

マダラ *Gadus macrocephalus* 陸奥湾産卵群の
移動と資源に関する研究

岩手大学大学院連合農学研究科
生物環境科学専攻
三浦太智

目次

第1部 序論.....	1
I. 研究背景.....	1
第2部 本論.....	5
第1章 マダラ陸奥湾産卵群の分布と回遊.....	5
1.1 緒言.....	5
1.2 材料および方法.....	7
1.3 結果.....	10
1.3.1 再捕率と月別再捕数.....	10
1.3.2 放流年別の再捕海域と再捕率.....	12
1.4 考察.....	16
第2章 データロガーおよび耳石微量元素によるマダラ陸奥湾産卵群の 移動履歴推定手法の検討.....	19
2.1 目的.....	19
2.2 材料および方法.....	21
2.2.1 データロガー標識放流.....	21
2.2.2 耳石微量元素分析.....	25
2.3 結果.....	29
2.3.1 データロガー標識放流.....	29

2.3.2	耳石微量元素分析.....	40
2.4	考察.....	47
第3章	マダラ陸奥湾産卵群の資源構造と変動要因.....	51
3.1	目的.....	50
3.2	材料および方法.....	52
3.2.1	年齢査定および漁期年別全長組成.....	52
3.2.2	VPAによる資源量推定.....	56
3.3	結果.....	59
3.3.1	年齢別漁獲個体数.....	59
3.3.2	年齢別資源構成.....	65
3.4	考察.....	69
第3部	総括.....	71
	謝辞.....	74
	引用文献.....	75

第1部 序論

I. 研究背景

マダラ *Gadus macrocephalus* は北西太平洋に広く分布する大型魚であり、近縁種であるタイセイヨウダラ *Gadus morhua* と共に水産資源として広く利用されている重要種である。

日本では北海道から本州の、日本海側は隠岐諸島周辺まで、太平洋側は茨城県沖まで生息しており（三島 1989）、底曳網、底建網、刺網、釣りといった様々な方法で漁獲、利用されている。日本におけるマダラ利用の歴史は古く、縄文時代以降の各時代の遺跡からマダラの骨が出土しており（西本 1984, 1985）、当時からタンパク源として利用されていたことが伺える。

青森県陸奥湾は北部の湾口部で津軽海峡と接し、その先で日本海及び太平洋と接する大型内湾であり、マダラの産卵場として知られる（涌坪 1997）。湾口部に近い脇野沢、佐井、蟹田、平館といった地区ではマダラ漁業が盛んであり、江戸時代には塩漬けにしたマダラが幕府への献上品された記録や、脇野沢地区では太平洋戦争時には豊漁であったマダラの水揚げ金を基に軍用機が献上された記録が残る（野呂 2016）。湾口部の佐井、脇野沢地区では現在もマダラを対象とした底建網漁業が盛んに行われ、重要な収入源であるとともに、脇野沢地区では漁期の初めに、漁船同士が網の設置場所を巡って競い合う「場取り」という伝統的な方法が残るなど、地域社会、文化的にも関わりが深い魚種となっている。

日本周辺のマダラ資源は大きく3つの系群、すなわち青森県太平洋側から茨城県沖に分

布するマダラ太平洋北部系群，青森県日本海側から隠岐諸島周辺まで分布するマダラ日本海系群，北海道周辺および本研究で扱う青森県陸奥湾からなるマダラ北海道に大別される（水産庁 2018a, b, c）。本研究で主な調査海域とした陸奥湾におけるマダラの漁獲動向を見ると，1930年代は10,000トン，1940年代は5,000トン，1990年代は2,000トンをそれぞれピークとして，また，2000–2008年にかけては極めて低調に推移し，2006年には25トンで最低となるなど，長期的に大きく増減している（Fig. 1）（青森県 2018; 三浦 2018）。2009年以降，漁獲は増加傾向が続き，2016年には1,364トンと，1991年以来25年ぶりに1,000トンを超える漁獲となり，今後の動向が注目されている。

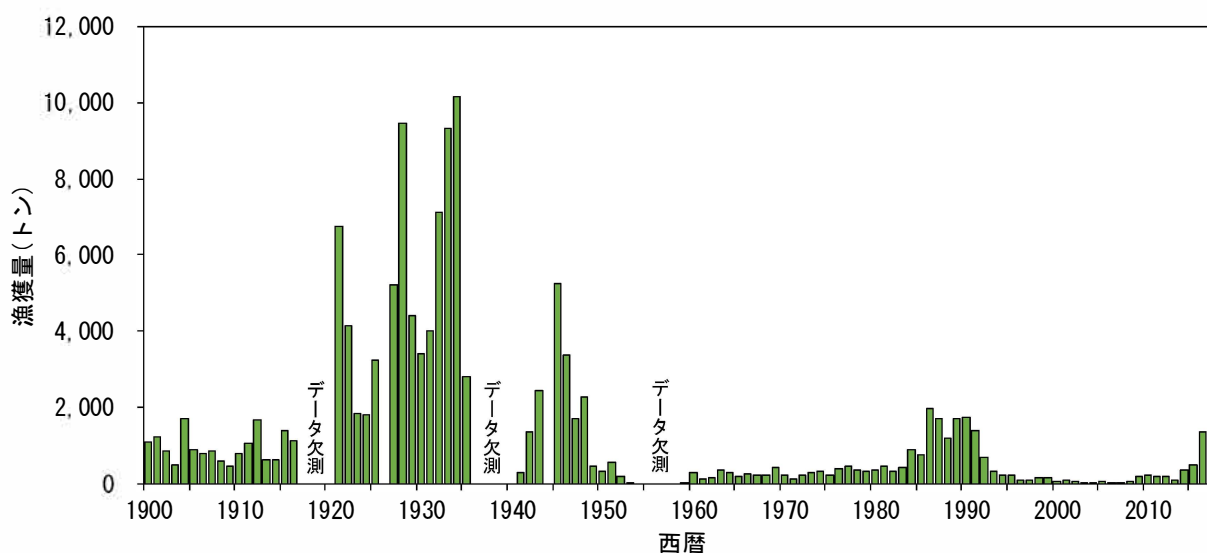


Fig. 1 陸奥湾におけるマダラ漁獲量（1917–1920年，1926年，1936–1940年，1944年，1954–1958年はデータ欠測期間）

マダラの移動については、東北太平洋海域において調査船が行った着底トロール調査による分布の経年変化から、北海道等の他海域への回遊は行わないと考えられ、深浅移動を主とし、水平的な移動、回遊範囲は狭いとされている（北川ほか 2002；服部ほか 2004；成松 2006）。一方で、1980年代に陸奥湾産卵群を対象に行われた標識放流調査により、陸奥湾で産卵を終えたマダラの中に道東太平洋海域まで回遊する個体が確認された事が報告されており（福田ら 1985）、系群あるいは個体レベルで大きく異なる移動様式を持つ可能性がある。

魚類の移動に関する研究例は多く、本研究でも採用したディスクタグ等の外部標識（福田ら 1985；藤沢・夏目 1995）、種苗生産した仔稚魚耳石への温度標識（浦和 2001；高橋 2006）あるいはテトラサイクリン塩酸塩（Tsukamoto 1985；Nakamura & Sakurai 1991）やアリザリン・コンプレクトン（桑田・塚本 1987, 1989；高橋 1994；友田・桑田 2006）などの蛍光物質標識、尾鰭や胸鰭を切除あるいは抜去（森岡ら 1998；手塚ら 2008）など様々な標識放流手法が用いられ、対象とする魚種や成長段階に合わせて使い分けされている。

近年では水温、水深、照度等を記録する、データロガーあるいはアーカイバルタグと呼ばれる高性能タグを用いた移動履歴の研究も盛んに行われており（山田 1999；中島・新田 2005；竹谷ら 2013；Higuchi ほか 2018）、さらに、筋肉や肝臓といった軟組織中の微量元素の組成や濃度の変化から、近過去の生息海域を推定する手法も確立されている（工藤ら

2015)。また、硬組織では耳石が、骨や鱗に比べて代謝速度が非常に小さく、一度沈着した元素は一生を通じて変化しない（塚本 2010）特性を持つことから、回遊履歴の復元に関する研究に多く用いられる。代表的な元素としてストロンチウム Sr/カルシウム Ca 比が挙げられ、海水-淡水間の通し回遊履歴の推定（大竹 2006；Yamane 2012）や、海水域での水温履歴推定（Townsend ら 1995）に用いられている。

本研究では、第 1 章で約 40 年間という長期間に渡って実施されたディスクタグによる標識放流、第 2 章ではデータロガーおよび耳石中の微量元素による生息海域の移動履歴推定手法を検討し、マダラ陸奥湾産卵群の移動について考察し、第 3 章では年齢形質を用いた年齢査定結果と、年齢別漁獲個体数を基にした資源量推定を行い、マダラ陸奥湾産卵群の資源変動と移動パターンの変化について考察した。

第2部 本論

第1章 マダラ陸奥湾産卵群の分布と回遊

1.1 緒言

マダラ *Gadus macrocephalus* は、北太平洋に分布し、重要な水産資源である。

日本周辺の分布は北海道から、本州日本海側の島根県隠岐周辺まで、太平洋側の茨城県周辺までとされる（三島 1989）。本州北部に位置する青森県陸奥湾は、毎年12月から翌年2月にかけて成熟したマダラが来遊する産卵場となっている（涌坪 1997）。陸奥湾では90%以上のマダラが底建網漁業で漁獲され、漁獲量は、1970-1983年には年間数百トンで推移した後、1984年から増加し、1986年に1,979トンのピークとなった。その後減少に転じ、2000年から2008年まで数十トンの漁獲が続き低迷したが、2009年以降増加に転じ、2016、2017年は1,000トン以上の漁獲となった（青森県 2018；三浦 2018）。陸奥湾に来遊し漁獲されるマダラは陸奥湾産卵群として、2007年以降、資源回復計画の対象となり、操業統数の削減や放卵、放精後親魚の再放流や種苗放流などの施策が行われてきた（水産庁 2007；青森県 2012）。

