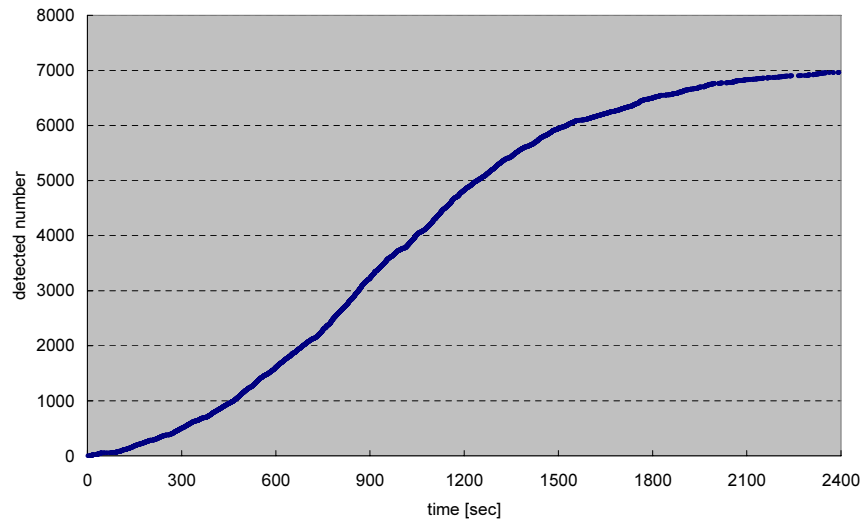
表 5.2. 解析パラメータ設定 .

解析部	パラメータ名	値
クリック検出	α_{min}	2.0
	α_{max}	20
	α_s	1
	α_t	10
クラス分け	β_θ	15
	β_t	10
位置推定	γ_L	2000
	γ_t	1

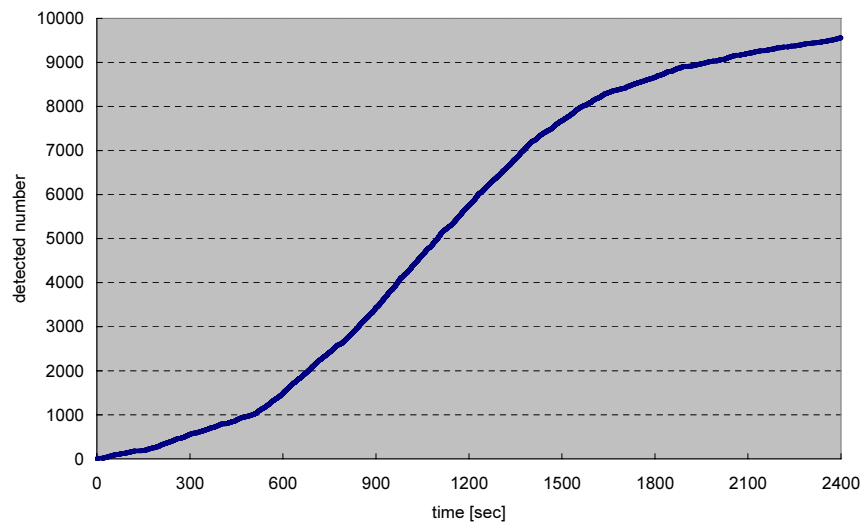
閾値 γ_t については、位置推定誤差の模式図 3.5, 3.6 より、マッコウクジラの体長が 30m 以下であることを考え、距離の閾値 $\gamma_L = 2000\text{m}$ とし、時間閾値 γ_t はアレイ間の距離が 500m 程であることを考え $\gamma_t = 1\text{sec}$ とした。

5.4 クリック検出結果

クリック検出に際し、ハイドロフォンアレイで得られたクリックと雑音の周波数成分を考慮し (図 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 参照)、検出の前段階に 5kHz のローパスフィルタを施し、フィルタリングされた音声に対し、セグメントエネルギーの計算と、クリック検出部 (図 4.3) による検出判定を行った。図 5.11 に解析時間に対するクリック検出総数の個数の変化を示す。図 5.11(a) ではアレイ A の検出結果を、(b) ではアレイ B での検出結果を示す。検出総数はアレイ A では 6966 個、アレイ B では 9641 個であった。アレイ A の解析データではスパイクノイズが頻繁に確認されている。クリック検出 (図 4.3) では、セグメントのエネルギーの大きさにより、そのセグメントにクリックが存在するか否かを判断



(a) number of detected clicks in array A



(b) number of detected clicks in array B

図 5.11. 各アレイでのクリック検出数 .

する．スパイクノイズは図 5.9 より，エネルギーが背景雑音よりも高く，これを検出の際の平均エネルギーに加算し続けるため，平均エネルギーが大きくなってしまったことにより，エネルギーの比較的小さなクリックを検出できなかったことが，二つのアレイで検出数の差を生み出す要因になったと考えられる．

クリック検出部の定量的評価を行うため，以下の式でクリックが正しく検出された検出成功率と，クリックでないものをクリックとして検出してしまった誤検出率を計算する．

$$\text{検出成功率} = \frac{\text{クリックを正しく検出できた個数}}{\text{その区間に存在するクリックの総数}} \quad (5.1)$$

$$\text{誤検出率} = \frac{\text{誤ってクリックとして検出した個数}}{\text{クリックとして検出した検出総数}} \quad (5.2)$$

その区間に存在するクリックの総数のカウントは，評価する音声区間に対して，音がクリックのものであるかどうか，波形の形とスペクトルがマッコウクジラのクリックのものであるかどうかの確認を手作業にて行い，正しくクリックであると判断したものの時間を記録する．この音声区間に対し，図 4.3 によるクリック検出を行い，クリックとして検出したものの時間と，先ほどの手作業のチェックにより得られた正しいクリックの時間とを比較し，クリックを正しく検出できた個数，誤ってクリックとして検出した個数，クリックを検出できなかった個数をそれぞれカウントし，式 5.1，式 5.2 により検出部の定量的評価とする．評価対象の区間として，アレイ B の 0～500sec の音声データを用いた．区間内に合計で 1882 個のクリックを確認し，正しく検出できた個数は 1434 個で，誤ってクリックとして検出してしまった個数は 53 であった．式 5.1，式 5.2 より，検出成功率は 76.2%，誤検出率は 3.56% となった．クリックを検出できなかった要因として，解析の早い段階においては，クリックのエネルギーが平均エネルギーと比べ大きすぎるため検出されていなかった．誤検出されたものは，スパイクノイズや，クリックの海面反射音，海底面反射音を誤って検出していた．

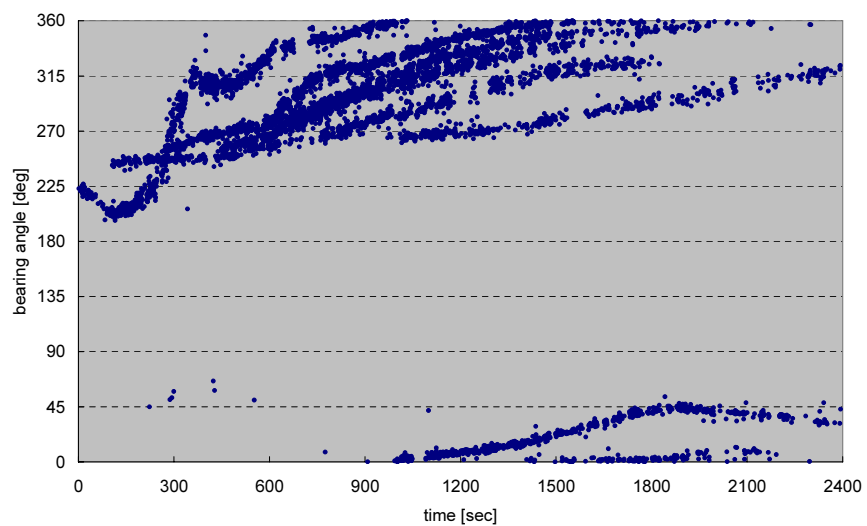
5.5 方位推定結果

各アレイにおける方位推定 (図 4.4) の結果について, アレイ A での方位推定結果を図 5.12 に, アレイ B での方位推定結果を図 5.13 にそれぞれ示す. 図 5.12(a) は, 時間に対するアレイ A での方位角の推定結果を示し, 図 5.12(b) では, アレイ A での俯角の推定結果を示す. 音源からの到来方向は三次元ベクトル $\vec{r} = [r_x \ r_y \ r_z]$ の形で推定されるが, これを水平面での方位 (方位角) と, 垂直面での方位 (俯角) に変換したものを図では示している. 方位角は, 0deg が北を示し, 90deg が東, 180deg が南, 270deg が西をそれぞれ示す. 俯角は, 0deg が水平を表し, 90deg がアレイの真下を表す. アレイ B での方位角の推定結果を図 5.13(a) に, 俯角の推定結果を図 5.13(b) にそれぞれ示す. 図 5.12, 図 5.13 より, 付近に複数頭のマッコウクジラが泳いでいる事が確認でき, 両図の軌跡から 6 頭のマッコウクジラがいることが推測できる.

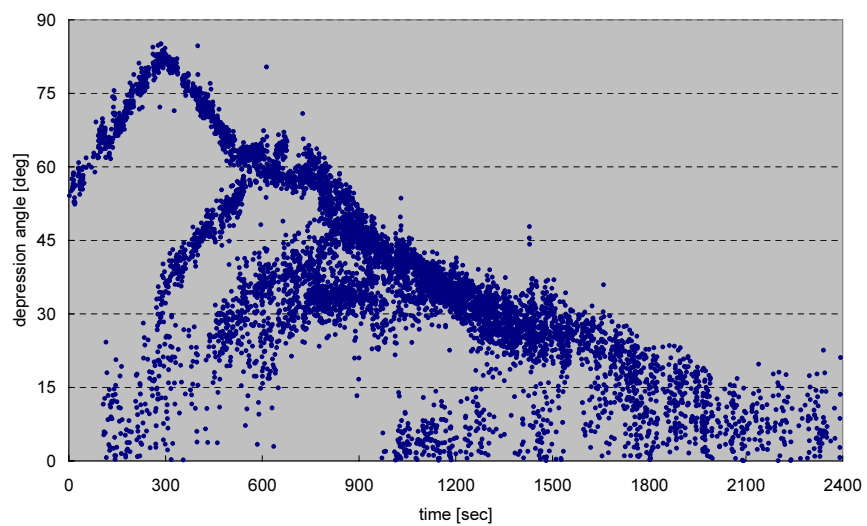
5.6 クラス分け結果

クラス分け (図 4.5) の結果について, 各アレイでのクラスの構成状況を図 5.14 に示す. 図 5.14(a) では, アレイ A での各クラス毎の, そのクラスに属するクリックの総数を示し, 図 5.14(b) では, アレイ B での状況を示す. クリック数が 100 以上のクラスが持つクリック総数はアレイ A では 6399 個 (91%), アレイ B では 9391 個 (97%) であった.

アレイ A でのクラス分け結果を図 5.15 に示す. 図 5.15(a) では, それぞれのクラス毎の方位角の推定結果を, (b) ではクラス毎の俯角を示し, 同一のクラスは同色で表されている. 図 5.16(a) では, アレイ B でのクラス毎の方位角の結果を, (b) では俯角の結果を示し, 図 5.15 と同様に, 同一のクラスは同じ色で表している. 図 5.15 と図 5.16 では, クラスのクリック総数が 100 個以上のクラスのみを描写している.

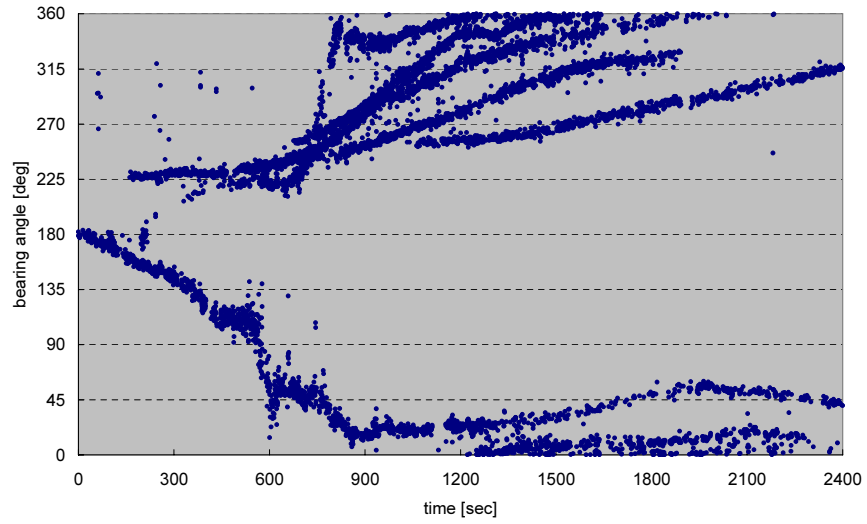


(a) calculation results of bearing angles at array A

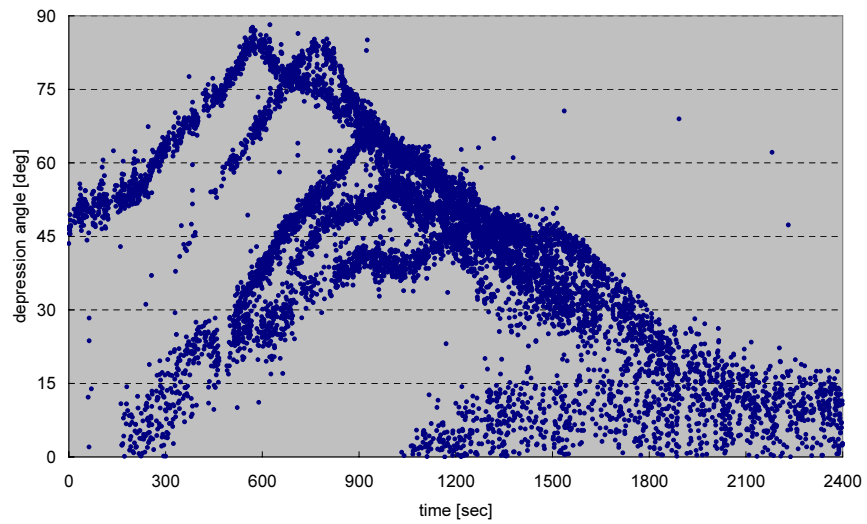


(b) calculation results of depression angles at array A

図 5.12. アレイ A での方位推定結果 .

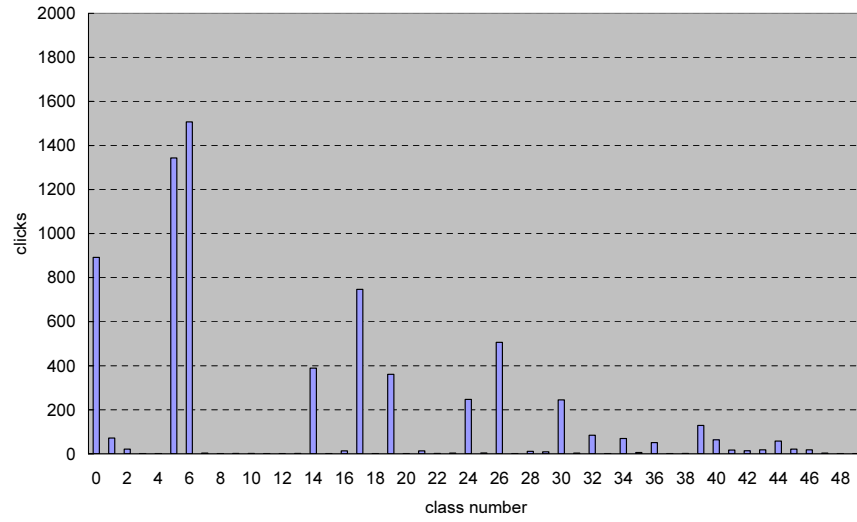


(a) calculation results of bearing angles at array B

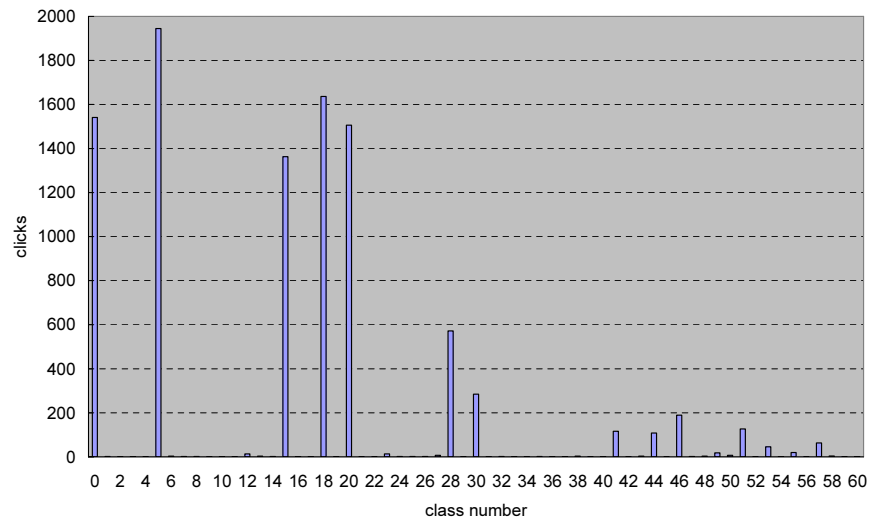


(b) calculation results of depression angles at array B

図 5.13. アレイ B での方位推定結果 .

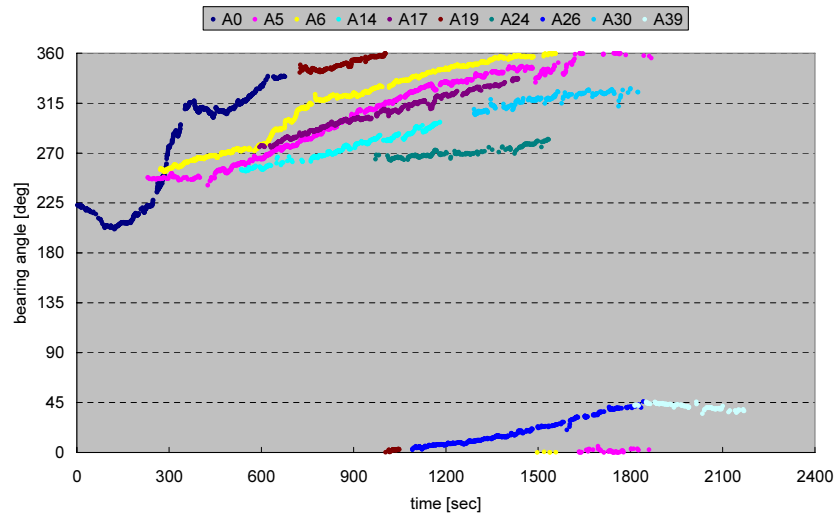


(a) number of clicks belonging to the classes at array A

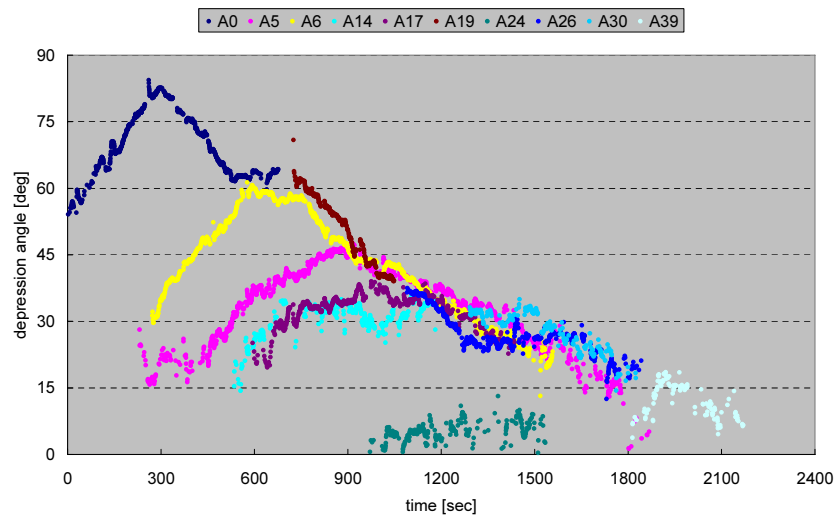


(b) number of clicks belonging to the classes at array B

図 5.14. クラスの構築状況 .

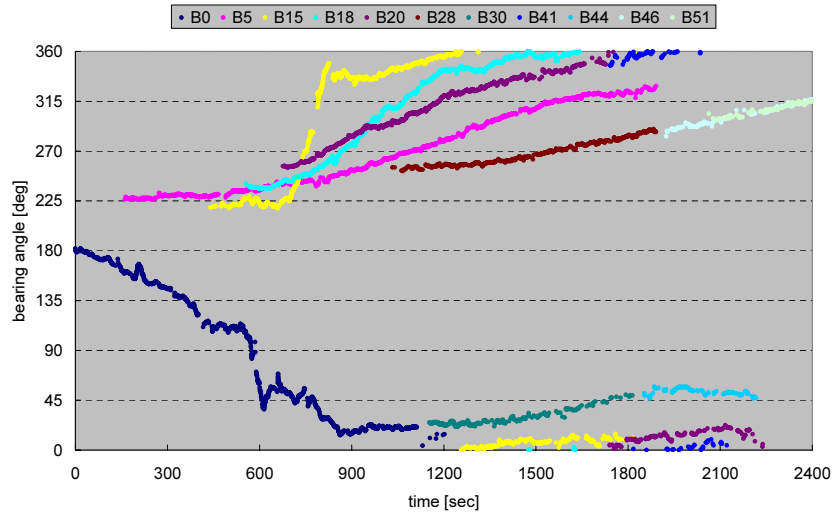


(a) bearing angles of the classes at array A

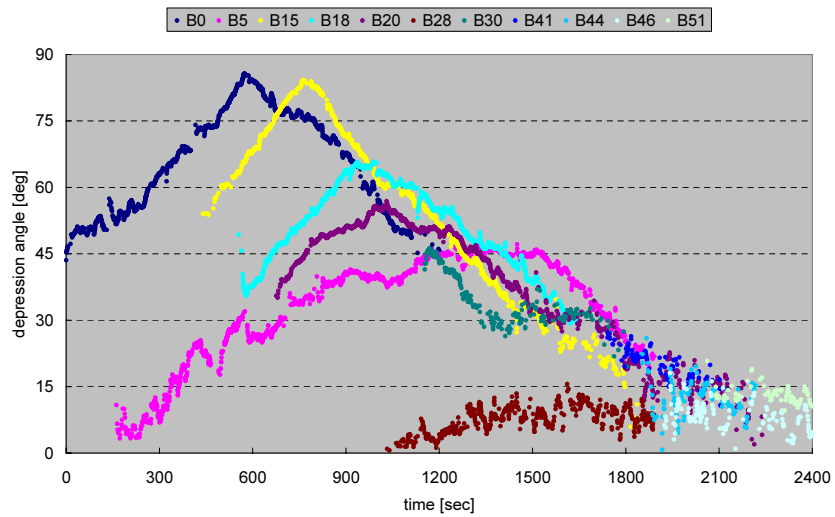


(b) depression angles of the classes at array A

図 5.15. アレイ A でのクラス分け結果 .



(a) bearing angles of the classes at array B



(b) depression angles of the classes at array B

図 5.16. アレイ B でのクラス分け結果 .

クラス分けを行った結果 (図 5.15), 5.16 と, クラス分けを行う前の方位推定の結果 (図 5.12, 5.13) を比較すると, 方位角の軌跡が, クラス分けにより色分けされていることが見て取れる. すなわち, 付近にいるマッコウクジラの活動状況を, クラス分けにより個々の個体として識別することができる.

5.7 クラスマッチング

5.7.1 候補クラスの決定

対応するクラスを決定する前に, それぞれのアレイで, 対応候補となるクラスの整理と決定を行う. 図 5.15, 5.16 より, 方位角と俯角の変化から同一のクジラのものとは判断できるクラスが途切れていることが確認できる. これはマッコウクジラがクリックを発していない区間の影響であると考えられる. 各アレイで構築されたクラスの方位角と俯角に注目し, クラスの結合を手作業で行い, 結合されたクラス群をマッチングの候補クラスとする. 結合されたクラスは以下の通りである.

- A0, A19, A26, A39
- A14, A30
- B0, B30, B44
- B28, B46, B51
- B20, B44

アレイ A・B での候補クラスは以下のようになり, 各アレイで 6 つのマッチング候補のクラス群を存在する.

- アレイ A でのマッチング候補クラス群

1. A0, A19, A26, A39
2. A5
3. A6
4. A14, A30
5. A17
6. A24

- アレイ B でのマッチング候補クラス群

1. B0, B30, B44
2. B5
3. B15
4. B18
5. B20, B41
6. B28, B46, B51

5.7.2 対応クラスの決定

アレイ A での候補のクラスが持つ特徴量を表 5.3 に、アレイ B でのクラス候補が持つ特徴量を表 5.4 にそれぞれまとめる。表 5.3, 5.4 において、クラスの特徴量として、クラスの開始時間と終了時間、そして深さ方向の変化をみるためにクラスの俯角について、その特徴的な形状、形状が見られた時間、その時の俯角の値を記している。各アレイでの候補クラスの数 が 6 個と一致しているため、一対一で対応するクラスを発見すればよい。

表 5.3. アレイ A での候補クラスの特徴量

クラス 番号	クリック時間 [sec]		俯角の特徴		
	開始	終了	形状	時間 [sec]	値 [deg]
A0,A19,A26,A39	0	2167	ピーク	303	82
A5	236	1867	ピーク	915	46
A6	274	1556	ピーク	611-763	58
A14,A30	547	1823	くぼみ	1012	30
A17	594	1434	ピーク	1002	40
A24	982	1527	平坦	all	0-13

5.7.2.1 クジラ A

0 ~ 300sec までのクラスの構築状況を見ると、それぞれのアレイでクラスは A0, B0 のひとつしか存在しないため、このクラスを対応するクラスとする。ここで、A0 と B0 を対応クラスとすると、俯角のピークが現れる時間が、A0 では 303sec で、B0 では 585sec と、大きな隔たりがある。俯角 0deg は水平を表し、90deg がアレイの真下を表す。俯角が 90deg を超えるような場合、例えば俯角が 120deg という時は 60deg として表される。もし、マッコウクジラが片方のアレイの真下を潜る場合、クジラの潜水深度は下がっているにもかかわらず、俯角は 90deg まで上がったのちに下がり続けることになる。これが A0 と B0 で俯角のピークが現れる時間が異なる理由であると考えられる。A0 + A19 + A26 + A39 と B0 + B30 + B44 のマッチング結果によるトラジェクトリをクジラ A のものとする。

表 5.4. アレイ B での候補クラスの特徴量

クラス 番号	クリック時間 [sec]		俯角の特徴		
	開始	終了	形状	時間 [sec]	値 [deg]
B0,B30,B44	0	2002	ピーク	585	85
B5	164	1891	くぼみ	1023	38
B15	458	1836	ピーク	770	84
B18	586	1641	ピーク	934	65
B20,B41	688	2217	ピーク	1008	55
B28,B46,B51	1039	2386	平坦	all	0-15

5.7.2.2 クジラ B

約 1000sec から，それぞれのアレイで新しいクラス，A24 と B28 が存在している．それぞれの方位角と俯角を見ると，二つのクラスは同調して変化しているように見えるため，これは水面付近にいるクジラを見ているものと考えられる．A24 と B28 + B46 + B51 のマッチング結果によるトラジェクトリをクジラ B のものとする．

5.7.2.3 クジラ C

残りの候補クラスはそれぞれ 4 つずつであり，ここで 1000 秒付近で，1 つのクラスの俯角の形状でくぼみが見受けられるため，A14+A30 と B5 を対応クラスとし，このマッチング結果によるトラジェクトリをクラス C とする．

ここで，この二つを対応クラスとすると，A14 は 547sec から開始しているのに対し，B5 は 164sec から存在している．B5 と B18 の方位角・俯角を比較すると (図 5.16)，B18 が B5 の近くから現れている．図 5.17 のように，クジラ Target1 と Target2 がおり，これまで鳴いていなかった Target2 が Target1 の近くで鳴き

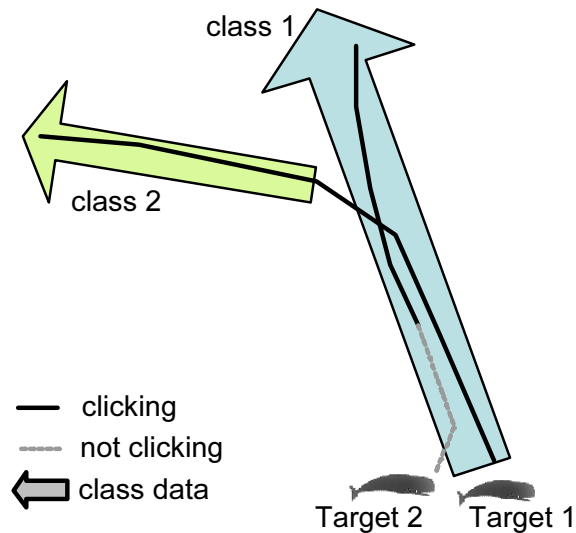


図 5.17. 異なるクジラによって構築されたクラス例 .

出し, Target1 と異なる方向に泳ぐという状況を考える . クラス分けでは, 音源からの到来方向ベクトルを元に行うため, 近くにクジラがいる場合には, 複数のクジラを同一のクラスとクラス分けしてしまう可能性がある . クジラ同士が異なる方向に泳げば, クラス分けを行うことはできるが, 図 5.17 では, クラス class1 はクジラ Target1 と Target2 から, クラス class2 は Target1 からなっている . クジラ Target1 を基準に考えると, Target1 からのクリックは, class1 に分類されていたが, ある時間から class2 に分類される . こういった現象がクラス B5 と B18 により起こったため, A14 と B5 のクラス出現時間が異なってしまったと考えられる .

5.7.2.4 クジラ D, E, F

残り三つの候補クラスを見ると, 俯角のピークが順々に現れているため, これを対応クラスとする . すなわち, A6 と B15, A5 と B18, A17 と B20+B41 を対応クラスとする . 以上のマッチング結果を表 5.5 にまとめる .

表 5.5. 対応クラステーブル .

クジラ番号	クラス A	クラス B
クジラ A	A0, A19, A26, A39	B0, B30, B44
クジラ B	A24	B28, B46, B51
クジラ C	A14, A30	B5
クジラ D	A6	B15
クジラ E	A5	B18
クジラ F	A17	B20, B41

5.8 位置推定結果

表 5.5 を元に、対応するクラスの位置推定結果のみを抜き出すことで、6 頭のマッコウクジラの水中行動の軌跡を得ることができる。各クジラの時間に対する X 軸・Y 軸・Z 軸の行動軌跡をそれぞれ図 5.18(a), (b), (c) に示す。図 5.18 を、水平面で表したものを図 5.19 に示す。図 5.18, 5.19 において、X 軸と Y 軸の原点の位置座標は、アレイ A を降ろしたボート A の GPS 初期位置 (北緯 27.0759 度, 東経 142.034 度) とし、Z 軸の原点は水面を表し、各アレイの深さは -5m である。図 5.19 では、時間経過による軌跡の推移を矢印で表している。

図 5.18, 5.19 より、クジラ B は他の 5 頭のクジラと離れて海面付近を泳いでおり、クジラ A・C・D・E・F が共に行動している。5 頭のクジラは、ボートの動きから逃げるように同じ方向に広がりながら行動をしており、深度は 200 ~ 800m で変化しており、時折数 100m 単位での深度の変化 (short dive) が見受けられる。

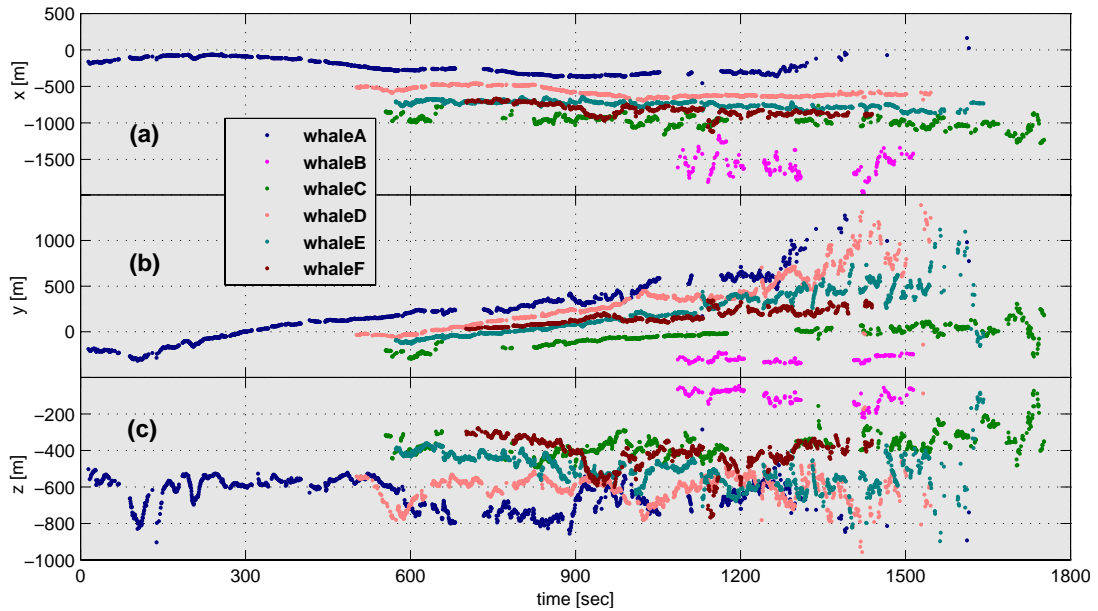


図 5.18. クジラ A・B・C・D・E・F の三次元行動軌跡 .

5.9 考察

本節では、提案手法による位置推定により得られた結果に対し、考察を行い、提案手法の改良点を挙げ、本研究の今後の課題を纏める。

- クリックのマルチパス
- 位置のスムージング
- 群れでの遊泳速度
- クラスの結合
- 群れでの深度の変化と ICI
- 今後の課題

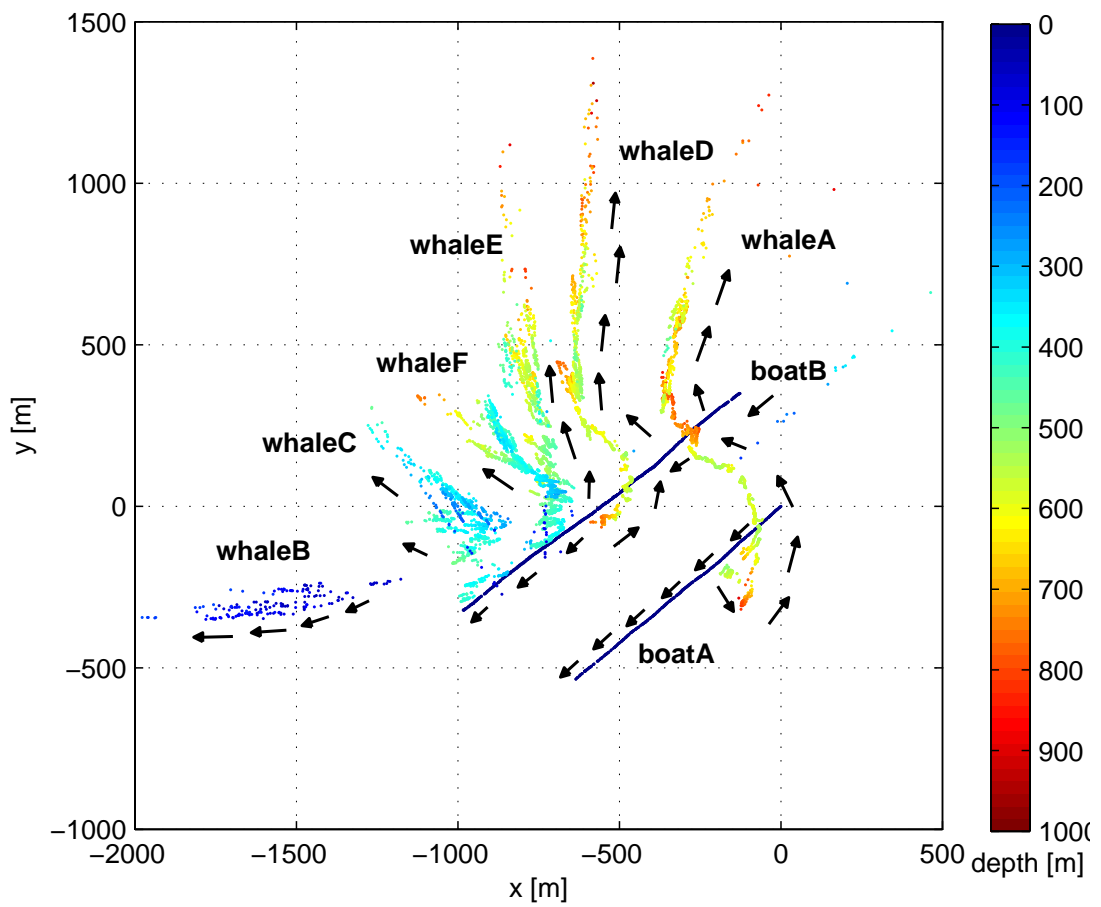


図 5.19. クジラ A・B・C・D・E・F とボート・B の水平面での行動軌跡 .