菅野ら（2001）は、沖合底曳網海域別のマダラ漁獲量の時系列因子分析結果と、脊椎骨数の地域個体群間の変異を基にした系群判断を行い、陸奥湾、津軽海峡に分布するマダラは、襟裳以東海域や青森県以南日本海、および太平洋海域に分布するマダラとは異なる系群であること、陸奥湾を含む北部日本の太平洋海域のマダラは産卵域に隣接する100-400

m の深海域で生活し、産卵期に沿岸域へと来遊して産卵する深浅回遊が主となり、南北回遊を行う個体はごく稀だと結論付けた。

本報告でも手法として用いた標識放流調査は、水産資源として重要な魚種などを対象とし、各所で行われ（森・中村 2001；塩田・北田 1992；伊藤ら 1999 など）、分布、回遊を調べるための有効な手法である。福田ら（1985）は 1979-1983 年に行われた標識放流結果に基づき、マダラ陸奥湾産卵群が北海道松前周辺の他、道東沖まで大きな回遊を行うこと、また、放流翌冬以降に再び陸奥湾へと産卵回帰することを報告している。本研究では、福田ら（1985）の結果に、1989 年以降の標識放流、再捕データを加えたことにより、漁獲量の中長期的変動とマダラ陸奥湾産卵群の分布、回遊の関係について新たな知見を得た。

1.2 材料および方法

マダラ標識放流調査は、Fig.2 に示す青森県むつ市脇野沢と佐井村において、地方独立行政法人青森県産業技術センター水産総合研究所（旧 青森県水産試験場）と漁業協同組合が実施した。放流は 1979-1983 年，1989-1997 年，2008-2017 年の各年 1-2 月に，底建網漁業により漁獲されたマダラを用いて行った。標識放流に供する魚体確保にあたり，通常操業時と比べて低速かつ丁寧に揚網することにより，浮上に伴う急激な減圧による魚体へのダメージを抑えるよう工夫し，さらに減圧による鰾の膨張や胃袋の反転，眼球突出が見られず，放卵または放精後と推測される腹部が萎んだ個体を船上で選別した。それらの全長を 1 cm 単位で測定した後，個体識別番号が刻印された直径 13 mm のディスクタグを固定したビニールチューブを，第一背鰭または第二背鰭基部に貫通させて結びつけ，漁獲地近傍の船上から直ちに放流した。本調査を開始した当初には北海道から，日本海側は富山県，太平洋側は宮城県までの各道県の水産試験研究機関に対して標識放流実施の通知及び再捕報告依頼を文書により行った。また，個体識別番号には「青」，「アオ」，「アオスイ」といった文字を用い，再捕者が青森県の関係機関が実施したことを想定可能なよう配慮した。

再捕報告は主に漁業者より得られ，その際，漁獲年月日，場所，漁業種類，標識番号を，また，可能な場合に再捕魚の全長と体重，あるいはいずれか 1 項目の情報を得た。再捕場所を以下の 7 海域に分類して集計した。A:陸奥湾内（青森県下北半島大間崎と同県津軽半島高野崎を結んだ線以南の海域），B:津軽海峡（北海道渡島半島白神崎と青森県津軽半島竜

飛崎，北海道渡島半島恵山岬と青森県下北半島尻屋崎を結ぶ線に囲まれた海域から A を除いた海域)，C:太平洋襟裳岬以西（恵山岬と尻屋崎を結ぶ線と尻屋崎正東線，北海道襟裳岬正南線に囲まれた海域)，D:太平洋襟裳岬以東（襟裳岬正東線より北側の海域)，E:日本海青森以北（白神崎と竜飛崎を結ぶ線以西と，竜飛崎正西線以北の海域)，F:日本海青森以南（竜飛崎から正西線と青森県と秋田県の県境正西線に囲まれた海域)，G：太平洋尻屋崎以南（尻屋崎正東線以南と岩手県と宮城県の県境正東線以北の海域) (Fig.2)。

放流を実施した延べ 24 年間分の結果のうち，1979-1983 年については福田ら（1985）が報告した結果を引用した。A-G の海域別再捕個体数を，放流年別，再捕月別に整理し，さらに，1979-2017 年の 39 年間を，マダラの漁獲量が 500 トン以下で横ばいに推移した I 期（1979-1983 年），700-1,700 トンと増加傾向を示した II 期（1989-1992 年），急激に減少し，数十-300 トンと低迷した III 期（1993-1997 年）および IV 期（2008-2013 年），そして 400-1,400 トンと再び増加傾向を示した V 期（2014-2017 年）と，漁獲量の変化に応じて区分した。陸奥湾でのマダラの再捕は，後述のように産卵期の終了後 3 ヶ月を経過した 6 月以降，翌産卵期まで少数となる。そこで，放流日より 90 日の間に再捕された個体は産卵後に陸奥湾に滞留していたと仮定し，それ以降の再捕と区別して扱った。

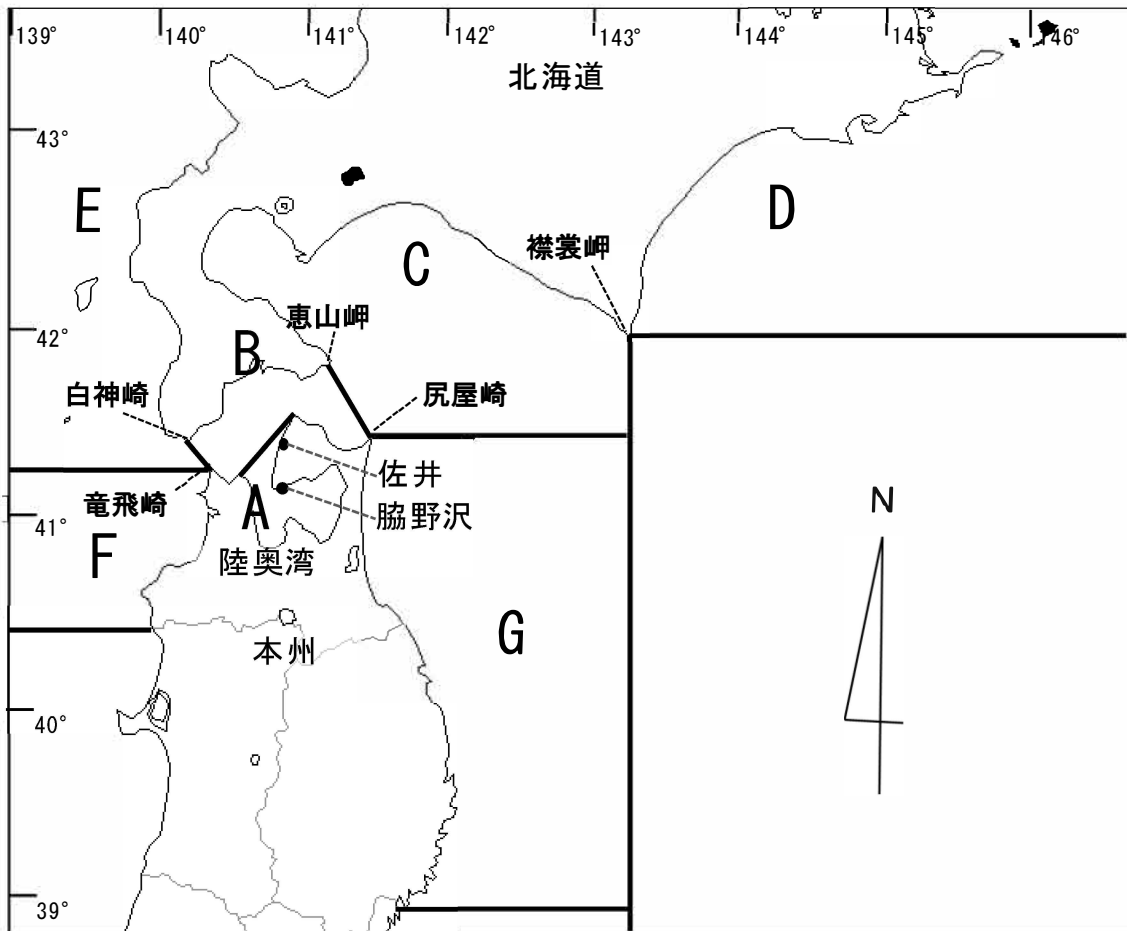


Fig. 2 マダラディスクタグ標識魚の放流海域（佐井，脇野沢）
 および再捕海域の区分
 A：陸奥湾，B：津軽海峡，C：北海道太平洋襟裳以西，
 D：北海道太平洋襟裳以東，E：北海道日本海，
 F：本州日本海，G：本州太平洋

1.3 結果

1.3.1 再捕率と月別再捕数

24年間で全長30-100 cmの3,246個体を放流し、398個体が再捕され、再捕時の全長は40-100 cm、再捕率は12.3%であった（Table 1）。放流年別では、3.6%（1997年）-35.2%（2011年）と大きく変化した。月別の再捕個体数は、2月が124個体と最も多く、3月、1月、12月と続き、それぞれ24年間で93個体、55個体、35個体であった。再捕個体が最も少なかったのは7月、次いで8月であり、それぞれ24年間で2および3個体であった。このように再捕は冬期間に集中し、4月から8月にかけて減少し、9月以降に増加に転じる傾向が見られた。放流から再捕までの期間が最も長かった個体は、1994年2月9日にむつ市脇野沢から全長30 cmで放流され、1998年9月29日に北海道日本海側の松前町沖で再捕された個体であり、体サイズに関する情報は体重のみ記録され8.5 kg、再捕までの日数は1,693日であった。

Table 1. 放流年別マダラ標識放流個体数および再捕個体数, 再捕率

Release year	Number of released fish	Number of recaptured fish	Recapture rate (%)
1979	15	5	33.3
1980	58	11	19.0
1981	60	7	11.7
1982	57	12	21.1
1983	317	30	9.5
1989	371	50	13.5
1990	150	25	16.7
1991	173	17	9.8
1992	344	24	7.0
1993	96	7	7.3
1994	196	13	6.6
1995	70	10	14.3
1996	58	7	12.1
1997	55	2	3.6
2008	33	4	12.1
2009	91	21	23.1
2010	89	20	22.5
2011	88	31	35.2
2012	115	16	13.9
2013	157	21	13.4
2014	167	22	13.2
2015	154	13	8.4
2016	203	17	8.4
2017	129	13	10.1
Total	3,246	398	12.3

1.3.2 放流年別の再捕海域と再捕率

放流年別の再捕個体数は、放流地点でもある A 海域が各年とも最も多く、全海域の総再捕個体数に占める A 海域の再捕割合は、放流後 90 日未満では 23-100%の範囲で平均 55%、放流後に十分 A 海域から他海域に移動できる時間を想定した放流後 90 日以降では 0-64%の範囲で平均 25%、A 海域全体では 41-100%の範囲で平均 60%であり、全体では 310 個体であった。再捕海域別の再捕個体数について、A 海域の放流後 90 日以降および B-G の年代別、海域別の再捕個体数を Fig. 3 に示す。

B 海域では I -III 期にはほとんど再捕されなかったが、IV 期に 3 個体、V 期に 8 個体と最多となり、I 期-V 期の各年代の再捕個体数に占める割合(以後、年代別割合とする)は 4%、2%、0%、8%、22%で、再捕地点はいずれも大間崎よりも東側であった。C 海域では時期によって再捕個体数に偏りが見られ、II 期に 14 個体と最も多く再捕され、III 期に 4 個体と減少し、IV 期、V 期は 7 個体とやや増加し、年代別割合は 18%、22%、17%、19%、19%であった。(Fig. 3)。D 海域は C 海域と同様に II 期に 10 個体と最も多く再捕され、III 期には 3 個体に減少し、IV 期には再捕されなかったが、V 期に 4 個体と再び再捕され、年代別割合は 11%、18%、13%、0%、11%であった。E 海域では北海道松前町から瀬棚町周辺で II 期と IV 期に、7 および 6 個体が再捕された。また、2017 年に積丹半島周辺海域で再捕された 1 個体は、E 海域の中で最も放流地点から離れていた。39 年間を通して F、G 海域での再捕は少なかった。

月別海域別の再捕個体数について、A 海域での再捕は、放流年の 1-6 月及び 12 月以降であり、1-6 月の再捕個体は全て放流から 90 日以内であった。B 海域での再捕は、2-6 月と 12 月以降であり、4 月に 7 個体と最も多かった。C 海域での再捕は、2-6 月、8 月、12 月以降であり、3 月、4 月、11 月にそれぞれ 6 個体、9 個体、6 個体と多かった。D 海域では、5 月に 10 個体、10 月に 4 個体再捕された (Table 2)。再捕個体数が多い海域を月別に見ると、1-9 月には月を経るごとに放流地点から遠く北側の海域へと移動し、10-12 月には放流点に近い海域へ回帰する傾向が見られた。

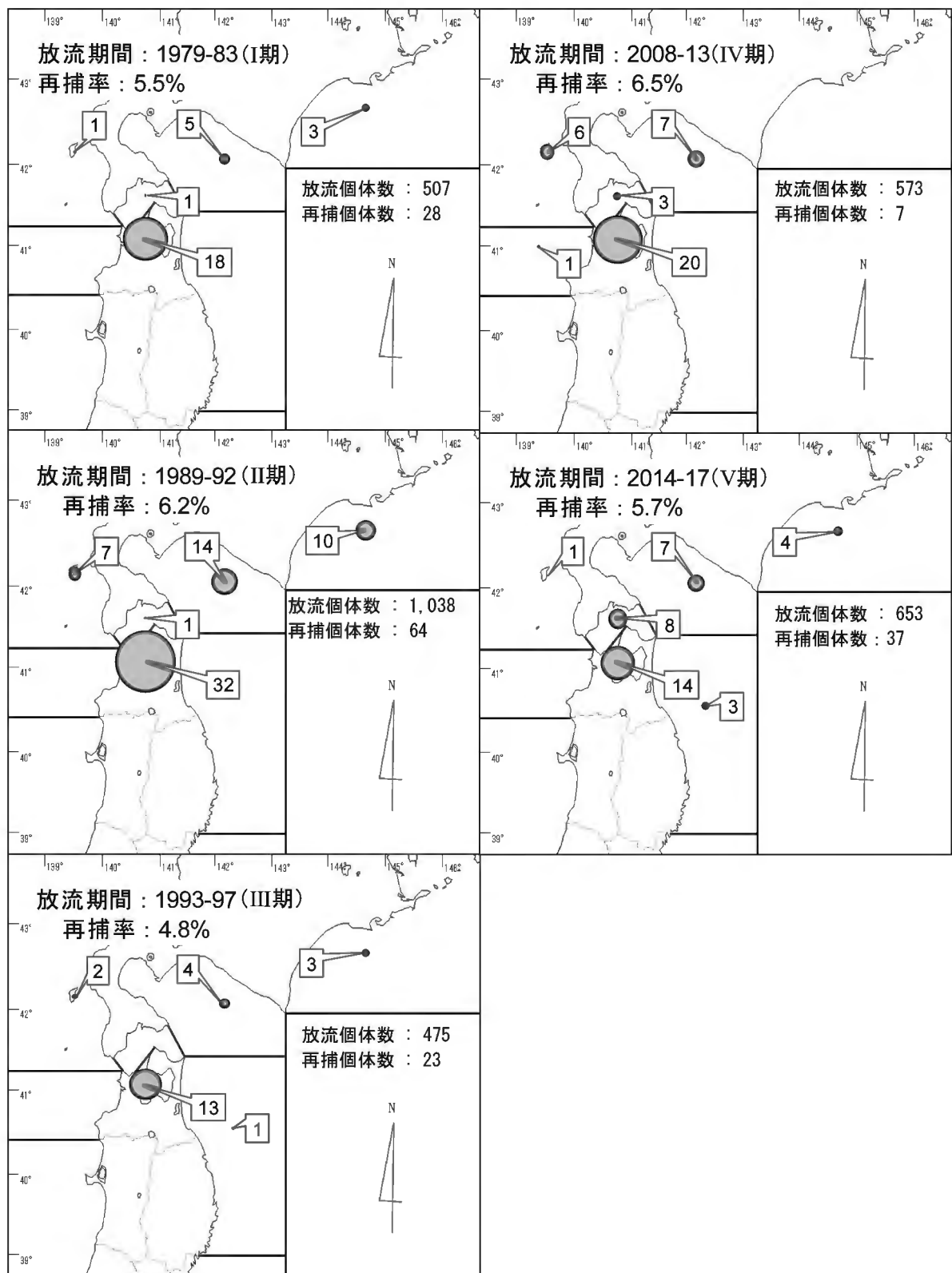


Fig. 3 年代別標識放流個体数および海域別再捕個体数. 年代は左上の1979-1983年から右中段の2014-2017年の5つに区分.

Table 2 再捕月別，再捕海域別マダラディスクタグ標識魚再捕個体数

再捕海域	放流年												放流翌年以降			
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月 以降
A	13	97	79	13	10	1						28	40	22	5	2
B		1	1	7	1	1						1	1			
C		2	6	9	2	4		2			6	1				1
D				2	10	1	1		1	4						1
E				2			1	1	5	2		3		1		2
F			1													
G		1	1	1									1			

網かけは再捕個体数が5個体以上であることを示す。

1.4 考察

マダラを対象とした標識放流として、これまで人工種苗での腹鰭抜去等による標識放流（森岡ら 1998；手塚ら 2008）が実施されているが、日本国内において成魚を対象とした標識放流は青森県陸奥湾口部（福田ら 1985）、木古内湾（藤沢・夏目 1995）の報告のみである。これはマダラ成魚の生息水深が、東北太平洋岸では 100-550 m と比較的深く（北川ら 2002）、漁業による採捕では、浮上時の急激な減圧による鰾の膨張、胃袋の反転、眼球の突出といった障害が発生し、活力の高いマダラの確保が困難なことからである。本研究は、平均水深 34.6 m、最大でも 70 m 程（大谷・寺尾 1974；環境省 2011）の、マダラの生息水深としては浅い陸奥湾において、底建網の揚網を通常操業時と比べて低速かつ丁寧に行うことにより、急激な減圧を抑え、活力の高い健康なマダラを確保したことにより、他海域では困難な親魚の放流を実施することができた貴重な結果といえる。