5.9.1 マルチパス

マッコウクジラが一つのクリックを発した際に、ハイドロフォンへ伝達されるクリックの経路は(1)直達波、(2)海面反射波、(3)海底面反射波の3つである。直達波は、マッコウクジラからハイドロフォンへ直接伝わる経路をたどるため、他の二つよりも早く到達する。海面反射波は、クリックが海面で反射されハイドロフォンへと伝わる経路をたどり、直達波の数 msec 後にハイドロフォンで確認される。海底面反射波は、クリックが海底に反射されてからハイドロフォンへ伝わる経路をたどり、直達波や海面反射よりも伝達経路が長いので、減衰が大きくなる。

海面反射波は直達波と比べ経路差が短いため、エネルギーベースのクリック検出では誤って検出してしまふ恐れがある。本論文で用いたクリック検出(図 4.3)では、海面反射音を解析しないために、検出されたセグメントの方向ベクトルをチェックし、海面から来ているものは海面反射音として解析を行わない。海面反射波が直達波の数 msec 後に到達し、直達波はエネルギーが大きく検出できることが予想されるため、クリックが検出された場合は、読み込み点を更新することで海面反射波をスキップする。

海底面や水面の形状は常に平らでないことから、反射波やスパイクノイズが検出・解析されたとしてもその到来方向は常には一定でない。このため、クラスに属するクリック数を閾値とすることで、ノイズによって構成されるクラスを排除することができる。本論文では、位置推定の際に用いるクラスとして、クリック数が 100 以上のクラスのみ限定しており、100 以下のクリック数のクラスはノイズによるものとして、位置推定の候補クラスとしない。しかし、クジラの直達波から構成されるクラスでも十分なクリック数を持たなければ、位置推定の候補クラスとならない恐れがある。図 5.12 では、1500 ~ 1800sec に、方位角 280 ~ 300deg にマッコウクジラの軌跡があるが、クラス分けを行いクリック数が 100 以上のものをプロットした図 5.15 では、この軌跡を見ることができ

ない。これはクラスのクリック数が少ないために、候補クラスとならなかったためである。

この問題を解決するには、位置推定の候補とするクラスのクリック数を減少させるか、途切れているクラスを結合することで解決されると考えられる。クラスが途切れることにより、クリック数が小さくなってしまうため、クラス同士を結合させることで対処することが可能となる。

5.9.2 スムージング

マッコウクジラの潜水速度に関しては、データロガーを用いた研究により報告されている [4, 5, 6]。データロガーを用いたマッコウクジラの潜水速度の推定では、ロガーに取り付けられた加速度計の値より、加速度と、加速度を積分して得られる速度を計算することにより、急速潜行をする際や、深度を変えずに進む際の速度・加速度を求め、これを報告している。

データロガーの研究では、ロガーをつけた個体、1頭のみ速度情報しか得ることができない。本論文では複数頭の位置情報 (図 5.18) が求められているため、これを時間微分し速度を求めることで、1頭だけでなく群れで泳ぐ際のマッコウクジラの速度に関する考察を行うことができる。しかし、三角測量により得られた位置情報は誤差を含み、誤差を含んだデータを微分した場合、クジラの位置の変化量よりも、誤差の変化量の方が大きくなってしまふことが予想されるため、速度を求めることができない。位置情報の誤差を少なくさせるため、位置のスムージングを行ってから、スムージングされた位置を時間微分することで、速度を計算する。

スムージングは、X 軸・Y 軸・Z 軸の位置情報を 0.01sec 刻みに線的に補間した、MATLAB[41] を用いて Butterworth フィルターを施すことで行う。Butterworth フィルターは、正規化されたカットオフ周波数が 0.001 の 1 次のローパスフィルタとした。スムージングを施した位置情報の結果を図 5.20 に示す。図 5.20 では、

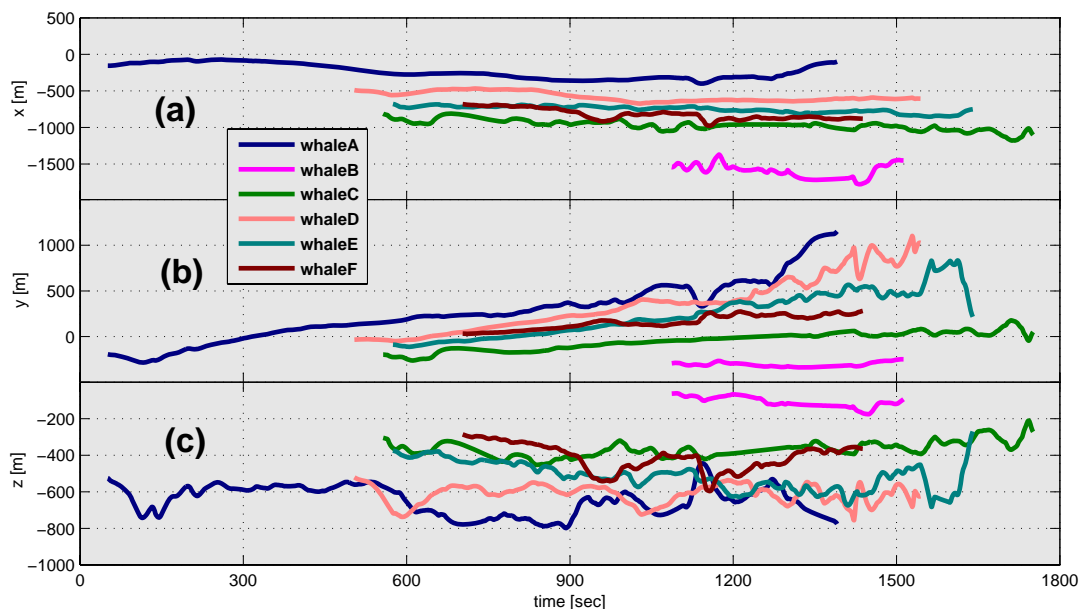


図 5.20. スムージングされたマッコウクジラの位置情報 .

図 5.18 と同様に，それぞれのクジラの時間に対する X・Y・Z 方向の行動軌跡を示し，これを三次元表示したものを図 5.21 に示す．図 5.21 では，クジラの軌跡の時間変化を矢印で表し，それぞれのクジラの開始を丸印で，終了を四角で表す．また，この時のそれぞれのクジラからのアレイ A までの距離を図 5.22(b) に，アレイ B までの距離を図 5.22(b) に示す．

5.9.3 速度

スムージングされた位置情報(図 5.20) より，時間微分を行い速度を求めることは可能であるが，ノイズの影響を考慮し，計算された速度に対し，もう一度 Butterworth フィルターを施した．Butterworth フィルターは，正規化されたカットオフ周波数が 0.001 の 1 次のローパスフィルタとした．図 5.23(a) に，それぞれのクジラのを，(b) にその時の垂直成分の速度を示す．なお，図 5.23 では，アレイからの距離が離れていると，位置推定誤差が大きくなることから，ア

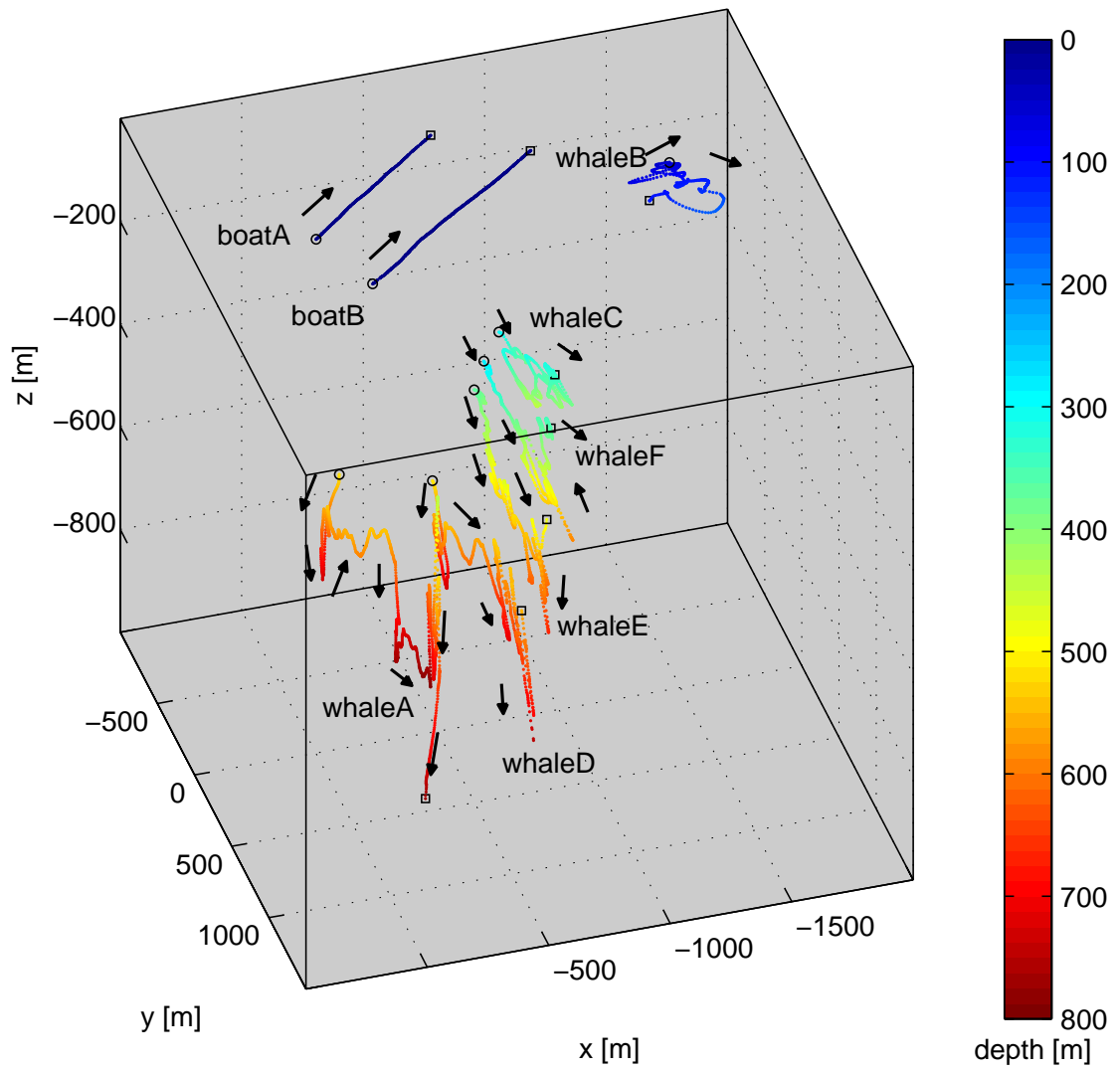


図 5.21. スムージングされたマッコウクジラのトラジェクトリ .

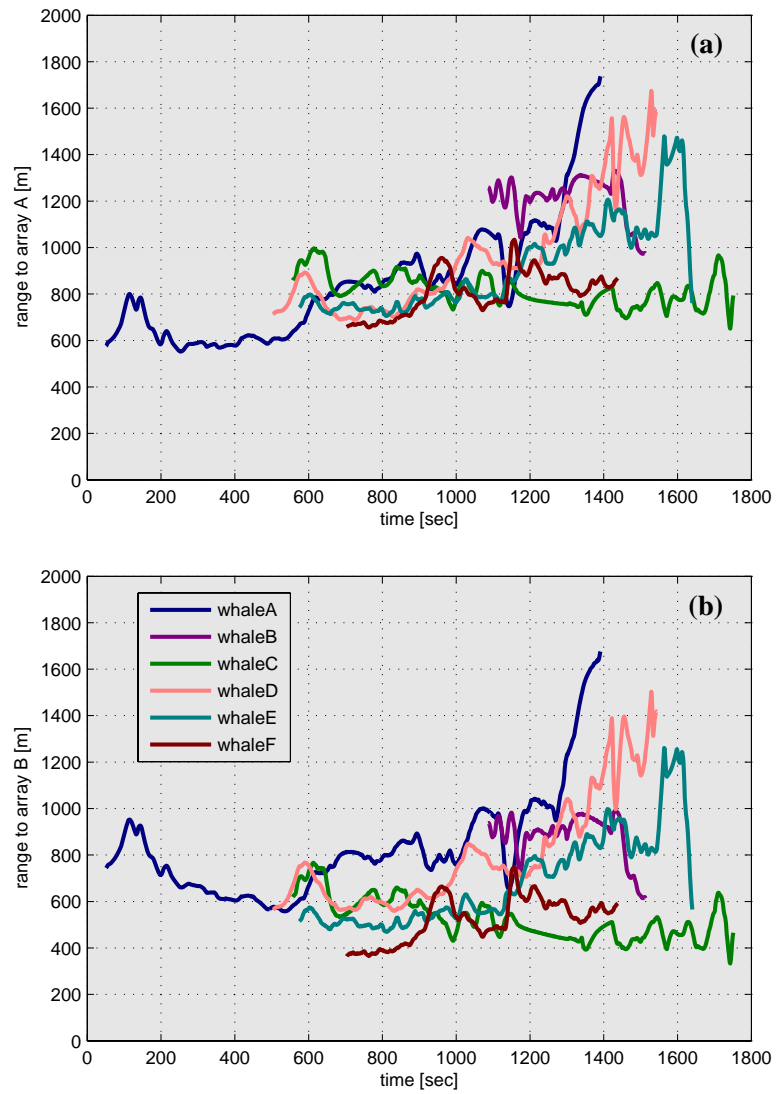


図 5.22. マッコウクジラから各アレイへの距離 .

レイへの距離が 1000m 以内のデータのみ表示している。

図 5.23 を表 5.6 にまとめ、データロガーによって計測された潜水速度 [5, 6, 4, 77] と、音響測位によって計測された速度 [74] との比較を行う。なお、表 5.6 では、レイへの距離が 1000m 以内の時の速度のみを考慮しており、三次元の平均遊泳速度や上昇・下降時の深さ成分の平均速度と、その標準偏差を示している。表 5.6 より、データロガーによる結果と比較すると、遊泳速度が速く、標準偏差が非常に大きい。Wahlberg らの音響測位による結果では、潮流に沿って動いている時が 2.6m/sec、沿っていない時が 0.6m/sec と、潮の流れに沿っているかどうかで遊泳速度が大きく違うことが分かる。音響測位による速度計算では、誤差を含んだ位置情報を微分するため、結果として速度に誤差の影響が出ていると考えられる。

5.9.4 クラスの結合

前節で示したように、途切れてしまうクラス同士を結合させることで、クラスのクリック数を結果的に増加させ、マッチング候補のクラスとして挙げられるようになるだけでなく、離れているクラスを結合させることにより、全体のクラス総数を減少させ、マッチング候補の絞り込みを容易にすることができる。図 5.15, 5.16 より、離れているクラスには以下のような特徴がある。

- クラスとクラスの間をクリックが存在しない区間があるが、方位角・俯角、及び方向ベクトルは、前のクラスに近い値を取る (例：A0 と A19)。
- 前のクラスが途切れる前に、新しいクラスが構築され始める場合もある (例：B0 と B30)。

5.9.4.1 結合アルゴリズム 1

クラス結合のアルゴリズム 1 を以下に示す。

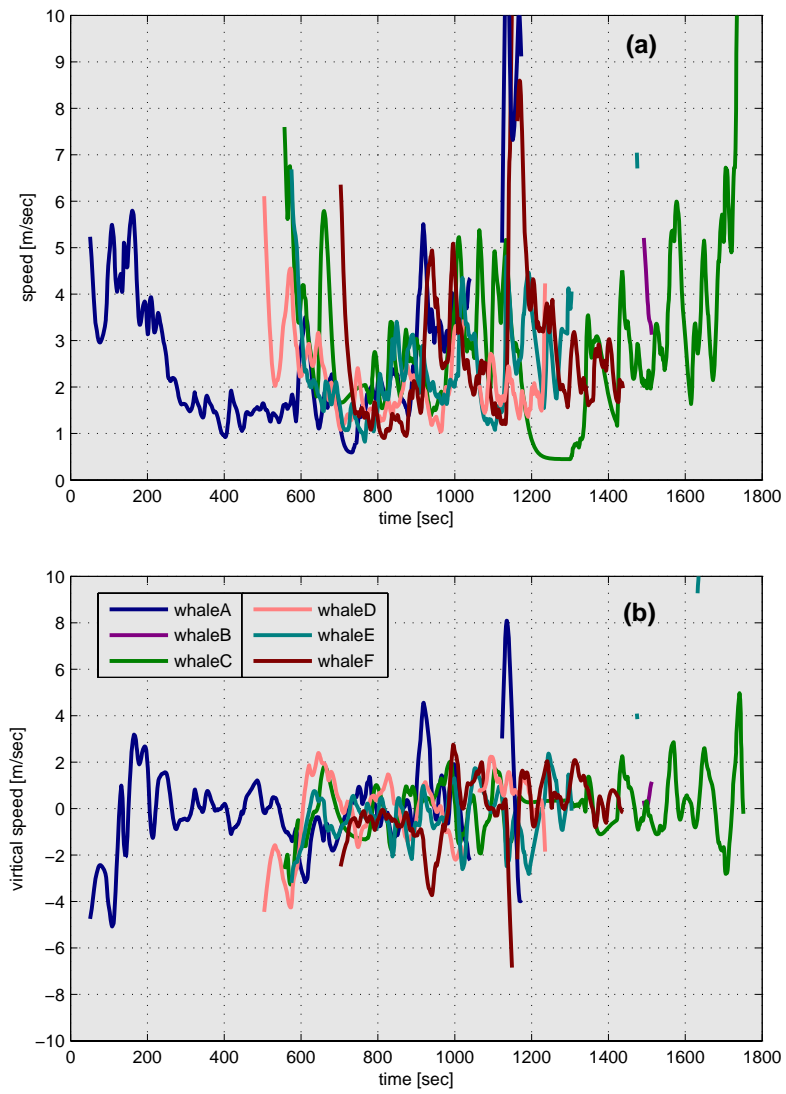


図 5.23. マッコウクジラの速度 .

表 5.6. 潜水速度の計算結果 .

名称	遊泳速度 [m/sec]	上昇速度 [m/sec]	下降速度 [m/sec]
クジラ A	2.70±2.67	1.34±1.58	1.24±1.17
クジラ B	2.44±0.68	0.42±0.39	-
クジラ C	3.02±3.11	0.84±0.80	0.98±0.65
クジラ D	2.10±1.40	0.96±0.59	1.51±1.13
クジラ E	2.62±3.38	1.00±1.73	0.98±0.76
クジラ F	2.58±2.70	0.93±0.67	0.99±1.09
[5]	2.0±0.3	-	-
[5]	1.9±0.5	-	-
O1b[6]	1.8±0.3	-	-
O5a[6]	1.6±0.2	-	-
W0W[6]	1.8±0.5	-	-
W4a[6]	1.9±0.2	-	-
[4]	-	1.27±0.26	1.33±0.24
[74]	2.6	1.4	1.4
[74]	0.6	1.2	-
[77]	0.9±0.5	1.52±0.32	1.40±1.029

1. クラスのクリック数が κ_c 以上 となったクラスを結合クラスする .
2. 付近のクラスの活動状況をチェックし , 活動していないクラスを結合候補クラスとしてリストアップする .
3. 結合クラスのクリックデータの方向ベクトルについて , 各成分の近似直線を求める .
4. 近似直線と , 結合候補クラスが持つクリックデータの方向ベクトルのそれぞれの成分との距離を求める .
5. 全ての成分でが距離閾値 κ_d 以内であり , 距離の合計が最小の結合候補クラスへ結合する .

クラスデータの中には , 反射音やスパイクノイズなどのノイズにより構成されるクラスがあり , これらの結合を防ぐために , 結合を行うかどうかの判定を個数の閾値を持って行う . 付近のクラスの活動状況の調査には以下の二点をチェックする .

- 結合クラスのクリック検出時間との時間差が κ_{tsec} 以上あるかどうか
- κ_{tsec} 未満の場合は , その間に相手のクラスのクリックが κ_k 個以上あるかどうか

クラス同時の時間差が κ_{tsec} 以上離れている場合には , 比較したクラスは更新されておらず , 途切れていると判断する . そうでない場合には , κ_{tsec} 間のクリックの個数を見て , 個数が κ_k 個以上あればそのクラスは活動中とし , そうでなければ , クラスは活動しておらず , 結合候補のクラスとする . このようにクラスの活動状況を見ることで , クラスが更新されていないもの , 更新数が少なく途切れれそうなクラスを結合候補のクラスとする .

表 5.7. クラス結合パラメータ.

項目名	変数名	値
結合実施判定のクリックの個数	κ_c	50
距離閾値	κ_d	0.25
時間差	κ_t	30
活動判定のクリック個数	κ_k	5

結合候補のクラスが存在する場合，直線近似を用いた結合判定を行う．直線近似は，結合クラスに属する κ_c 個のクリックの時間と方向ベクトルの各成分を用いて，絶対偏差最小化による直線の当てはめ [54] を適用する．近似直線と，候補クラスの κ_c 個のクリックデータの方向ベクトルの各成分の値との平均距離を計算する．相手のクリックデータの近似曲線との距離の大きさを見ることで，クラス同士が離れているかどうかを判定する．全ての成分が距離閾値 κ_d 以内のクラスを結合の対象とし，複数ある場合には最小のものと結合させる．

5.9.4.2 結合結果 1

以上のクラス結合アルゴリズム 1 を，各アレイで行うクラス分けの後に実装し，結合の評価を行った．クラス結合のパラメータを表 5.7 に示す．結合を開始するかの個数閾値 $\kappa_c = 50$ とし，相手のクラスの活動をチェックする時間閾値 $\kappa_t = 30 \text{ sec}$ とした．クリックの一般的な ICI が $0.5 \sim 2 \text{ sec}$ であることを考え， $\kappa_t = 30 \text{ sec}$ とした．また距離閾値 $\kappa_d = 0.25$ は実験的に定めた．

図 5.24 にクラス結合実装後のアレイ A でのクラス分け結果を示す．図 5.24 は，クラス結合未実装のクラス分け結果である図 5.15 と同様に，時間に対する方位角の変化を図 5.24(a) に，俯角の変化を図 5.24(b) に示す．アレイ B でのクラス結合実装後のクラス分け結果について図 5.25 に示す．アレイ A での結果と同様

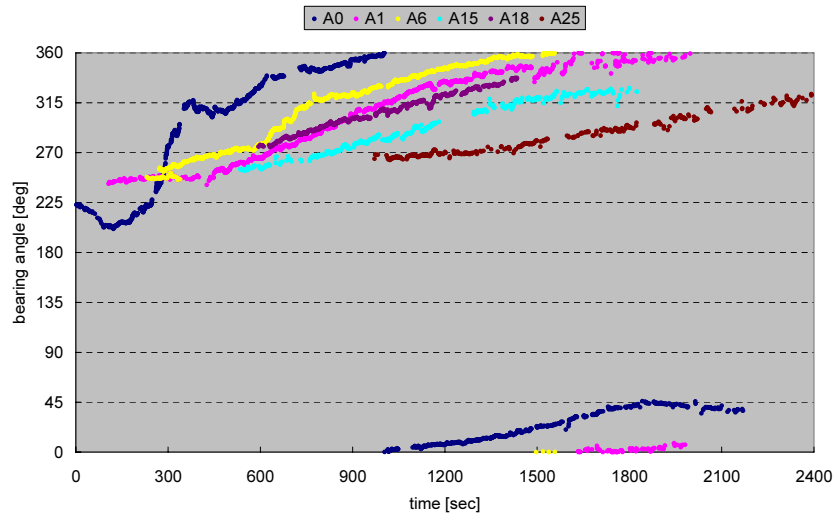
に，図 5.25(a) に，時間に対する俯角の変化を，図 5.25(b) に俯角の変化を示す．図 5.24，5.25 とともに，クリック数が 100 以上のクラスのみを図示している．

クラス実装前 (図 5.15，5.16) と，実装後 (図 5.24，5.25) を比較すると，実装前では途切れていたクラスを結合させることに成功した．しかしアレイ A のクラス A1 の 1800sec 付近のように，別々のクラスを結合してしまっている例や，B28 と B51 のようにクラスの結合が行えていない例も確認できた．別々のクラスを結合してしまった原因として，クラスの活動判定で検出時間差が 30sec 以内のものでクリック数 5 個未満のものは活動していないとし結合候補としたが，この閾値の設定と，距離閾値の設定が原因と考えられる．近似直線との距離で判断しているため，同じ方向へ二頭のクジラが動いていると，それを結合してしまう可能性がある．またクラスの結合が行えていない原因は，クリックの活動状況のチェックが失敗したことが考えられる．

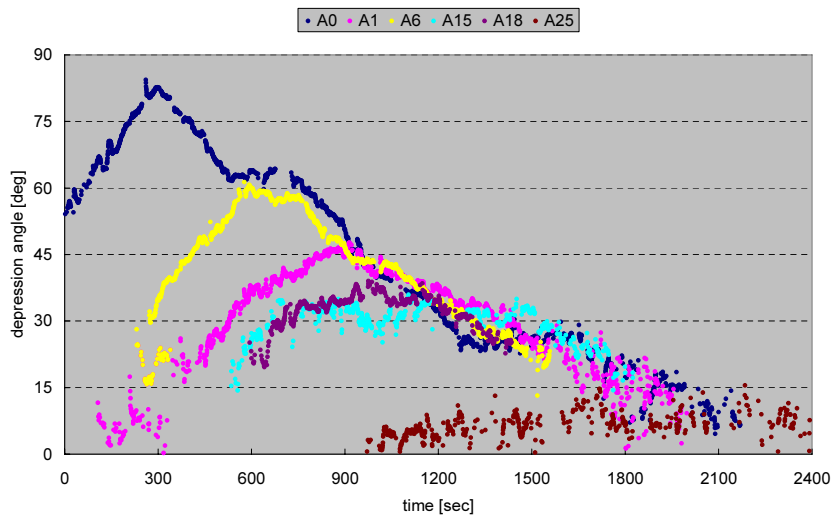
5.9.4.3 結合アルゴリズム 2

クラス結合アルゴリズム 1 の結果を踏まえ，結合アルゴリズム 1 を元に，結合アルゴリズム 2 を考案し，これを実装した．

1. クラスのクリック数が κ_c 以上 となったクラスを結合クラスする．
2. 付近のクラスの活動状況をチェックし，活動していないクラスを結合候補クラスとしてリストアップする．
 - (a) 結合クラスとの時間差が 300 秒以上離れている場合は，活動状況が古すぎると判断し，結合候補クラスとしない．
 - (b) 時間差が κ_t 未満の場合は，その間の相手側クラスのクリック数が κ_k 個以上ある場合は，結合候補 2 とする．
 - (c) それ以外の場合は，比較したクラスを結合候補 1 とする．

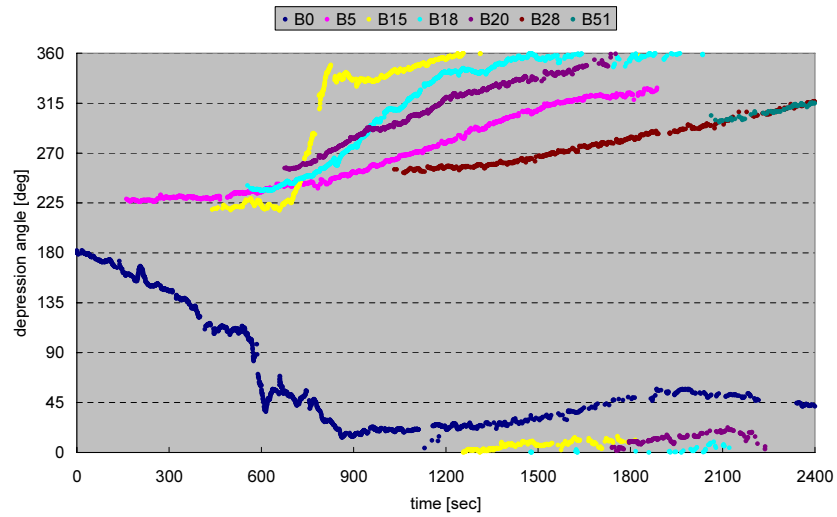


(a) bearing angles of the classes after class connection at array A

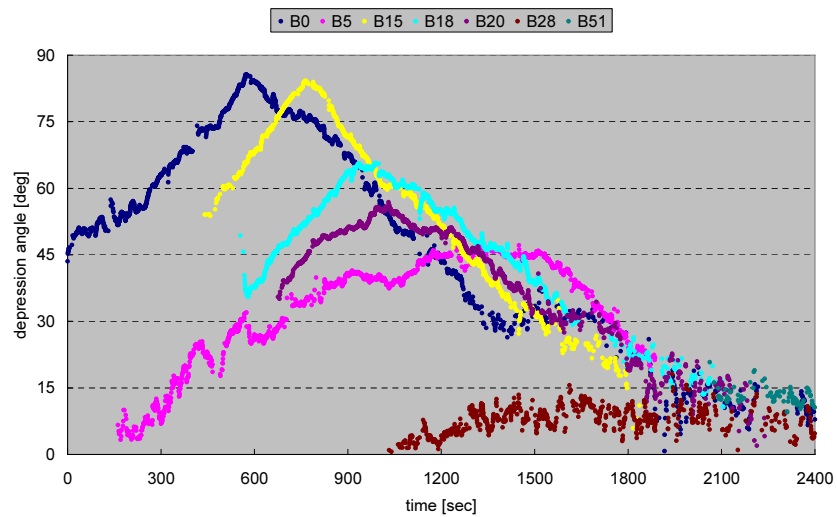


(b) depression angles of the classes after class connection at array A

図 5.24. クラス結合アルゴリズム 1 実装後のアレイ A でのクラス分け結果 .



(a) bearing angles of the classes after class connection at array B



(b) depression angles of the classes after class connection at array B

図 5.25. クラス結合アルゴリズム 1 実装後のアレイ B でのクラス分け結果 .

3. 結合クラスのクリックデータの方向ベクトルについて、時間に対する各成分の値に関する近似直線をそれぞれ求める。
4. 近似直線と、結合候補クラスが持つクリックデータの方向ベクトルのそれぞれの成分との距離を求める。
5. 結合候補 1 のクラスに対しては以下の判定を行う。
 - xyz 全ての成分での距離が閾値 κ_{d1} 以内であれば、そのクラスを結合クラスとする (結合判定 1)。
 - そうでなければ、 x 成分での距離と y 成分での距離が共に距離閾値以内 κ_{d2} であれば、そのクラスを結合クラスとする (結合判定 2)。
6. 結合候補 2 のクラスに対しては以下の判定を行う。
 - x 成分での距離と y 成分での距離が共に距離閾値以内 κ_{d2} であれば、そのクラスを結合クラスとする (結合判定 2)。
7. 結合クラスが複数ある場合には、距離が最小のクラスに最終的に結合させる。

結合アルゴリズム 1 では、結合されるべきクラス同士が結合できない状況が確認された。活動状況を調べる閾値を変化させれば、解決することは可能であると考えられるが、この結合アルゴリズム 2 では、活動状況の探索する際に、活動が見られないクラスを結合候補 1、見られるクラスを結合候補 2 とする。そして、直線近似を行い、距離の大小で、最終的に結合するクラスを判定する際に、結合候補 1 のクラスに対しては、結合判定 1 と結合判定 2 の論理和を求め、これが真であれば結合クラスとする。結合クラス 2 に対しては、結合判定 2 が真であればこれを結合クラスとする。

表 5.8. クラス結合パラメータ.

項目名	変数名	値
結合実施判定のクリックの回数	κ_c	50
結合判定 1 の距離閾値	κ_{d1}	0.25
結合判定 2 の距離閾値	κ_{d2}	0.1
時間差	κ_t	30
活動判定のクリック回数	κ_k	5

結合アルゴリズム 2 では、結合アルゴリズム 1 と比較して、 xy 成分のみでの距離で判定を行う結合判定 2 を用いている。途切れる前後のクラスでは、 xy 成分と比べ、 z 成分は変化が大きく、アルゴリズム 1 で用いた xyz 全ての成分を見るやりかた (結合判定 1) では正しく結合できないことがわかった。このため、 xy 成分のみでの比較を行うことで、結合を行う。

5.9.4.4 結合結果 2

以上のクラス結合アルゴリズム 2 を、各アレイで行うクラス分けの後に実装し、結合の評価を行った。クラス結合のパラメータを表 5.8 に示す。結合のパラメータは結合アルゴリズム 1 と同じものを用い、結合判定 2 の距離閾値 $\kappa_{d2} = 0.1$ は $\kappa_{d1} = 0.25$ と同様に実験的に定めた。

図 5.26 に結合アルゴリズム 2 によるアレイ A でのクラス分け結果を示す。図 5.26 は、クラス結合未実装のクラス分け結果である図 5.15 と同様に、時間に対する方位角の変化を図 5.26(a) に、俯角の変化を図 5.26(b) に示す。アレイ B での結合アルゴリズム 2 の実装後のクラス分け結果について、図 5.27 に示す。アレイ A での結果と同様に、図 5.27(a) に、時間に対する俯角の変化を、図 5.27(b) に俯角の変化を示す。なお、図 5.26, 5.27 とともに、クリック数が 100 以上のク

表 5.9. クラス結合後の対応クラステーブル .

クジラ番号	クラス A	クラス B
クジラ A	A0	B0
クジラ B	A21	B29
クジラ C	A11	B20
クジラ D	A5	B14
クジラ E	A1	B7
クジラ F	A13	B19

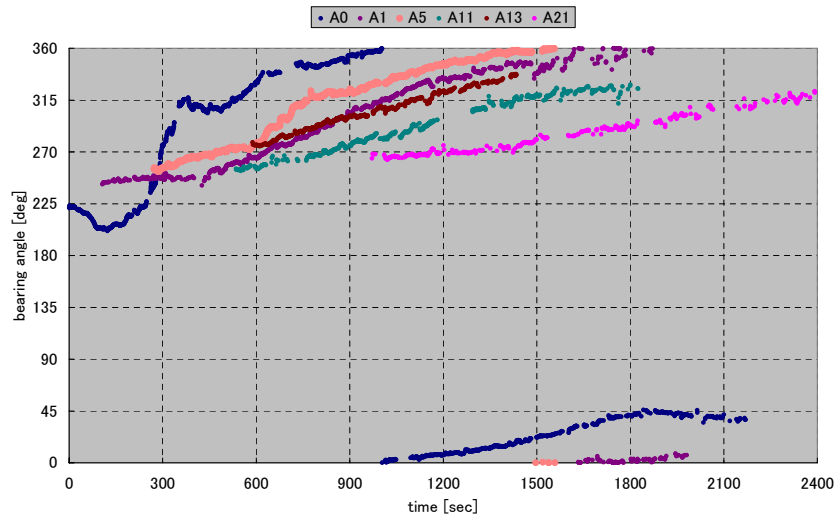
ラスのみを図示している . 図 5.26 , 図 5.27 より , 結合アルゴリズム 1 と比べて , アレイ・B とともにマッチング候補のクラスが計 6 つ確認できた . 以上より , 結合アルゴリズム 2 により , 途切れたクラスの結合に成功したと言える .

5.9.4.5 結合アルゴリズム 2 での位置推定結果

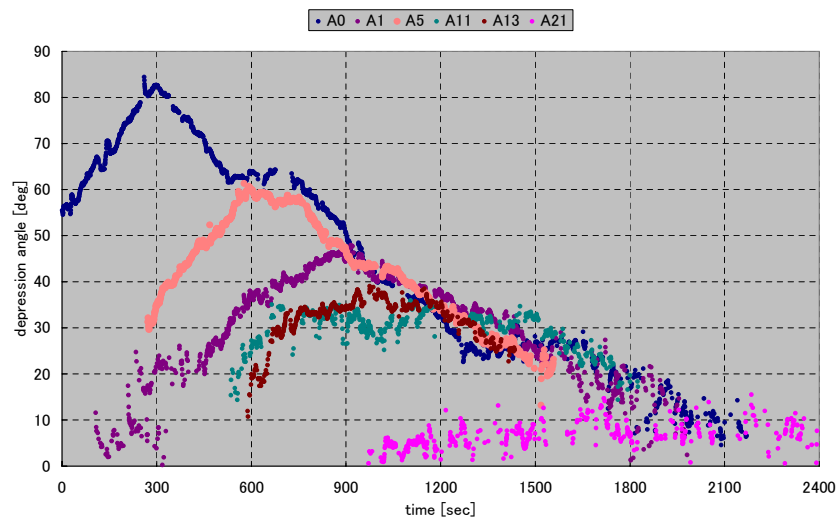
結合後のクラスを用いて対応クラスを , クラスの特徴量より見つけ , そのマッチング結果への検討を行った . 図 5.9 に , クラス結合後の対応クラステーブルを示す . 対応クラスの発見に関しては , 5.7 節と同様に行った . 図 5.28 に , クラス結合を用いた 6 頭の時間に対する三次元の行動軌跡を示し , 図 5.29 に水平面での行動軌跡を示す . またこれを 5.9.1 節と同様に線的に補間した後に , Butter-worth フィルタをかけスムージングしたものを図 5.30 に示す .