39 年間の標識放流調査の結果、1-2 月に陸奥湾湾口部に放流された放卵、放精後のマダラの多くは、2-3 月に津軽海峡から襟裳岬以西へ分布を広げ、4-6 月にはさらに襟裳岬以東まで広がり、7-11 月には陸奥湾-津軽海峡に分布せず襟裳岬以西と以東に分布し、12 月から翌年 3 月には再び陸奥湾に回帰することが明らかとなった。また、一部は北海道日本海へ回遊していた。これらの結果は、1979-1983 年の 5 ヶ年間の標識放流の結果をもとに解析した福田ら（1985）の陸奥湾産卵群の分布、回遊とほぼ同様であり、工藤ら（2015）の生体内微量元素分析による 2010 年代の回遊履歴推定結果とも矛盾しない。また、翌年の

産卵期となる 12-2 月の再捕海域は 98 個体中 90 個体が陸奥湾であった。この結果は、マダラの回帰性が非常に強いことを示すものであり、本研究によって初めて確認されたものである。

ここで、分布回遊の規定要因について検討してみた。7-11 月の陸奥湾は、底層水温が成魚の生息適水温の上限 13°C（手塚 2006）を超え 20°Cにも達する（扇田・高坂 2018）ため不適な水温環境となる。一方、12-2 月の陸奥湾は、底層水温が 2-10°C（扇田・高坂 2017）で、成魚の生息適水温の範囲内であり、卵発生の好適水温 2-8°C（桜井・山本 2009）となる。以上の結果と既往知見から、マダラ陸奥湾産卵群は、夏秋期には不適な水温環境となる陸奥湾を避け、好適水温環境となる道東海域等へ索餌回遊し、冬期には好適水温環境となる陸奥湾へ強い回帰性をもって産卵回遊すると推定された。

年代別の再捕海域をみると、陸奥湾の漁獲量が低調であった I, III, IV 期は、II, V 期に比べて道東海域での再捕が極めて少なかった。この期間の道東海域でのマダラの漁獲量が年間 1 万トンを超え、安定していたこと（水産庁 2018a）を考えると、生息に不適な環境でもなければ、再捕機会の極端な低下といった道東海域の環境要因ではないことが推察される。一方で、陸奥湾の漁獲量を資源豊度に比例するとみなすと、陸奥湾産卵群の資源豊度が低い場合は、分布が狭まり、道東海域まで広がらないことが考えられる。このような資源の増減に伴う分布、回遊範囲の拡大、縮小はイワシ類やマサバなど多獲性浮魚類で広く知られている（Lluch-Belda et al. 1989；水産庁 2018d, e）。本研究の結果から、マダラ陸

奥湾産卵群においてもマイワシ、マサバと同様に資源増大に伴い分布域を拡大する可能性が考えられた。しかし、本研究では、資源豊度と道東海域での再捕率との間に相関関係を見出すことが出来なかったことから、今後は、資源豊度と分布範囲との関係を明らかにする必要がある。

第2章 データロガーおよび耳石微量元素によるマダラ

陸奥湾産卵群の移動履歴推定手法の検討

2.1 目的

マダラの産卵場である青森県陸奥湾は、夏場の水温は底層でも 20°C を超え（青森水総研 2018）、マダラの生息適水温である 13–14°C（手塚 2006）をはるかに上回る。また、陸奥湾は湾口部で津軽海峡に接し、その先で太平洋、日本海、すなわちマダラ太平洋系群、マダラ日本海系群の分布海域と繋がっている。マダラ陸奥湾産卵群は産卵後、両海域へと移動することが明らかになっており（福田ら 1985）、2つの系群とも分布域が重複する。

漁獲量が長期的に大きく変動するマダラ陸奥湾産卵群の資源管理を検討するためには、資源状態や漁獲実態を正確に把握し、資源の維持、あるいは増大といった目的を達成するための数量、サイズや漁期、漁具等の規制、親魚保護など様々な手法の決定と同時に、分布、回遊範囲を明確にし、管理対象とする海域の範囲を決定する必要がある。

第1章で述べたディスクタグによる標識放流は、比較的容易かつ低コストに多くの個体を対象とした調査実施が可能である反面、再捕結果から得られる情報は、放流地点と再捕地点の2点を結び付ける地理的情報と、放流時と再捕時の間の成長情報のみであり、その間の移動経路や水深、水温といった履歴情報を得ることはできない。第2章では個体ごとの採捕までの移動履歴を、時系列に沿って明らかにすることを目的として、水温、水深を一定間隔で記録可能なデータロガーを用いた放流から再捕までの生息水深、経験水温の解

析や、耳石中の微量元素組成を用いた発生から採捕までの生息海域の判別手法の検討を行った。

2.2 材料および方法

2.2.1 データロガー標識放流

データロガー標識放流には、2011年2月に青森県むつ市脇野沢地区で活魚として水揚げされたマダラを用いた。水揚げされたマダラ50個体程度を陸上水槽で畜養し、その中から活力の高い個体25個体を選抜し、データロガーを第一背鰭基部にビニールチューブで結着した (Fig.4)。

データロガーはLAT-1100 (Lotek Wireless Inc.) を用い、水温、水深を1時間ごとに記録するよう設定した。なお、LAT-1100は外寸で32mm×15mm×6mm、空中重量で約5gと、選抜したマダラの平均全長65.8cm、平均体重3.1kgに対して十分小さく、標識結着による負荷、影響は極めて少ないものと判断した。標識魚はデータロガー装着後、20日以上陸上水槽で、必要に応じてイカナゴ類やイワシ類を給餌しながら馴致させた後、活力低下や異常行動が認められないことを確認した上で、2011年3月15日および22日に陸奥湾内の脇野沢沖水深50m地点から放流した (Fig.5)。

また、地方独立行政法人青森県産業技術センター水産総合研究所が陸奥湾内に設置する3つの海況観測ブイ (Fig.5) の1m、15m、30m、底層の層別水温データ (青森水総研 2018) を収集、整理した。

再捕個体から得られた生息水深および水深別の経験水温と、海況観測ブイの各水深の水温を比較し、陸奥湾外への移出時期を検討した。湾外への移出の判断は、生息水深が陸奥

湾の最大水深である 75m（環境省 2011）以深に達した時点とした。なお、陸上水槽から放流地点までの移送によるストレス等が放流直後の行動に影響を及ぼすことが懸念されたことから、再捕データのうち、放流から 3 日間分を解析から除外した。

生息水深を 50 m 毎、経験水温は 2 °C 毎に整理し、放流から再捕までの期間を、陸奥湾外への移出前後で区分し、移出前後の各期間における生息水深および経験水温の選択割合を求め、マダラ陸奥湾産卵群の生息環境を考察した。また、1 時間あたりの生息水深の変化を時間帯別に整理し、日周期的な鉛直方向の移動を評価した。



Fig. 4 データロガーLAT1100 を結着したマダラ

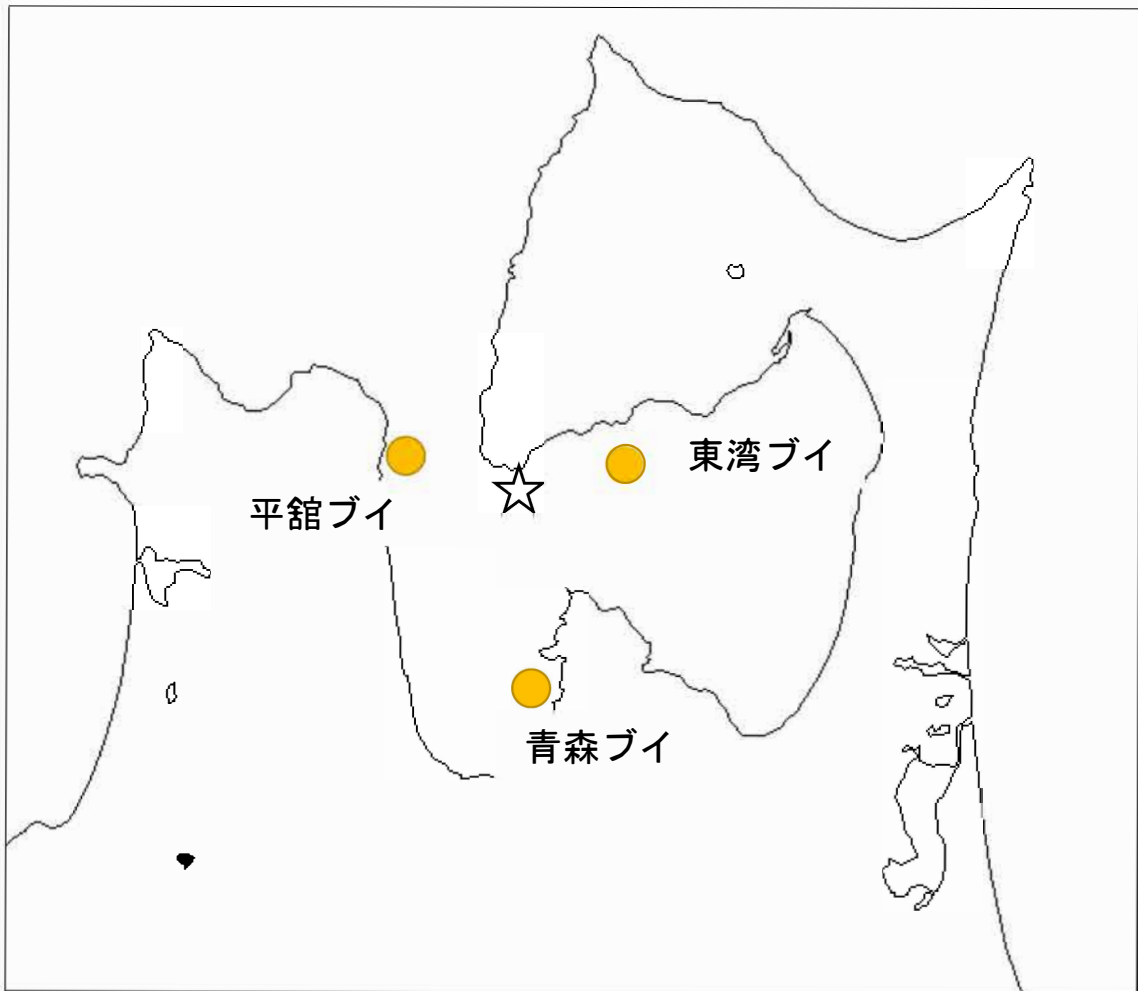


Fig. 5 データロガー標識魚の放流場所 (☆) および陸奥湾内の水温観測ブイ設置位置.