5.9.5 深度変化と ICI

Madsen らは , マッコウクジラがクリックのレンジを変更させながらダイブをしていると報告している [39] . 彼らはロガーに取り付けた深度計とハイドロフォンから得られた ICI の関係に着目し , 海面付近から潜行する前には長いレンジ

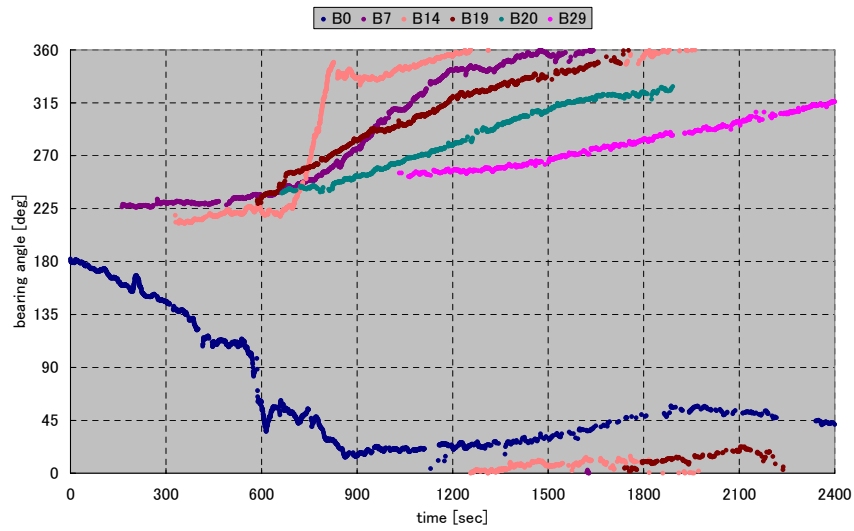


(a) bearing angles of the classes after class connection at array A

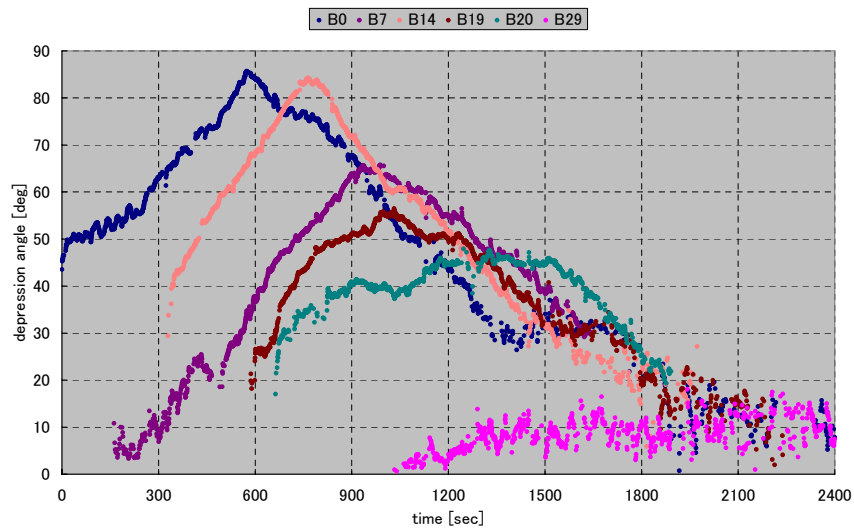


(b) depression angles of the classes after class connection at array A

図 5.26. クラス結合アルゴリズム 2 実装後のアレイ A でのクラス分け結果 .



(a) bearing angles of the classes after class connection at array B



(b) depression angles of the classes after class connection at array B

図 5.27. クラス結合アルゴリズム 1 実装後のアレイ B でのクラス分け結果 .

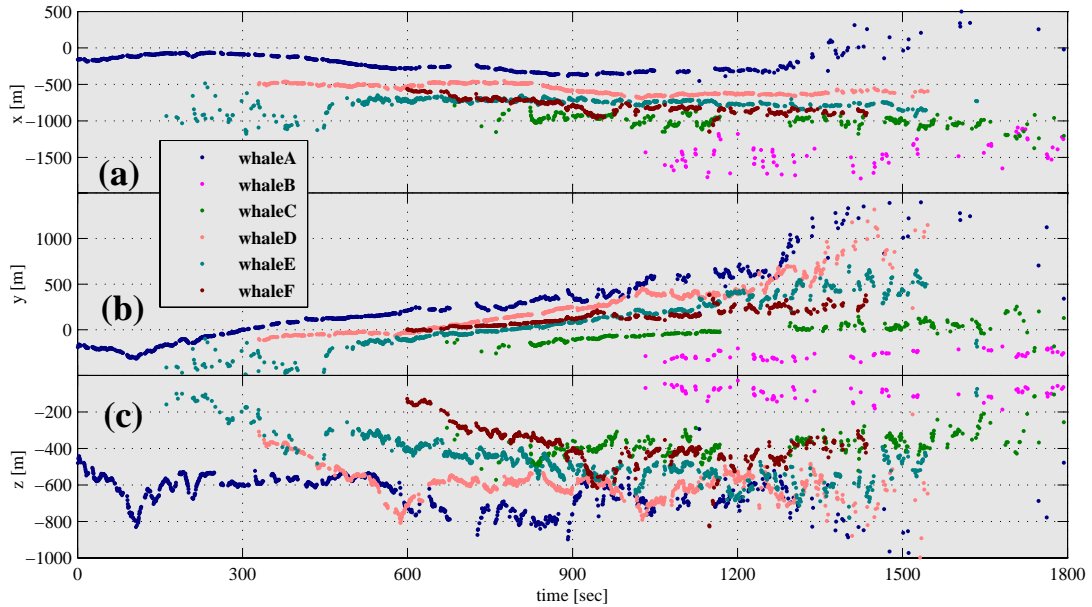


図 5.28. クラス結合を用いたクジラ A・B・C・D・E・F の三次元行動軌跡 .

のクリックを発生し、海中に潜行 (dive) すると、短いレンジのクリックを用いて海底面や捕食対象等のターゲットにアプローチしている。ソナーレンジが長いクリックを用いるということは、次のクリックまでの間隔 ICI が海面付近では長く (約 1sec)、海中に潜行しアプローチする間に ICI の間隔が徐々に短くなり、最終的に 0.4 ~ 0.45sec まで減少することを示した [39]。Madsen らが報告した ICI の調整が本実験結果から見られるかどうか、また群れで泳いでいる時にも見られるかどうかについて、時間に対する深さと ICI の変化を見ることで検討した。図 5.31 に、アレイ A で確認されたクジラ A の ICI と、スムージングした深さの時間変化を示す。クジラ A の ICI はアレイ A で構築されたクラス A0 のクリック検出時間を用いて計算し、深さはクラス結合を用いたスムージング後のクジラ A の位置情報 (図 5.30 参照) を用いた。ICI は十字でプロットされており、深さは線でプロットされている。群れでの変化を見るために、クジラ B・C・D・E・F についても図 5.31 と同様に、図 5.32, 図 5.33, 5.34, 5.35, 5.36

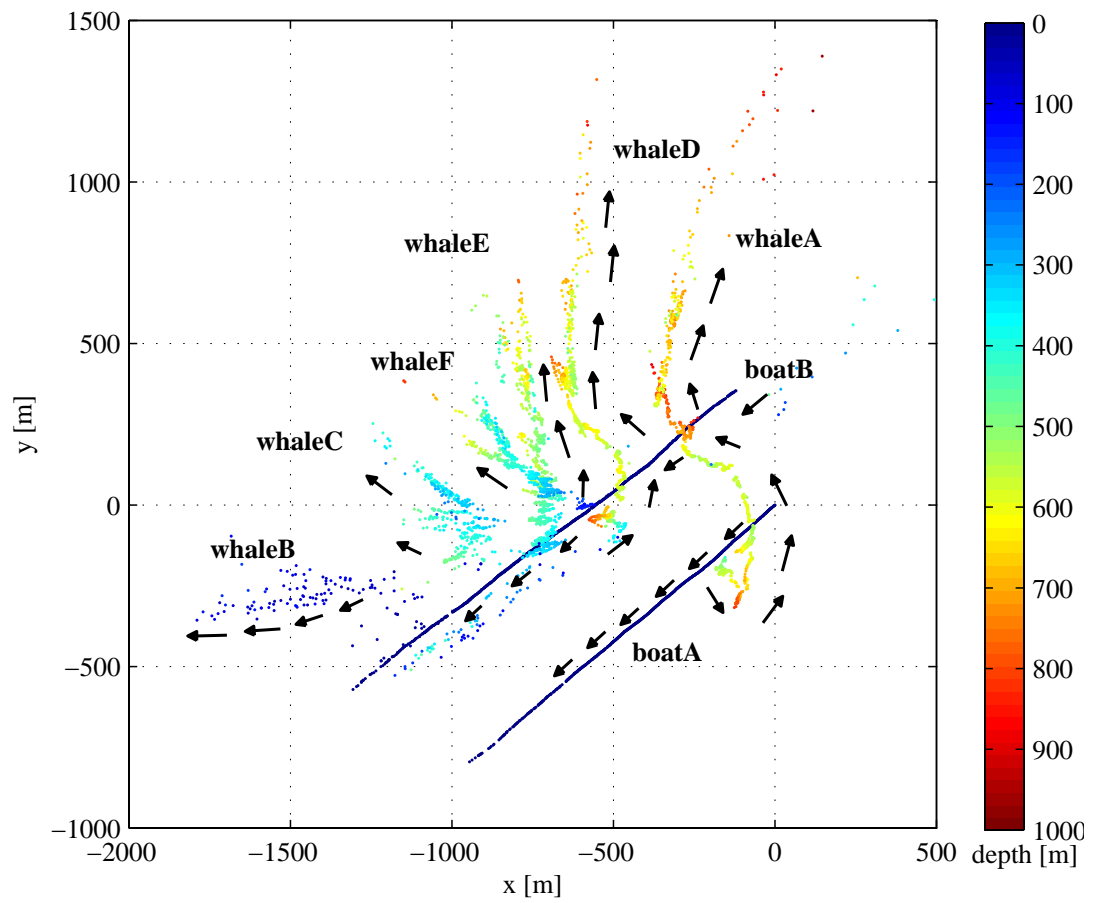


図 5.29. クラス結合を用いたクジラ A・B・C・D・E・F とボート・B の水平面での行動軌跡。

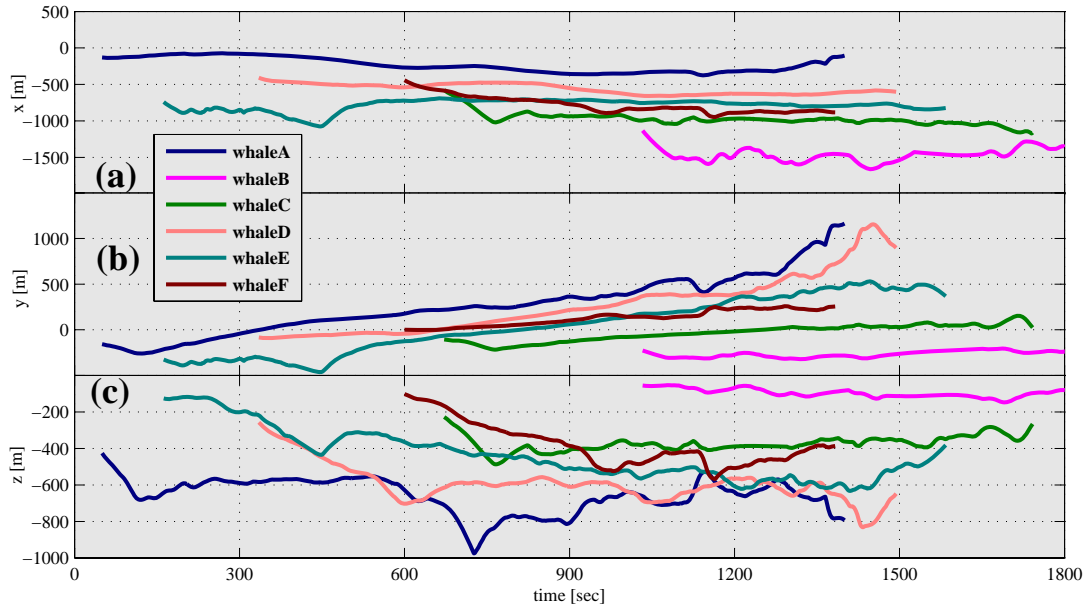


図 5.30. クラス結合を用いたスムージング後の三次元行動軌跡 .

にそれぞれ深度とICI の変化を示す .

ICI は 0.4 ~ 0.45sec に集中しており , これは Madsen らの示したターゲットへのアプローチを行っている最中であることが推測される . 得られているクジラの深さを考えると , これらのクジラは水面から潜行している最中 , もしくは潜行し終わっており , 海面に上昇する前の段階の位置情報が得られているといえる . 深さが数百 m 単位で上下している個所が見受けられることから , 小さく潜行 (short dive) を繰り返している . 図 5.31 ~ 5.36 より , 深度の下降に伴い , ICI の減少が見受けられるところは , 図 5.34 の 550 ~ 600sec である . その他に見受けられるところは , 図 5.31 の 800 ~ 900sec , 図 5.34 の 1100sec , 図 5.35 の 1200sec が挙げられる . Madsen らは海面から潜行する際に見受けられる ICI の変化を報告しているが , 図 5.31 ~ 図 5.36 より , 群れで泳いでおり , また小さな潜行を行う場合であっても ICI の減少 , すなわちソナーレンジの調整をマッコウクジラが行っている可能性がある事が示せた . 2004 年度に行った海洋実験で得られ

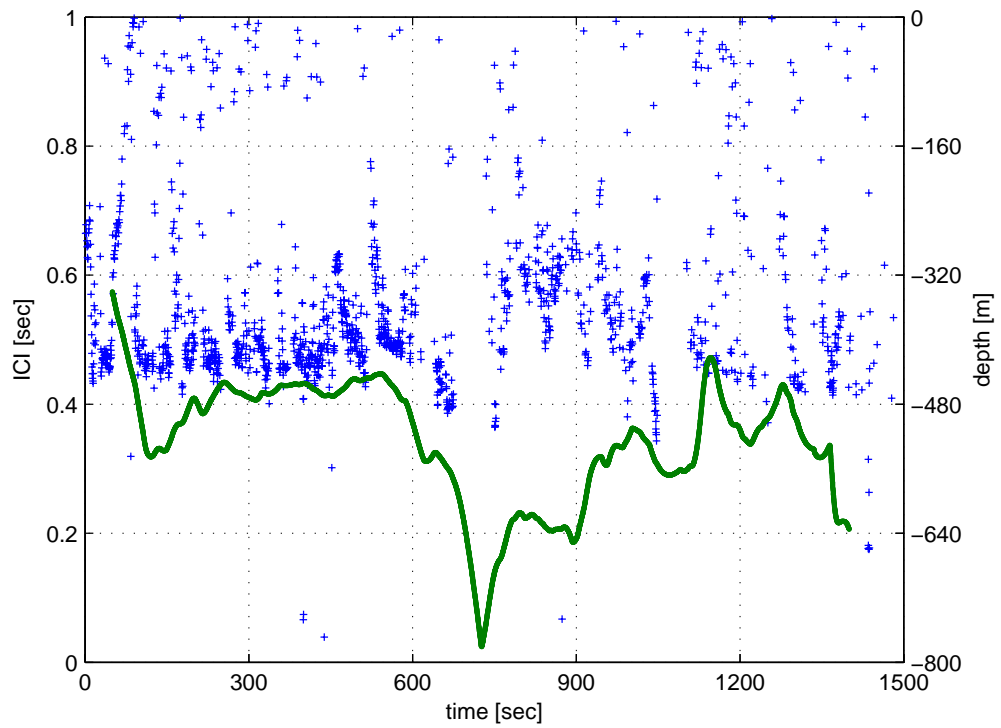


図 5.31. クジラ A の深さと ICI の時間変化 .

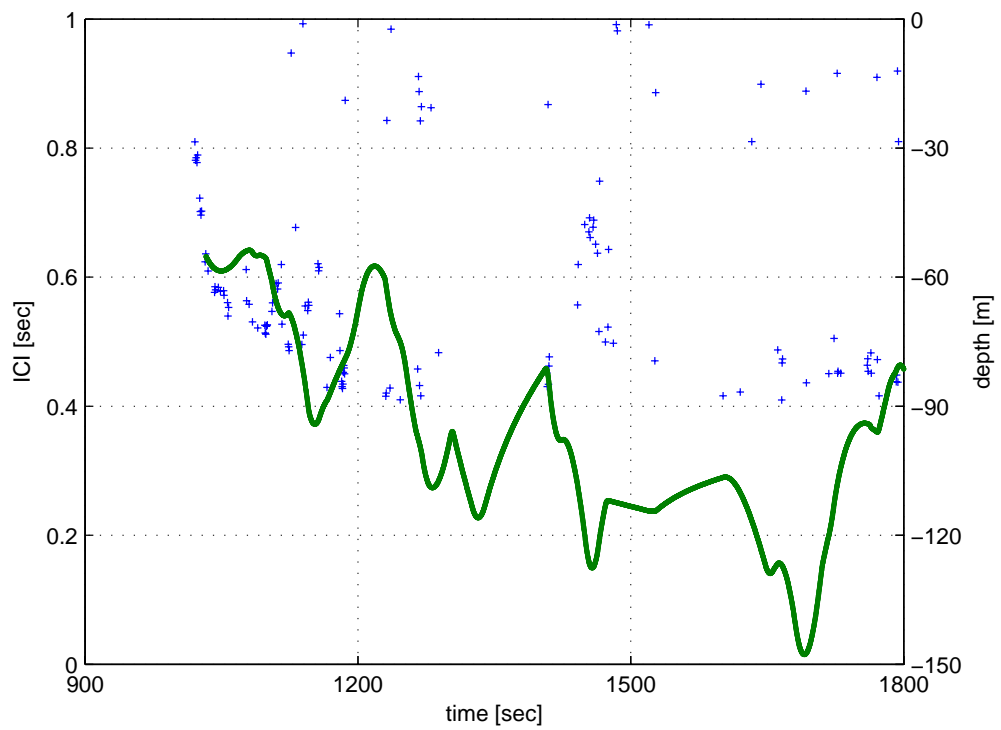


図 5.32. クジラ B の深さと ICI の時間変化 .