2.2.2 耳石微量元素分析

耳石は、耳石核の表面にカルシウムをはじめとする元素が耳石核を中心とする同心円状に沈着することで成長する組織で、一度沈着した元素は一生を通じて変化しない（塚本 2010）。従って耳石表面（分析試料とした薄片上では縁辺部(後述)）は直近に生息した海域、すなわち各個体が採捕された海域と同海域を反映して沈着した部分であると判断できることから、耳石表面の分析結果を採捕海域の指標データとして用いた。分析には扁平石を用い（以後、耳石=扁平石とする）、Fig.6 に示す各海域で 2013-2014 年に採捕したマダラ成魚 27 個体から採取した。採取した耳石は蒸留水で洗浄、自然乾燥した後、原則として右の耳石をエポキシ樹脂 Specifix-20kit（丸本ストルアス社）に包埋した。包埋した耳石は、硬組織精密切断機（Leica 社、ゼーゲミクロトーム Leica SP1600）を用いて耳石核を通るよう短軸方向、厚さ 0.20-0.25 mm に切断し、得られた薄片をスライドガラスに接着剤で固定した。次に述べる微量元素分析前には、試料表面の不純物を完全に除去するため、エタノールによる超音波洗浄を行った。

微量元素の分析は、国立大学法人東京大学大気海洋研究所が所有するレーザーアブレーション装置（LA; Elemental Scientific Lasers 社、NWR193）および誘導結合プラズマ質量分析装置（以後 ICP-MS; Agilent 社、7700 series ICP-MS）を用いて行った（以後、両者を合わせて LA-ICP-MS とする）。分析点は直径 0.1 mm の円型とし、耳石核から縁辺方向に 0.1 mm 間隔で隙間なく分析点を設定した（Fig.7）。各分析点でレーザーを 30 秒間照射し、放出され

た構成物質を ICP-MS で分析した。

分析対象とした元素は、リチウム ${}^7\text{Li}$ 、ホウ素 ${}^{11}\text{B}$ 、ナトリウム ${}^{23}\text{Na}$ 、マグネシウム ${}^{24}\text{Mg}$ および ${}^{25}\text{Mg}$ 、アルミニウム ${}^{27}\text{Al}$ 、カリウム ${}^{39}\text{K}$ 、カルシウム ${}^{43}\text{Ca}$ および ${}^{44}\text{Ca}$ 、マンガン ${}^{55}\text{Mn}$ 、鉄 ${}^{56}\text{Fe}$ 、コバルト ${}^{59}\text{Co}$ 、ニッケル ${}^{60}\text{Ni}$ 、銅 ${}^{63}\text{Cu}$ 、亜鉛 ${}^{66}\text{Zn}$ 、セレン ${}^{82}\text{Se}$ 、ルビジウム ${}^{85}\text{Rb}$ 、ストロンチウム ${}^{87}\text{Sr}$ および ${}^{88}\text{Sr}$ 、イットリウム ${}^{89}\text{Y}$ 、カドミウム ${}^{111}\text{Cd}$ 、バリウム ${}^{137}\text{Ba}$ および ${}^{138}\text{Ba}$ 、ネオジム ${}^{146}\text{Nd}$ 、鉛 ${}^{206}\text{Pb}$ および ${}^{207}\text{Pb}$ および ${}^{208}\text{Pb}$ 、ウラン ${}^{238}\text{U}$ の 28 種で、定量結果を ${}^{43}\text{Ca}$ 比に換算した。このうち、すべての個体から検出された元素を選抜し、うち 2-3 元素を組み合わせて主成分分析を行い、生息海域を判別する指標となる元素を探索した。判別対象とした海域は日本海および太平洋で、この 2 海域のどちらに生息していたかを判別可能な元素を変数とし、正準判別分析を行った。なお、主成分分析、正準判別分析共に統計解析ソフト R version 3.3.3 を用いて行った。

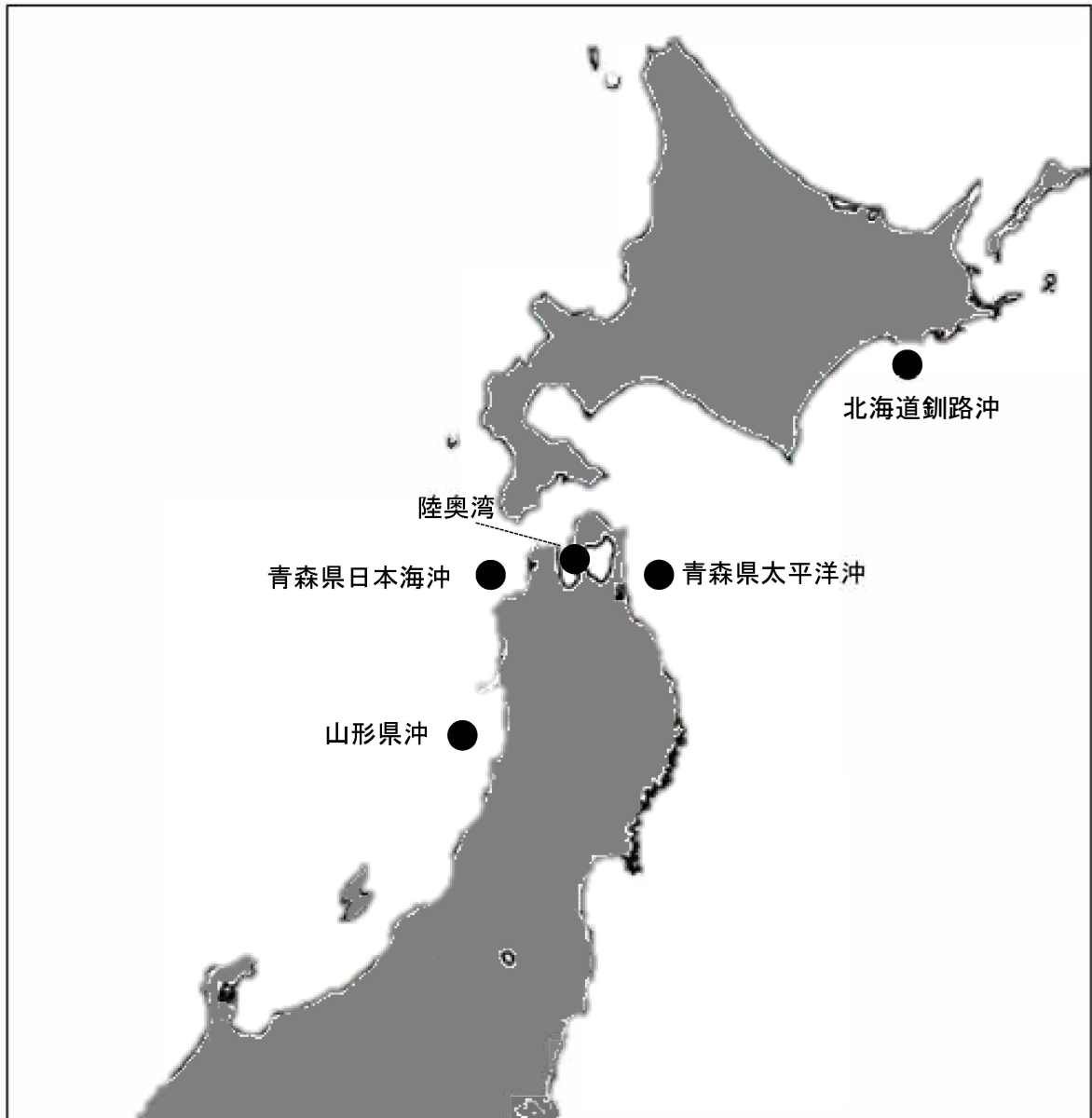


Fig. 6 耳石微量元素分析に供したマダラの採集地点 (●). 図中左から順に山形県沖, 青森県日本海沖, 陸奥湾, 青森県太平洋沖, 北海道釧路沖



Fig.7 LA-ICP-MS による分析後の試料表面（耳石上の連続した円はレーザー照射痕．図中左上の耳石核から右下の縁辺部に向かって連続的に分析点を設定した）

2.3 結果

2.3.1 データロガー標識放流

放流した 25 個体のうち、2011 年 9 月 25 日までに 7 個体が再捕され (Table 3), 再捕率は 28 %であった。再捕までの期間は 26–188 日間で、再捕海域の内訳は放流地点近傍の陸奥湾口部で 3 個体、津軽海峡の太平洋側、同日本海側でそれぞれ 2 個体であった (Fig.8)。

このうち、放流から 50 日後に陸奥湾口部の平館沖で再捕された個体 3 は、放流 3 日後から 50 日後までの 47 日間、生息水深が約 35 m で一定していた。この個体はロガーの記録が示したのと同じ水深 35m に設置された底建網で再捕されたことから、放流 3 日後に再捕漁具となった底建網に入網し、再捕までの期間、脱出できずに留まったと考えられたため、解析から除外し、残りの 6 個体について陸奥湾外への移出時期の推定、水深、水温の選択状況を解析した。

Table 3 データロガー標識再捕個体一覧

個体番号	放流年月日	放流場所	放流時 TL, W	再捕年月日	再捕海域	漁法	再捕時 TL, W	再捕までの日数
1	2011.3.15	脇野沢 鯛島沖	65cm 2.7kg	2011.4.11	大間崎 東北東	一本釣	68cm 2.7kg	26
2	2011.3.15		66cm 3.5kg	2011.4.12	平館沖	底建網	69cm 3.5kg	27
3	2011.3.15		70cm 3.1kg	2011.5.5	平館沖	底建網	75cm 3.0kg	50
4	2011.3.15		60cm 2.3kg	2011.5.26	佐井 長後沖	刺網	—cm 2.0kg	71
5	2011.3.15		68cm 3.1kg	2011.6.16	函館市 日浦沖	一本釣	75cm 3.2kg	93
6	2011.3.15		67cm 3.6kg	2011.9.19	松前町 札前沖	一本釣	77cm 3.4kg	188
7	2011.3.22		72cm 4.0kg	2011.9.25	松前町 清部沖	一本釣	85cm 4.3kg	187

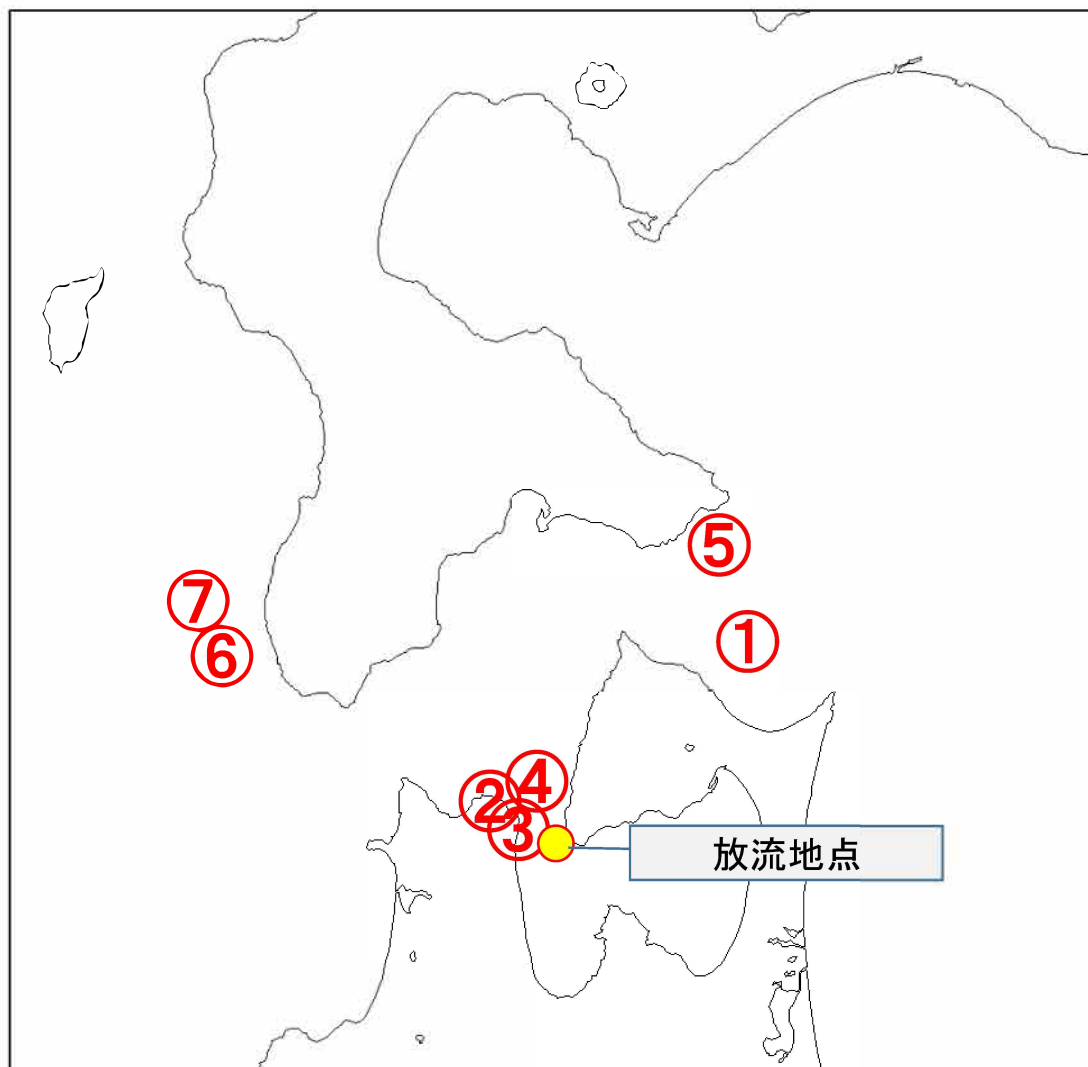


Fig.8 データロガー標識再捕個体の再捕位置. 図中の数値は Table 3 の個体番号に対応

個体3を除く6個体から得られた生息水深の範囲は19–453 m, 経験水温の範囲は2.3–11.0 °Cの範囲であった (Fig.9-1, 2)。陸奥湾外で再捕された個体1, 5, 6, 7の4個体が陸奥湾外へ移動した時期はそれぞれ, 個体1が2011年4月2日, 個体5が同年3月18日, 個体6が同年3月末, 個体7が同年5月14日と推定され, 最も早く湾外へと移出した個体5と最も遅かった個体7では57日間の開きがあった。3月18日の湾内各地, 各水深の水温は, 平館ブイで4.9–7.9°C, 青森ブイ3.9–4.9°C, 東湾ブイで2.7–3.1°C, 5月14日にはそれぞれ9.1–9.9°C, 8.2–9.6°C, 6.4–8.9°Cであった (Fig.10)。

陸奥湾外へと移動してから再捕されるまでの期間が30日以上となった個体5, 6, 7では, 生息水深, 経験水温の急激な上昇, 下降が見られた。1時間あたりに最も大きく変動したのは個体5で, 生息水深が190m下降, 経験水温は6°Cの上昇がであった。また, 急激な変化は水温のみで生じる場合と, 水深・水温共に大きく変化する場合の両方が見られた。

生息水深の選択割合は, 水深の浅い陸奥湾内では個体間で大きな差は見られなかったが, 湾外へと移出した後は, 300m以浅を主体に分布していた。300m以深は個体5, 6が利用していたが, その割合はそれぞれ1%および15%と小さかった (Fig.11)。

経験水温は陸奥湾内外いずれにおいても10°C未満であった。湾外で再捕された4個体について, 湾内, 湾外それぞれで最も高い割合, すなわち長時間選択した水温は, 個体1は4–6°Cおよび6–8°C, 個体5は6–8°Cおよび2–4°C, 個体6は2–4°Cおよび6–8°C, 個体7は

2-4°Cおよび 4-6°Cであった (Fig.12)。

鉛直方向への移動距離を時間帯別に見ると、ほとんどの個体で 1-4 時および 17-18 時にピークが見られ、相対的に日中の時間帯の鉛直移動が少なく、最も移動距離の長かった時間帯は最も短かった時間帯の 2.7-5.5 倍の距離であった (Fig.13-1, 13-2)。