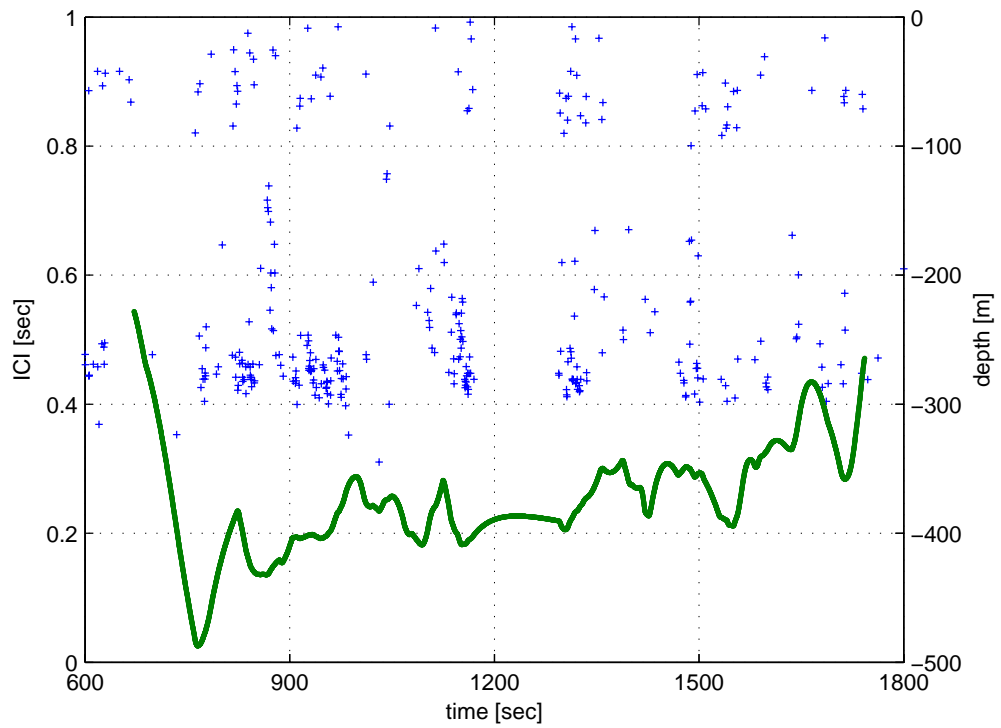


図 5.33. クジラ C の深さと ICI の時間変化 .

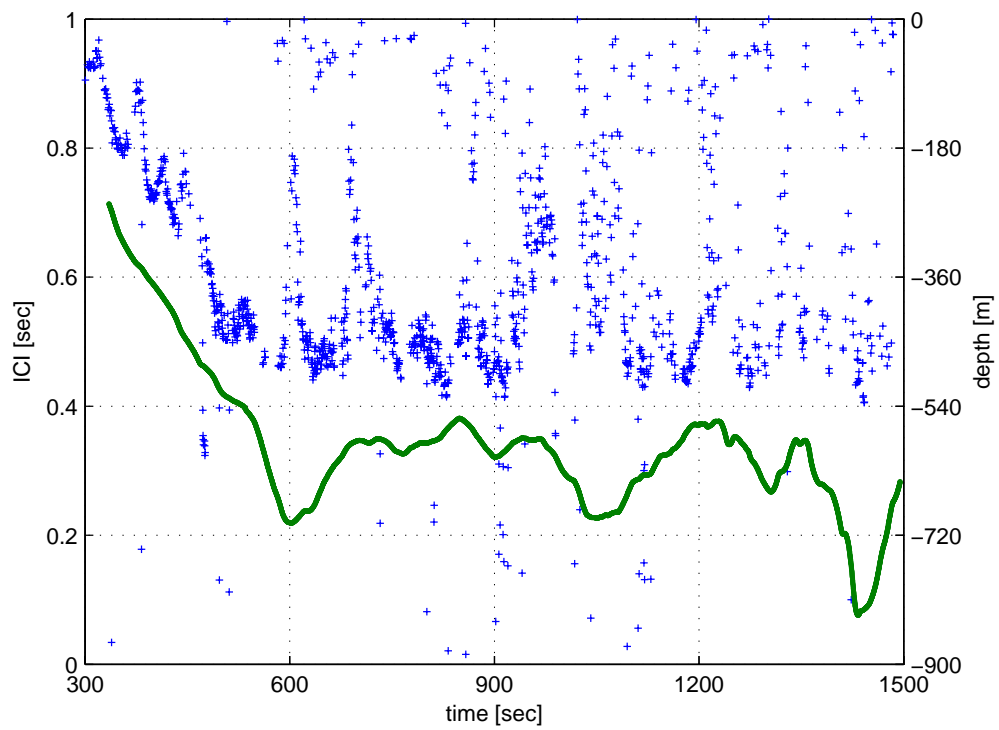


図 5.34. クジラ D の深さと ICI の時間変化 .

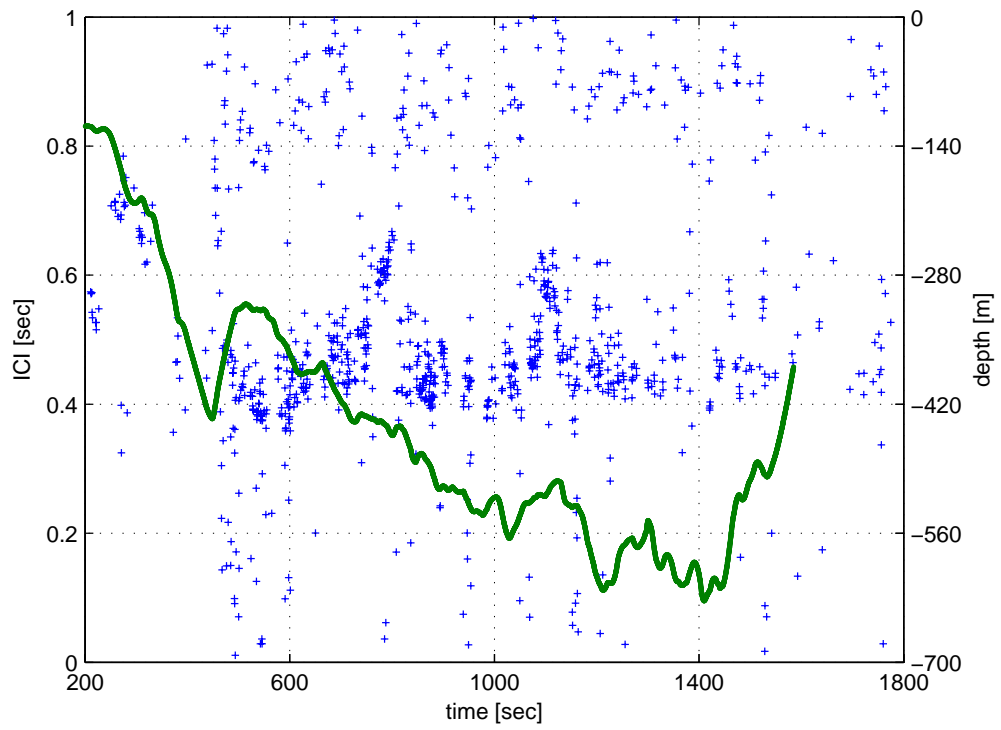


図 5.35. クジラ E の深さと ICI の時間変化 .

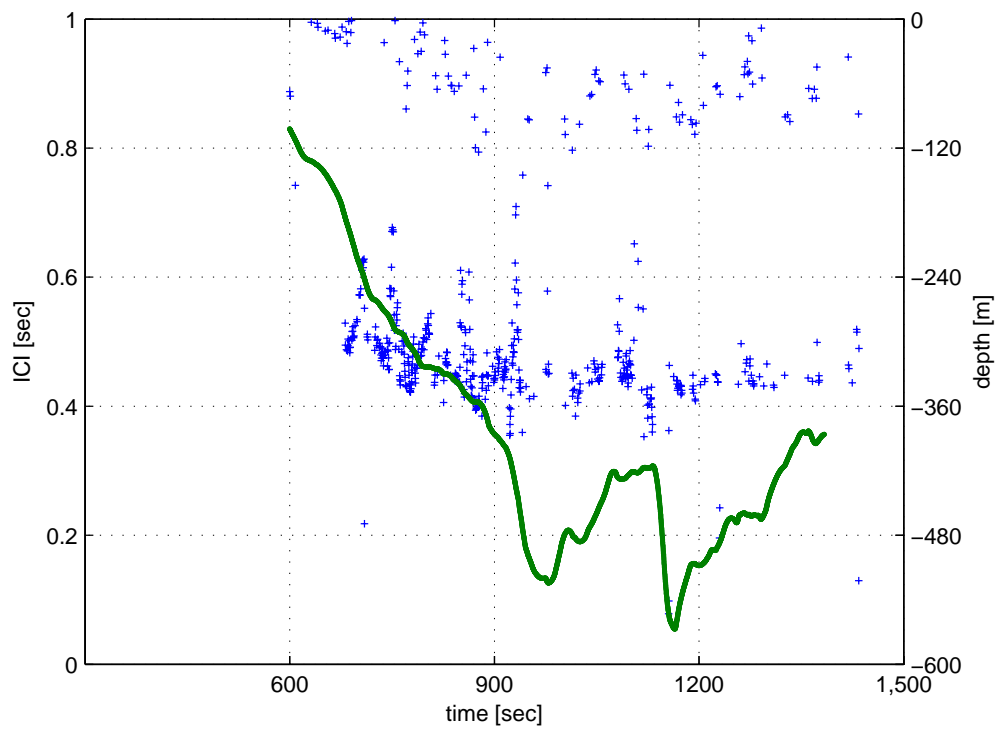


図 5.36. クジラ F の深さと ICI の時間変化 .

た実験海域の海底面地形図を図 5.37 に示す．アレイ A を降ろしたボート A の GPS 初期位置 (北緯 27.0759 度, 東経 142.034 度) を x 座標・y 座標の原点としたことから, 海底面は約 1500m 以上の深さにあることがわかる．クリックの間隔とターゲットまでのレンジは次の式で表す事ができる．

$$\text{クリック間隔 (ICI)} = \frac{\text{ターゲットレンジ}}{\text{水中音速}} * 2 + \text{思考時間} \quad (5.3)$$

クリックの間隔は音波が目標まで往復する時間と, 反射波を受け取ってから次のクリックを発するまでの思考時間との和として表す事ができる．この式をターゲットまでのレンジについて, 次のように変形する．

$$\text{ターゲットレンジ} = \frac{(\text{クリック間隔} - \text{思考時間}) * \text{水中音速}}{2} \quad (5.4)$$

水中音速を 1500m/sec で一定とし, クリック間隔を 0.45sec とし, 思考時間を 0sec と定めると, アプローチをしていると考えられるターゲットまでの距離は 337.5m となり, ICI が 0.4 ~ 0.5sec で集中している期間にクジラは 330m 先のターゲットを見ていたといえる．海底面の深度とクジラが潜行した深度を考えると, 海底面の地形をエコロケーションで調べているとは考えにくい．

この時, 図 5.38 に, 隣り合うクジラ同士 (図 5.29 参照) の距離を示す．図 5.38 では, 横軸に時間を取り, それぞれのペアの距離を色で表し, 距離が 330m のところで黒線を引いている．クジラ同士の距離を示した図 5.38 より, ICI から考察できるターゲットまでの距離 (330m) 以内に, 隣のクジラがいる時間帯が多い事がわかる．B-C 間の距離が 330m 以内である時間帯は, 図示した時間帯の内, 33.4% であり, C-F では 94.0%, F-E では 96.6%, E-D では 68.1%, D-A では 33.0% であった．クジラ B は水平面での移動方向が他の 5 頭と異なり, また深度も水面付近であるため, 他の 5 頭とははぐれて行動していたと思われる．この時, 5 頭の移動経路を考えると (図 5.19), 平面上では広がりながら泳いでおり, この最中は隣にいるクジラがわかる距離間隔で泳いでいたと考えられる．深度情報から, この 5 頭が海底面を見ていたとは考えにくく, またお互いにわ

かる距離間隔で泳いでおり，捕食の際に用いられるクリークが確認されていない事，ターゲットにアプローチをしていたと考えられる事，平面上では広がりながら同じ方向に泳いでいる事などを考慮すると，この解析結果からマッコウクジラが群れをなして，協力しながらターゲットを探していた可能性があると考えられる．

5.9.6 今後の課題

5.9.6.1 クラス分けミスとマッチングミス

本論文では，クリークの到来方向を元にクラス分けを行う．図 5.39(a) に示すような，アレイ A から二頭のクジラ Target1, Target2 をクラス分する状況を考える．ここで，二頭のクジラへの方向ベクトルが，クラス分け角度閾値 β_θ 以内であるとすると，この二頭は同じクラスとして分類されてしまう．このようなクラス分けのミスを発見する方法として，クラスの ICI をチェックすることが挙げられる．二頭のクジラが一つのクラスとして分類されていると，単純に考えて ICI が通常の半分ほどになり，ICI の異常値から複数のクジラが同一にクラス分けされている事を発見することは可能である．しかし，マッコウクジラが捕食の際に用いる ICI が 0.1msec に満たないようなクリークを発した場合に，誤って複数頭いると判断しないことが必要である．

このクラス分けミスは，マッチングにも影響を与えることが考えられる．図 5.39(b) に示すような，アレイ A・B があり，クジラが 3 頭 (Target1, Target2, Target3) いる状況を考える．ここで，図 5.39(b) に示すように，アレイ A では，Target1 へのクラス A1 が，そして Target2・3 へのクラス A2 ができ，アレイ B では Target1 へのクラス B1 が，Target2 へのクラス B2 が，Target3 へのクラス B3 ができるような状況を考える．この時，マッチングの候補クラスが異なるため，1 対 1 で対応クラスを決定させると，位置推定されないクジラが存在してしまう．表 5.10 に，この時のマッチングにより推定される位置について示

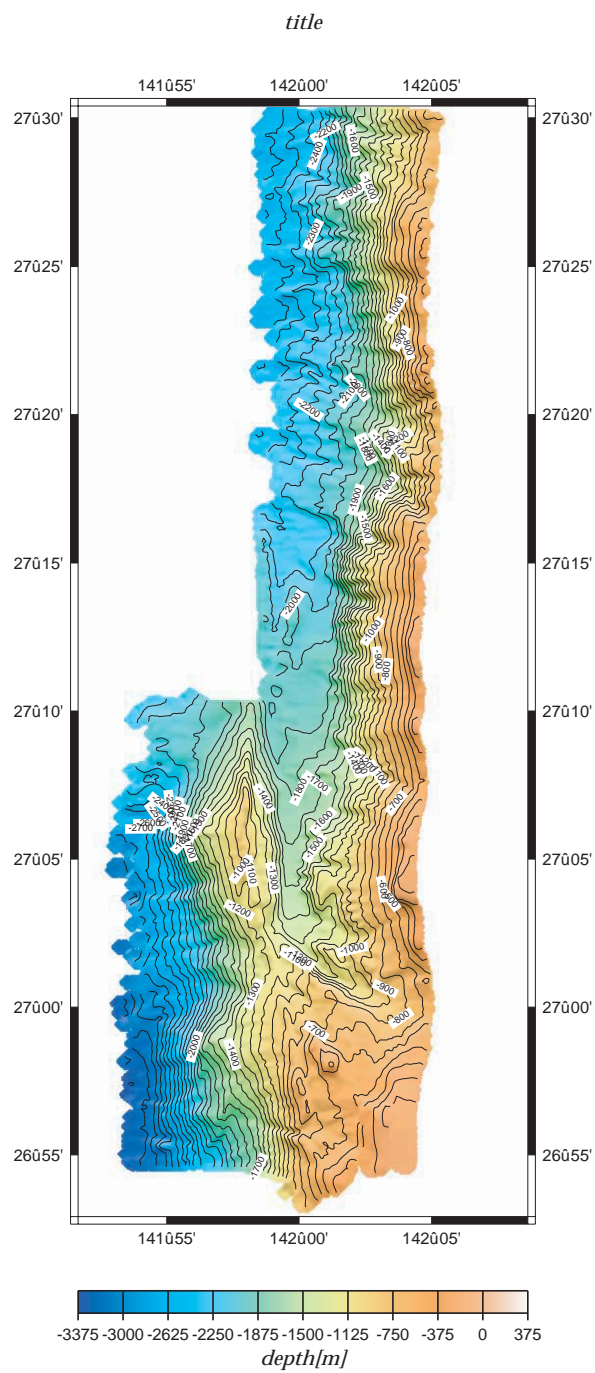


図 5.37. 実験海域の海底面地形図 [60].

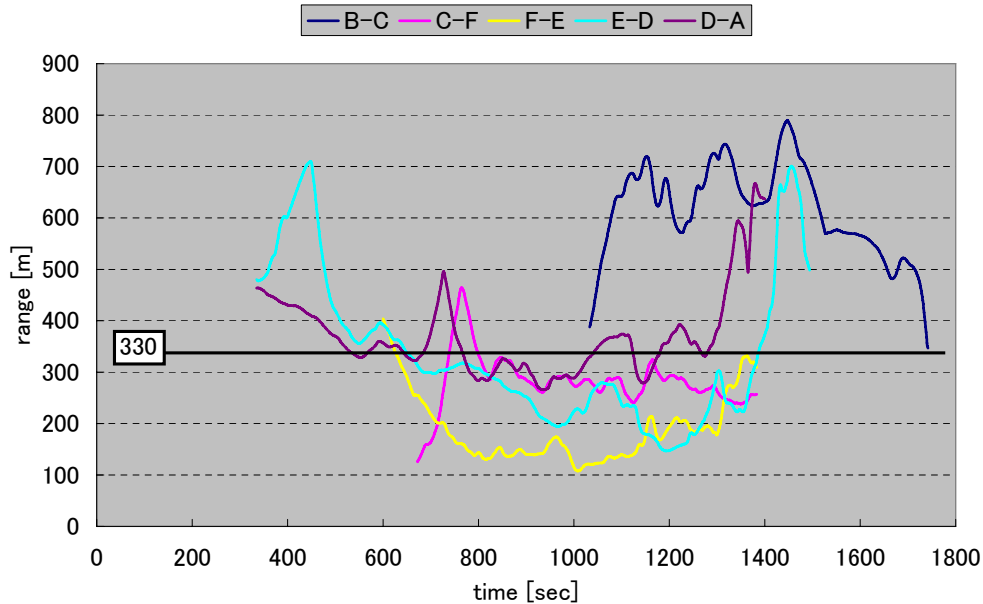


図 5.38. 隣り合うクジラ同士の距離 .

す . ケース 1 では , A1 と B1 を対応させ Target1 の位置を , A2 と B2 を対応させ , Target2 の位置を求めているが , Target3 の位置が推定されない . 他のケース 2 では , Target2 の位置が推定されない .

次いで図 5.39(c) に示すような , 三頭のクジラ Target1 , Target2 , Target3 をアレイ A・B から位置推定する状況を考える . 図 5.39(c) に示すように , アレイ A では Target1 へのクラス A1 と , Target2 と 3 へのクラス A2 ができ , アレイ B では Target1 と 2 へのクラス B1 と Target3 へのクラス B3 ができる . マッチング候補のクラスは双方ともに 2 であるため , 4 つの候補位置が推定されるが , 1 対 1 対応で対応クラスを発見するため , 推定されないクジラが存在してしまう . 表 5.10 に , この時マッチングにより推定される位置について示す . ケース 3 では A1 と B1 を対応させ Target1 の位置を , A2 と B2 を対応させ Target2 の位置を推定できるが , Target3 が推定されない . ケース 4 では A2 と B1 を対応させ Target2 の位置を推定できるが , 他のクジラ Target1・2 について推定できない .

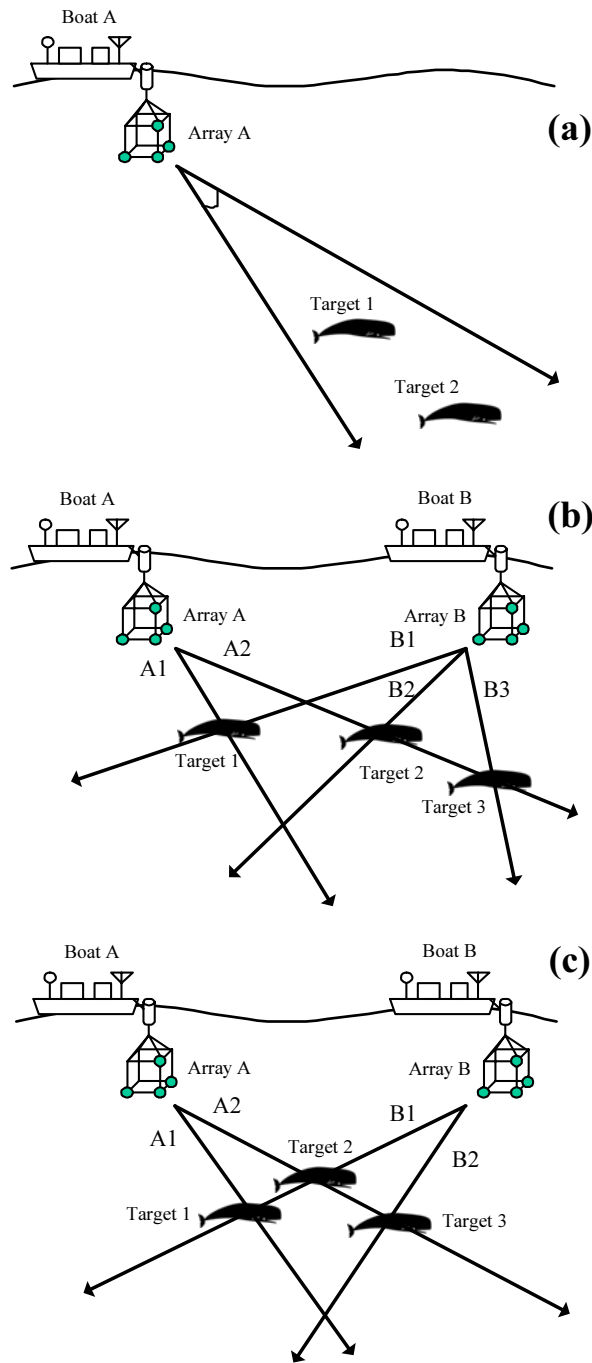


図 5.39. クラス分けミスとマッチングミスの例 .

表 5.10. クラス分けミス, マッチングミスの例 .

図 5.39(b) の場合			
	クラス A	クラス B	マッチング時の位置
ケース 1	A1 (Target 1)	B1 (Target 1)	Target 1
	A2 (Target 2 and 3)	B2 (Target 2)	Target 2
ケース 2	A1 (Target 1)	B1 (Target 1)	Target 1
	A2 (Target 2 and 3)	B3 (Target 3)	Target 3
図 5.39(c) の場合			
	クラス A	クラス B	マッチング時の位置
ケース 3	A1 (Target 1)	B1 (Target 1 and 2)	Target 1
	A2 (Target 2 and 3)	B2 (Target 3)	Target 3
ケース 4	A2 (Target 2 and 3)	B1 (Target 1 and 2)	Target 2
	A1 (Target 1)	B2 (Target 3)	失敗

方向ベクトルを用いたクラス分けは図 5.12, 5.13, 5.15, 5.16, 5.24, 5.25 より, 有効であると言えるが, これらのクラス分けミスやマッチングミスをなくすために改良を加える必要がある.

5.9.6.2 解析の全自動化

前節で示したクラス結合アルゴリズムにより, マッチング候補のクラスの決定については, アルゴリズムに改良の余地が残るものの, 自動化するめどが立ったと言える. このため, 対応クラスの決定を自動化するアルゴリズムを考案できれば, マッコウクジラの位置を全自動で計算することが可能となる. しかし図 5.17 に示すような, 異なるクジラによって構成されるクラスが存在する場合での位置推定を考えると, これまで対応させ続けてきたクラス同士が, ある時間を別のクラスと対応させなければ, 位置推定を正しく行うことはできない. ク

リックを解析することにより得られる個体識別のパラメータを用いて、クラス分けを行うことができれば、到来方向を元に行うことで起きるエラーである図 5.17 や、図 5.39 のような、クラス分けミスやマッチングミスの問題が解決でき、解析の自動化に向け大きく前進することができるが、(1) 同一の個体で一定の値を取り、その値が距離やマッコウクジラの向きに影響されなく、かつ (2) 個体ごとにその値が異なり、同じ値を取る事が無い、といったパラメータは、発見・提案されていない。本手法を全自動化させるための方法としては以下二つが考えられる。(A) 新たに個体識別のパラメータを発見・提案するか、(B-1) ICI からクラス分けが 1 頭にのみ行われているかを確認し、(B-2) 新しくクラスが出現した際の付近のクラスの状況を調べ (B-3) 図 5.17 のような、同じクラスが異なるクジラから構成されるような可能性がある時は、クラスを分割するか、マッチングの際に候補とする時にそのクラスを分けて考え、(B-4) 水平方向の方向ベクトルの形状と、形状が確認された時間を自動判別するアルゴリズムを提案し、(B-5) 二つのアレイで形状とその時間を元に対応するクラスを決定するアルゴリズムを提案し、これを実装する必要があると考えられる。

5.9.6.3 システムの Ground-truth

本手法により推定された位置に対し、精度の評価を行う必要がある。精度評価の方法として、目視観測による位置推定との比較ではマッコウクジラが水面にいる間にしか行えないことから、以下、3 つの方法を考えている。(1) データロガーをつけたマッコウクジラに対し、本手法による位置推定を行うことで、二つの深度データを比較し、精度評価を行う。(2) AUV に音響発生装置を取り付け、水中で自己位置を推定しながら航行する AUV を、音響発生装置からの音で位置推定を行い、AUV の航行データと、音響観測による位置データを比較することで、システムの精度評価とすることができる。(3) 複数の音源を用意し、それぞれをボートから数百メートルの深さに投下する。この時に、それぞれの音源

の位置を SSBL を用いて特定する共に，提案手法による 2 基のハイドロフォンアレイでの位置推定を行い，音源が複数ある状況でも，正しく位置が求められる事を確認するとともに，その精度を検証する．

5.9.6.4 他の音響データに対する解析

本章で示した解析結果は，2003 年の海洋実験で得られた 1 つのデータセットに対してのみ行っており，他の音響データに対しても解析を行う必要があると考えている．他の音響データで解析を行う際に考えら得る問題点として，(1) パラメータの決定，(2) 対応クラスの発見，の 2 点が考えられる．(1) のパラメータの決定に関しては，クリックの検出閾値や，クラス結合のパラメータを妥当なものに決定する必要がある．(2) の対応クラスの発見に関しては，多数のクジラが同期して動いている状況では対応するクラスの発見は困難となる可能性がある．また，本章で示したように提案手法により，音声，時間，位置という 5 次元のデータを得ることが可能となり，多くのデータに対し本手法を適用することで，新たな知見が得られるものと考えられる．

5.9.6.5 解析結果の運動モデルへの適用

位置推定の際にはそれぞれのアレイでの方位推定結果が必要となるが，傾斜計・磁気計の値は誤差が生じる事がある．また，推定される方位は変動があるため，提案手法では，ある時間幅で平均化しているが，マッコウクジラは常にクリックを発しているわけではないので，平均化の際にサンプル数が少なく，変動の影響を受けた方位推定結果を位置推定に用いなければならない事がある．数百 m 先のマッコウクジラの位置を推定するため，方位推定での誤差は，音源が遠ければ遠いほど，位置推定の結果に響いてしまう．このため，方位推定，及び位置推定で得られた結果に対し，マッコウクジラの運動モデルに適用し補正を行うことで，誤差の影響を少なくする事ができると考えられる．

5.10 本章のまとめ

本章では，提案手法による計算機結果と，結果から得られた考察，生物学的知見について述べた．計算機実験で用いたデータを取得した2003年度の小笠原実験の概要，使用した観測機器を示し，音響解析の対象となる音声データについて，示した．実験を行う計算機環境と，閾値等の解析パラメータを示し，各アレイで行うクリック検出結果，方位推定の結果，クラス分けの結果をそれぞれ示し，構築されたクラスの状況を示した．それぞれで構築されたクラスから，クリック数が100以上のものをマッチングによる位置推定の候補クラスとし，そのための候補クラスの決定，候補クラスのクリック時間や俯角の特徴といったクラスの特徴量に注目した対応クラスの発見の方法とその結果を述べた．対応クラスの位置推定結果を抜き出すことで得られた6頭の三次元行動軌跡を示し，位置のスムービングと速度に関する考察を行った．深度とICIの変化について調査し，潜行中にマッコウクジラが群れで協力したターゲットを探している可能性を示唆した．直線近似を用いたクラスの結合を行い，これに成功した．本章でしめした実験結果より，提案手法によるマッコウクジラの位置推定に成功し，6頭のマッコウクジラの潜水行動を得ることができた．

第6章

結論

マッコウクジラの未知なる水中での生態を解明すること、また水中観測を行うシステムを実現させることを目的とし、本論文では二基のハイドロフォンアレイによる位置推定手法を提案した。本手法ではマッコウクジラからのクリックを用いてパッシブな水中測位を実現する。それぞれのアレイで、クリック検出、4つ設置したハイドロフォン間の到達時間差による方位推定、到来方向を元にしたクラス分けを行い、各アレイで構築されたクラス同士を対応させ、対応するクラスのクリックの解析結果を用いることで三角測量による位置推定を行う。本手法により、群れで行動するマッコウクジラ的位置を推定することが可能となった。

2章「観測対象としてのマッコウクジラ」では、鯨類を取り巻く世界的な環境を述べ、その生態と、音響観測の対象となる鳴音について述べた。マッコウクジラの発音モデルとして提案されている bent-horn モデルについて、その原理と、bent-horn モデルによりクリックがマルチパルスになる様子を述べた。マッコウクジラの観測手法として、生息頭数推定に用いられる船上からの目視観測、複数のハイドロフォンを用いた音響観測、データロガーを取り付け、内部のセンサデータより水中行動を調査するバイオロギング、そして音響とバイオロギングを組み合わせた複合的な観測手法について述べた。

3章「マッコウクジラ観測システム」では、二基のハイドフォンアレイによる水中測位の原理について述べた。一つのハイドフォンアレイは4つのハイドフォンを格子状に配置し、これをSBLシステムとしてクリックの到達時間差による方位推定を行う。二基のハイドフォンアレイによるLBLシステムでは、それぞれのアレイでの方位推定結果、位置情報を元に三角測量による位置推定を行う。位置推定の推定結果に与える誤差の要因として、方位推定誤差、水中での音の屈折、GPS位置誤差が考えられ、これを用いて位置推定誤差の見積もりをおこない、得られた見積もり誤差よりアレイの展開法について述べた。マッコウクジラを水中で追跡し、観測を行う自律型海中ロボットAUVについて、その特徴と観測で用いるAUV(Aqua Explorer 2000)について述べた。

4章「位置推定手法」では、提案するマッコウクジラの水中位置推定手法について述べた。本手法では、大きく各アレイで行う方位推定とクラス分け部と、クラス同士のマッチングと位置推定部に分けられ、これらの処理を示した。各アレイでの方位推定とクラス分け部では、エネルギーベースによるクリックの検出手法と、相互相関を用いたクリックの到来方向推定、そして到来方向を元にしたクラス分け手法を提案した。クラス同士をマッチングする際には、対応するクラスの発見が必要であり、二基のアレイが離れていて、クジラからそれぞれのアレイへの方向が異なる事から、相手側に存在する全てのクラスとマッチングさせ位置推定を行う。そして、クラスの存在時間や、方向ベクトルの特徴を元に対応クラスの発見を行う手法を提案した。

5章「計算機実験結果」では、実際の海洋実験で得られたマッコウクジラの鳴き声を元に、提案手法による位置推定を行う。2003年度小笠原実験の概要、使用した観測機器、観測状況、得られた音声データについて述べ、提案手法による解析結果を示した。クリック検出・方位推定結果からは、方位推定の結果から実験データには6頭のマッコウクジラの行動軌跡を確認することが出来た。クラス分けにより、マッチングの際の候補となる候補クラスの絞り込みを行っ

た．クラス分けの結果では，クラスが途中で途切れてしまっているものが確認されたため，それを繋ぎ合わせ，各アレイでのクラスの特徴量を比較することで対応クラスを決定し，6頭のマッコウクジラの行動軌跡を得ることに成功した．位置情報をスムージングし，時間微分することで，速度を算出し，深度とICIの変化について考察を行った．ICIが通常のクリックよりも小さい値であり，また5頭のマッコウクジラが広がるように動いていることから，ターゲットを探す際に彼らが協力している可能性を示すことができた．途切れたクラスを結合させるアルゴリズムを提案・実装することで，クラスの結合に成功し，マッチングの前段階である候補クラスのリストアップを自動化することに成功した．

本研究の今後の課題としては，システムの正誤評価や解析の全自動化が挙げられる．システムの正誤評価は，AUVに音響発生装置を取り付け，海面から二基のアレイによるAUVの位置推定を行い，AUVの自己位置と，音響観測により得られた位置を比較することで，本手法の正誤評価を行うことができると考えている．解析の全自動化には，クラスマッチングにて対応するクラスの発見を自動化できれば，位置を出すまでの全ての処理を全自動で行うことができる．そのためには，ICIによるクラスの構成頭数の調査や，クラス分けミスを考慮したマッチング手法を考案する必要があると考えている．

謝辞

本理工学研究科 柳澤政生教授には指導教官として6年間に渡り大変お世話になりました。柳澤教授にはゼミでのご指導，ご叱責，研究室での自由な研究活動の場を与えて頂き本当にありがとうございます。本理工学研究科 大附辰夫教授・戸川望教授には本研究を進める上で親切丁寧にご助言を頂き，ここに深く謝意を示します。東京大学生産技術研究所 浦環教授，能勢昭助助教授，杉松治美女子には海洋実験，研究指導，論文作成，海外での発表でご迷惑をおかけいたしました。ここに深く謝意を示します。ご多忙中にご指導を賜りました本学理工学研究科 小林哲則教授，本学情報生産システム研究科 後藤敏教授に深く謝意を示します。

2004年度に本学研究科をご卒業された清水友樹氏(現ソニー)，同じく2004年度に東京大学生産技術研究所をご卒業された坂田雅雄氏には，本研究の面白さ，マッコウクジラの神秘，男としての生き様を教えて頂き，深く感謝いたします。インド工科大デリー校，ラジェンダール・パール教授には，本研究について常にご助言頂きました。私の拙い英語につきあって下さり，誠にありがとうございます。東京大学生産技術研究所 浦研究室の方々は研究を進める上でのご助言や論文の推敲を手伝って頂きました。誠にありがとうございます。本理工学研究科 柳澤研究室，大附研究室，戸川研究室の方々にはゼミや合宿などでご指導・ご叱責を頂き，本当にありがとうございます。

参考文献

- [1] T. Akamatsu, D. Wang, K. Nakamura, and K. Wang, “Echolocation range of captive and free-ranging baiji (*Lipotes vexilifer*), finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides*), and bottlenose dolphine (*Trisops truncatus*),” *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 104, pp. 2511–2516, 1998.
- [2] T. Akamatsu, D. Wang, K. Wang, and Y. Nait, “A method for individual identification of echolocation signals in free-ranging finless porpoises carrying data loggers,” *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 108, no. 3, pp. 1353–1356, 2000.
- [3] T. Akamatsu, D. Wang, S. Li, S. Dong, and X. Zhao, “Estimation of the detection probability for Yangtze finless porpoises (*Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*) with passive acoustic method,” *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 123, no. 6, 2008.
- [4] M. Amano and M. Yoshioka, “Sperm whale diving behavior monitored using a suction-cup-attached TDR tag,” *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 258, pp. 291–295, 2003.
- [5] K. Aoki, M. Amano, M. Yoshioka, K. Mori, D. Tokuda, and N. Miyazaki, “Diel diving behavior of sperm whales off Japan,” *Marine Ecology*

- Progress Series*, vol. 359, pp. 277–287, 2007.
- [6] K. Aoki, M. Amano, N. Sugiyama, H. Muramoto, M. Suzuki, M. Yoshioka, K. Mori, D. Tokuda, and N. Miyazaki, “Measurement of swimming speed in sperm whales,” in *Proc. Underwater Technology 07*, pp. 467–471, 2007.
- [7] Aqua Explorer 2000 (AE2000), <http://www.k-kcs.jp/japanese/aqua2000-j.html>
- [8] Nobuaki Arai, “Filed informatics for co-existence between human beings and endangered species: sea turtles, mekong giant catfish and dugongs,” in *Proc. Informatics Education and Research for Knowledge-Circulating Society 2008*, pp. 61–66, 2008.
- [9] 浅川 賢一, “海底ケーブル調査用自律型水中ロボット Aqua Explorer 2,” *生産研究*, vol. 52, no. 7, pp. 297–303, 2000
- [10] W. W. Au, “Auditory sensitivity of the harbour porpoise *Phocoena*,” *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 2, pp. 255–259, 1970.
- [11] W. W. Au, R. W. Floyd, R. H. Penner, and A. E. Murchison, “Measurement of echolocation signals of the Atlantic bottlenose dolphin, *Tursiops truncatus* Montagu, in open waters,” *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 56, pp. 1280–1290, 1974.
- [12] R. Bahl, T. Ura, and T. Fukuchi, “Techniques for segmentation and classification of several vocalizing sperm whales,” in *Proc. Oceans’03 San Diego*, pp. 457–463, 2003.
- [13] A. Balasuriya and T. Ura, “Vision-based underwater cable detection and following using AUVs,” in *Proc. the 1992 Symposium Oceans*, vol. 3, pp.