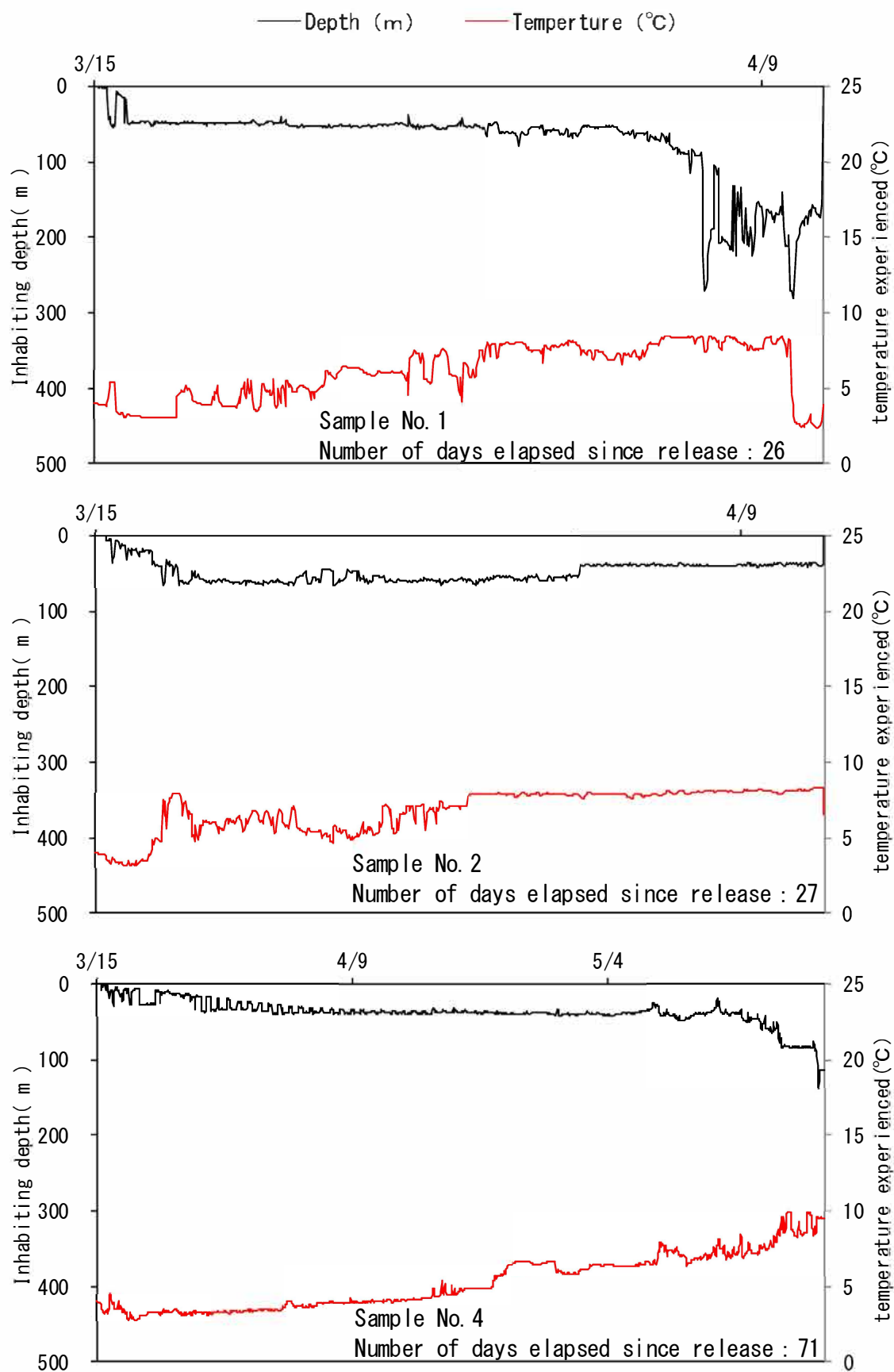


Fig.9-1 データロガー標識再捕魚の生息水深, 経験水温履歴

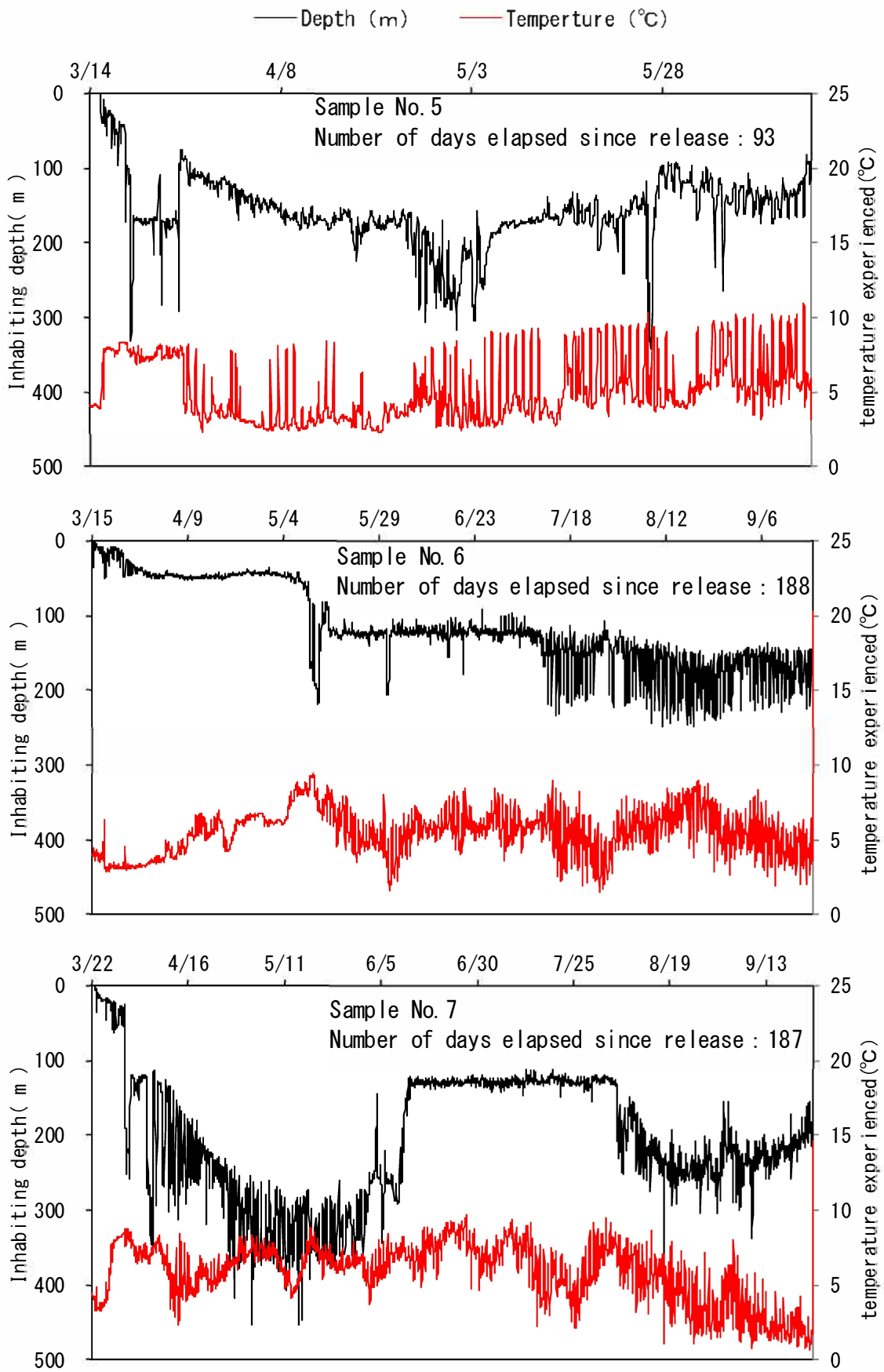


Fig.9-2 データロガー標識再捕魚の生息水深，経験水温履歴つづき

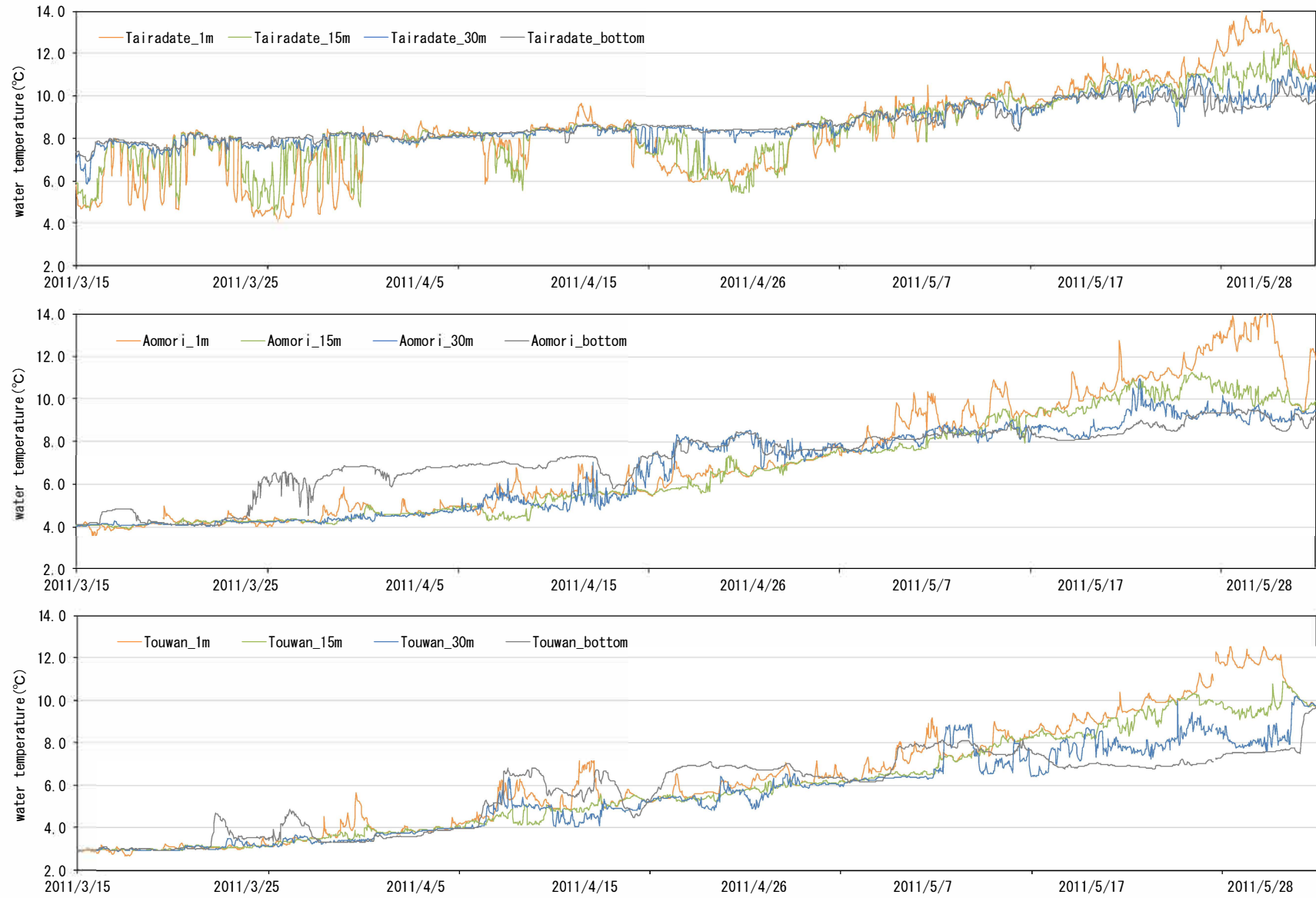


Fig.10 平館ブイ，青森ブイ，東湾ブイの層別水温

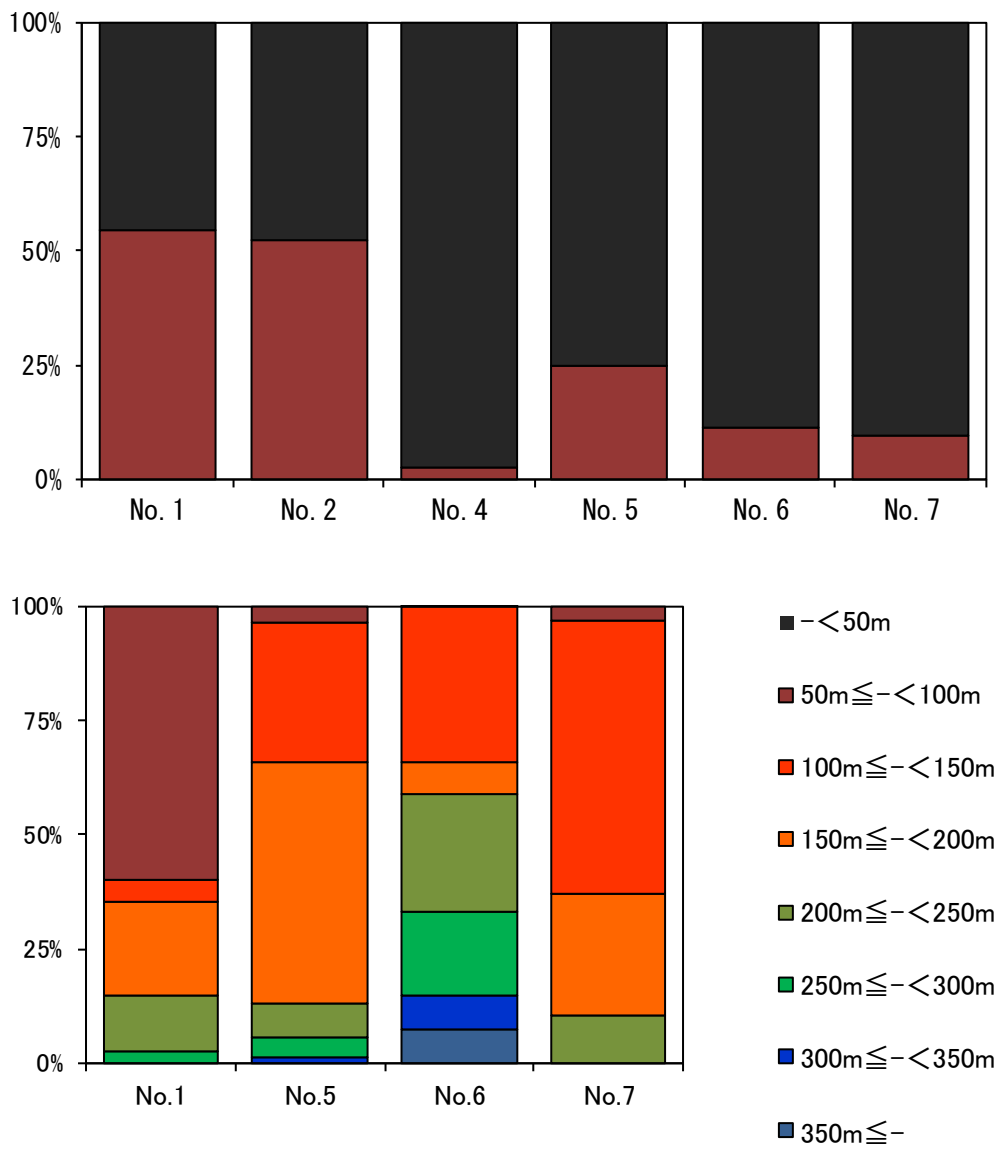