- 1582–1587, 2002.
- [14] J. Barlow and B. L. Taylor, “Estimates of sperm whale abundance in the northeastern temperate pacific from a combined acoustic and visual survey,” *Marine Mammal Science*, vol. 21, no. 3, Jul. 2005.
- [15] D. Brutzman, T. Healey, D. Marco and B. Mchgee, “Autonomous underwater vehicle control coordination using a tri-level hybrid software architecture,” *IEEE International Conference*, vol. 3, pp. 2149–2159, 1996.
- [16] C. T. Chen and F. J. Millero, “The sound speed in seawater,” *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 62, pp. 1129–1135, 1977.
- [17] A. B. Coppens, “Simple equations for the speed of sound in neptunian waters,” *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 69, no. 3, pp. 862–863, 1981.
- [18] Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora, <http://www.cites.org/>
- [19] M. R. Clarke, “Cephalopoda in the diet of sperm whales of the southern hemisphere and their bearing on sperm whale biology,” *Discovery Reports*, Vol. XXXVII, pp. 1–324, 1980.
- [20] R. Damus, J. Manleyl, S. Desset, J. Morash, and C. Chyssostomidis, “Design of an inspection class autonomous underwater vehicle,” in *Proc. Oceans’ 02 MTS/IEEE*, vol. 1, pp. 180–185, 2002.
- [21] J. C. Goold, “Signal processing techniques for acoustic measurement of sperm whale body length,” *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 100, pp. 3431–3441, 1996.

- [22] D. Grosso, “New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations),” *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 56, no. 4, pp. 1084–1091, 1974.
- [23] S. Hooker, M. Biuwa, B. McConnella, P. Millera, and C. Sparlinga, “Biologging science: logging and relaying physical and biological data using animal-attached tags,” *Deep-Sea Research Part II*, vol. 54, pp. 177–182, 2007.
- [24] 今泉 智人, “イルカのソナー能力の魚群探知機への適用に関する研究,” *水研センター研報*, no. 28, pp. 47–113, 2009.
- [25] K. Ichikawa, T. Akamatsu, and C. Tsutsumi, “Acoustic detection of dugong using automatic underwater sound monitoring systems: AUSOMS-D,” in *Proc. the 3rd international Symposium on SEASTAR2000 and Asian Bio-logging Science*, pp. 64–68, 2006.
- [26] K. Ishii, T. Fujii, and T. Ura, “An on-line adaptation method in a neural network based control system for AUVs,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 20, pp. 221–228, 1995.
- [27] JAMSTEC(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology), <http://www.jamstec.go.jp>
- [28] N. Jaquet, S. Dawson, and L. Douglas, “Vocal behavior of male sperm whales: Why do they click?,” *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 109, pp. 2554–2599, 2001.
- [29] M. Johnson and P. Tyack, “A Digital Acoustic Recording Tag for Measuring the response of Wild Marine Mammals to Sound,” *IEEE Oceanic Engineering*, vol. 28, pp. 3–12, 2003.

- [30] K. Kihuhu, K. Joonyong, H. S. Choi, L. Kyu-Yeul, and S. Woojae, "Estimation of hydrodynamic coefficients of a test-based AUV-SNUUVI by motion test," in *Proc. Oceans*, vol. 1, pp. 29–31, 2002.
- [31] S. Kimura, T. Akamatsu, K. Wang, D. Wang, S. Li, S. Dong, and N. Arai, "Comparison of stationary acoustic monitoring and visual observation of finless porpoises," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 125, no. 1, pp. 547–553, 2009.
- [32] 窪寺 恒己, 新井 詩織, 大泉 宏, 田村 力, 小西 健志, 磯田 辰也, "西部北大西洋でマッコウクジラに捕食された頭足類 2000 ~ 2003 年," 平成 17 年度 イカ類資源研究会議, pp. 49–52, 2005 .
- [33] M. Kumagaya, T. Ura, Y. Kuroda, and W. Ross, "Object observation in detail by the AUV "Tri-dog 1" with laser pointers," in *Proc. Oceans 2001, MTS/IEEE*, vol. 1, pp. 390–396, 2001.
- [34] C. Laplanche, O. Adam, M. Lopatka, and J. F. Motsch, "Measuring the off-axis angle and the rotational movements of phonating sperm whales using a single hydrophone," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 119, pp. 4074–4082, Jun. 2006.
- [35] S. Li, D. Wang, T. Akamatsu, and K. Wang, "Echolocation signals of the free-ranging Yangtze finless porpoise (*Neophocaena Phocaenoides asiaeorientalis*)," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 117, no. 5, pp. 3288–3296, 2005.
- [36] S. Li, D. Wang, K. Wang, T. Akamatsu, Z. Ma, and J. Han, "Echolocation clicks sounds from wild inshore finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides sunameri*) with comparisons to the sonar of riverine *N. P. asiae-*

- orientalis,” *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 121, no. 6, pp. 3938–3946, 2007.
- [37] S. Leatherwood and R. Reaves, *The Sierra club handbook of whales and dolphins*, Sierra Club Books.
- [38] C. Levenson, “Source level bistatic target strength of the sperm whale, *Physeter catodon*, measured from an oceanographic aircraft,” *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 55, pp. 1100–1103, 1977.
- [39] P. T. Madsen, R. Payne, U. K. Kristiansen, M. Wahlberg, I. Kerr, and B. Møhl, “Sperm whale sound production studied with ultrasound time/depth-recording,” *Journal of Experimental Biology*, vol. 205, pp. 1899–1906, 2002.
- [40] K. V. Mackenzie, “Nine-term equation for sound speed in the oceans,” *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 70, pp. 807–812, 1981.
- [41] MATLAB, <http://www.cybernet.co.jp/matlab/>
- [42] Microsoft Visual Studio ホームページ , <http://www.microsoft.com/japan/msdn/vstudio/>
- [43] 宮下 富夫 , “鯨類の目視調査法の現状と課題,” *哺乳類科学* , vol. 44, no. 1, pp. 97–101, 2004.
- [44] B. Møhl, M. Wahlberg, P. Madsen, L. Miller, and A. Surykke, “Sperm whale clicks: Directionality and source level revisited,” *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 107, pp. 638–648, 2000.

- [45] B. Møhl, “Sound transmission in the nose of the sperm whale *Physeter catodon*. A postmortem study,” *Journal of Computer Physiology*, vol. A-187, pp. 335–340, 2001.
- [46] B. Møhl, M. Wahlberg, and A. Heerfordt, “A large-aperture array of nonlinked receivers for acoustic positioning of biological sound source,” *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 109, pp. 434–437, 2001.
- [47] B. Møhl, M. Wahlberg, P. T. Madsen, A. Heerfordt, and A. Lund, “The monopulsed nature of sperm whale clicks,” *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 114, no. 2, Aug. 2003.
- [48] R. P. Morrissey, J. Ward, N. DiMarzio, S. Jarvis, and D. J. Moretti, “Passive acoustic detection and localization of sperm whale (*Physeter macrocephalus*) in the tongue of the ocean,” *Applied Acoustics*, vol. 67, pp. 1091–1105, 2006.
- [49] K. Nagahashi, T. Obara, T. Ura, and T. Sakamaki, “Autonomous underwater vehicle r2D4 autonomous route change system in response in environmental anomaly,” in *Proc. Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*, pp. 152–155, Jun. 2003.
- [50] 中川 徹, 小川 義夫, “最小自乗法による実験データ解析プログラム SALS,” 東京大学出版会, pp. 95–110, 1982.
- [51] 中野 剛志, 自律型海中ロボットによるマッコウクジラの個体識別に関する研究, 2005年度早稲田大学大学院理工学研究科修士論文, 2005.
- [52] S. Tang, T. Ura, T. Nakatani, B. Thornton, and T. Jiang, “Estimation of hydrodynamic coefficients of the complex-shaped autonomous underwater

- vehicle TUNA-SAND,” *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 14, no. 3, pp. 373–386, 2009.
- [53] E. Nosal and L. Franzer, “Sperm whale three-dimensional track, swim orientation, beam pattern, and click levels observed on bottom-mounted hydrophones,” *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 122, pp. 1969–1987, 2007.
- [54] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *NUMERICAL RECIPES IN C*, 技術評論社 .
- [55] N. Okumura, K. Ichikawa, T. Akamatsu, N. Arai, T. Shinke, T. Hara, and K. Adulyanukosol, “Pattern analyses of the vocal structure of dugong calls,” in *Proc. the 2nd International Symposium on SEATAR2000 and Asian Bio-logging Science*, pp. 29–32, 2005.
- [56] The Ocean Mammal Institute, <http://www.oceanmammalinst.org>
- [57] G. Paven, T. Hayward, and J. Gordon, “Time patterns of sperm whale codas recorded in the mediterranean sea 1985 - 1996,” *Journal of Acoustical Society of America*, pp. 3487–3495, 2000.
- [58] S. Sakamoto, K. Ichikawa, T. Akamatsu, T. Shinme, N. Arai, T. Hara, and K. Adulyanukosol, “Effect of ship sound on the vocal behavior of dugongs,” in *Proc. the 3rd International Symposium on SEASTAR2000 and Asian Bio-logging Science*, pp. 69–75, 2006.
- [59] 坂田 雅雄, 自律型海中ロボットを使ったマッコウクジラの観測, 2004年度東京大学大学院工学系研究科修士論文, 2004.

- [60] 清水 友樹, 自律型海中ロボットシステムにおける音声解析システムに関する研究, 2004年度早稲田大学大学院理工学研究科修士論文, 2004.
- [61] J. L. Spiesberger and K. M. Fristup, "Passive localization of calling animals and sensing of their acoustic environment using acoustic tomography," *American Naturalist*, vol. 135, pp. 107–153, 1990.
- [62] V. Teloni, M. Johnson, M. Patricke, and M. Peter, "Shallow food for deep dives: Dynamic foraging behavior of male sperm whales in a high latitude habitat," *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 354, pp. 119–131, 2008.
- [63] A. Thode, "Tracking sperm whale (*Physeter macrocephalus*) dive profiles using a towed passive acoustic array," *Journal of Acoustical Society of America*, vol.116, pp. 245–253, 2004.
- [64] B. Thornton, T. Ura, Y. Nose, and S. Tumock, "Zero-G class underwater robots: unrestricted attitude control using control moment gyros," *IEEE Journal of Oceanic engineering*, vol. 32, pp. 565– 583, 2007.
- [65] C. Tiemann, A. Thode, J. Straley, and V. O'Connell, "Three-dimensional localization of sperm whales using a single hydrophone," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 120, pp. 2355–2365, 2006.
- [66] C. Tsutsumi, K. Ichikawa, T. Akamatsu, N. Arai, T. Shinke, T. Hara, and K. Adulyanukosol, "Feeding behavior of wild dugongs monitored by a passive acoustical method," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 120, no. 3, pp. 1356–1360, 2006.
- [67] 浦 純也, 自律型海中ロボットによるクジラ観測に関する研究, 2003年度早稲田大学大学院理工学研究科修士論文, 2003.

- [68] T. Ura, T. Obara, S. Takagawa, and T. Gamo, "Exploration of Teisi Knoll by autonomous underwater vehicle "R-One robot",," in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 42–53, 2001.
- [69] T. Ura, R. Bahl, M. Sakata, J. Kojima, T. Fukuchi, J. Ura, K. Mori, T. Nakatani, K. Nose, and H. Sugimatsu, "Development of AUV-based system for acoustic tracking of diving sperm whales," in *Proc. Oceans'04 Kobe*, pp. 2302–2307, 2004.
- [70] T. Ura, M. Sakata, R. Bahl, J. Kojima, T. Fukuchi, U. Ura, M. Nose, H. Sugimatsu, K. Mori, T. Nakatani, and M. Yanagisawa, "Acoustic tracking of sperm whales using two sets of hydrophone array," in *Proc Underwater Technology 04*, pp. 103–107, 2004.
- [71] 浦環, Rajendar Bahl, 坂田雅雄, 能勢義昭, 福地鉄雄, 小島淳一, 浦純也, 杉松治美, 中谷武史, "2組のハイドロフォンアレイを用いたマッコウジラの追跡観測実験," *生産技研*, vol. 56, no. 2, pp. 27–30, 2004.
- [72] 浦環, バールラジェンダール, 坂田雅雄, 小島淳一, "2組のハイドロフォンアレイを使ったマッコウジラの潜水行動の推定," *生産技研*, vol. 56, no. 6, pp. 55–58, 2004.
- [73] M. Wahlberg, B. Møhl, and P. T. Madsen, "Estimating source position accuracy of a large-aperture hydrophone array for bioacoustics," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 109, pp. 397–406, 2001.
- [74] M. Wahlberg, "The acoustic behavior of diving sperm whales observed with a hydrophone array," *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 281, pp. 53–62, 2002.

- [75] W. A. Watkins and W. Schevill, "Sperm whale codas," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 62, pp. 1485–1490, 1977.
- [76] W. A. Watkins, M. A. Daher, K. Fristrup, T. Howald, "Sperm whales tagged with transponders and tracked underwater by sonar," *Marine Mammal Society*, vol. 9, pp. 55–67, 1993.
- [77] W. A. Watkins, M. A. Daher, N. A. DiMarizo, A. Samules, D. Wartzok, K. M. Fristrup, P. W. Howey, and R. R. Mariefski, "Sperm whale dives tracked by radio tag telemetry," *Marine Mammal Science*, vol. 18, no. 1, pp. 55–68, Jan. 2002.
- [78] Xilinx Virtex-2 FPGA Data Sheet, <http://direct.xilinx.com/bvdocs/publications/ds031.pdf>
- [79] L. Yongkuan, "AUV's trends over the world in the future decade," in *Proc. the 1992 Symposium Autonomous Underwater Vehicle Technology*, vol. 1, pp. 116–127, 1992.
- [80] W. M. X. Zimmer, M. P. Johnson, A. D'Amico, and P. L. Tyack, "Combining data from a multisensor tag and passive sonar to determine the diving behavior of a sperm whale," *IEEE Journal of Oceanic Engineering of Society*, vol. 28, pp. 13–28, 2003.
- [81] W. M. X. Zimmer, P. T. Madsen, V. Telsoni, M. P. Johnson, and P. L. Tyack, "Off-axis effects on the multipulse structure of sperm whale usual clicks with implications for sound production," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 118, pp. 3375–3345, 2005.
- [82] W. M. X. Zimmer, P. L. Tyack, M. P. Johnson, and P. T. Madsen, "Three-dimensional beam pattern of regular sperm whale clicks confirms bent-

horn hypothesis," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 117, pp. 1473–1485, 2005.

研究業績

雑誌論文

Localization of Sperm Whales in a Group using Clicks received at Two Separated Short Baseline Arrays, *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 127, pp. 133–147, Jan. 2010, Ryo Hirotsu, Tamaki Ura, Junichi Kojima, Harumi Sugimatsu, Masao Sakata, Rajendar Bahl, and Masao Yanagisawa .

国際会議

(査読付き)

Analysis of Sperm Whale Clicks by MUSIC Algorithm, Proceedings of OCEANS'06 IEEE/MTS, Singapore, pp. 1-6, May. 2006, Ryo Hirotsu, Tamaki Ura, Rajendar Bahl, and Masao Yanagisawa.

Experimental Results of AUV-based Acoustic Tracking System of Sperm Whale, Proceedings of OCEANS'06 IEEE/MTS, Singapore, pp. 1-5, May, 2006, Tamaki Ura, Junichi Kojima, Takeshi Nakano, Harumi Sugimatsu, Kyouichi Mori, Ryo Hirotsu, and Masao Yanagisawa.

Classification of Sperm Whale Clicks for Real-Time Localization with Triangulation, The 17th Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals, CD-Rom, Nov. 2007, Ryo Hirotsu, Tamaki Ura, Junichi Kojima, Harumi Sugimatsu, Masao Sakata, Rajendar Bahl, and Masao Yanagisawa.

Classification of Sperm Whale Clicks and Triangulation for Real-Time Localization with SBL Arrays, Proceedings of OCEANS'08 IEEE/MTS, Quebec, pp. 1-7, Sept. 2008, Ryo Hirotsu, Tamaki Ura, Junichi Kojima, Harumi Sugimatsu, Masao Sakata, Rajendar Bahl, and Masao Yanagisawa.

Classification matching of sperm whale clicks with two arrays,
Proceedings of The 5th Animal Sonar Symposium, p. 74 Sept.
2009, Ryo Hirotsu, Tamaki Ura, Junichi Kojima, Harumi Sugimatsu,
Rajendar Bahl, and Masao Yanagisawa.

講演

自律型海中ロボットによるマッコウクジラの観測システムの開発, Blue Earth '04, p.112, Jan. 2005, 浦環, 小島淳一, 坂田雅雄, Rajendar Bahl, 能勢義昭, 杉松治美, 福地鉄雄, 福島信男, 森恭一, 清水友樹, 高橋秀幸, 穂積大輔, 柳澤政生, 廣津良.

自律型海中ロボットによるマッコウクジラの観測, Blue Earth '05, pp. 262-263, Feb. 2006, 浦環, 小島淳一, 杉松治美, 森恭一, 福島信男, 中野剛志, 廣津良, 西澤健太, 能勢義昭, 高橋秀幸, 福地鉄雄, 柳澤政生, 井上知己.

マッコウ鯨生態観測に利用した自律型海中ロボット (Aqua Explorer 2000) の運用 - 小笠原父島海域での展開報告 (2005 夏) -, Abstracts of Advanced Underwater Technology for Bio-SONAR Study Workshop(ABIOS)-06, p.14, Mar. 2006, 福島信男, 小島淳一, 浦環, 杉松治美, 森恭一, 中野剛志, 廣津良, 西澤健太, 高橋秀幸, 井上知己.

自律型海中ロボットを使ったマッコウクジラの観測 - 2005 年小笠原父島海域での実験報告 -, Abstracts of Advanced Underwater Technology for Bio-SONAR Study Workshop(ABIOS)-06, p.15, Mar. 2006, 小島淳一, 浦環, 杉松治美, 森恭一, 福島信男, 中野剛志, 廣津良, 西澤健太, 高橋秀幸, 井上知己.

MUSIC アルゴリズムを用いたマッコウクジラの鳴音解析に関する研究, Abstracts of Advanced Underwater Technology for Bio-SONAR Study Workshop(ABIOS)-06, p. 16, Mar. 2006, 廣津良, 浦環, Rajendar Bahl, 柳澤政生.

マッコウクジラの方向変化がIPIに与える影響に関する一考察, 平成18年度電気関係学会関西支部連合大会, CD-Rom, S54, Nov. 2006, 廣津良, 浦環, 杉松治美, Rajendar Bahl, 柳澤政生, 坂田雅雄.