Fig.11 データロガー標識再捕魚の陸奥湾外への移出前（上段）および移出後（下段）の生息水深の選択割合

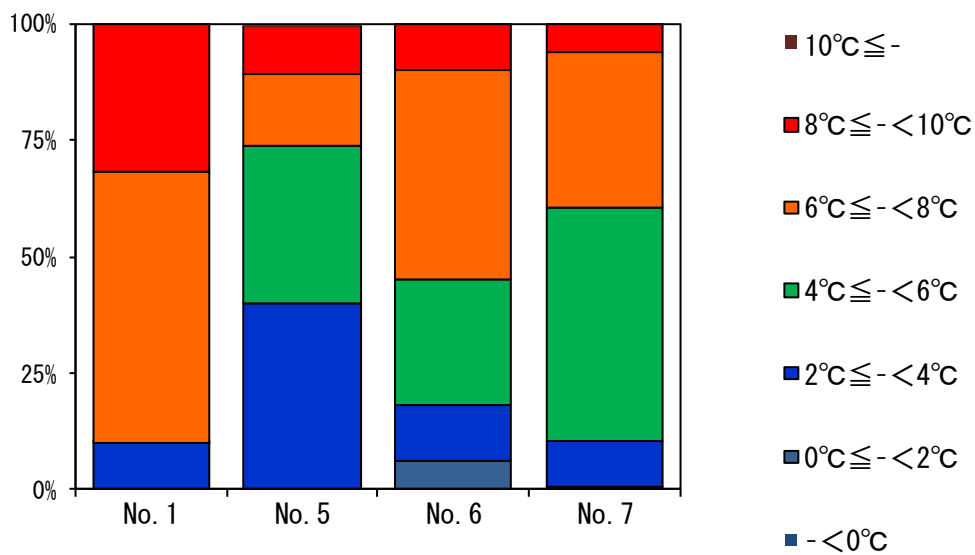
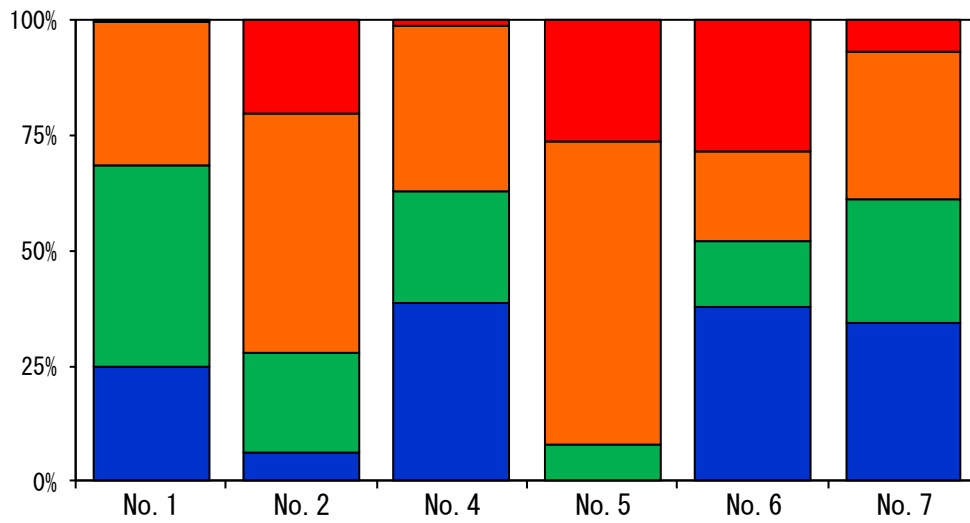


Fig.12 データロガー標識再捕魚の陸奥湾外への移出前（上段）および移出後（下段）の経験水温の選択割合

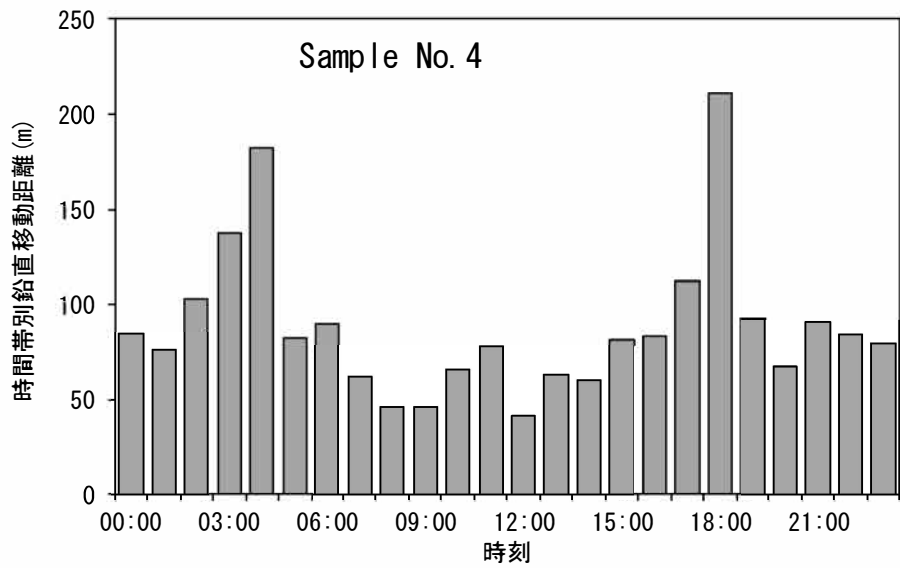
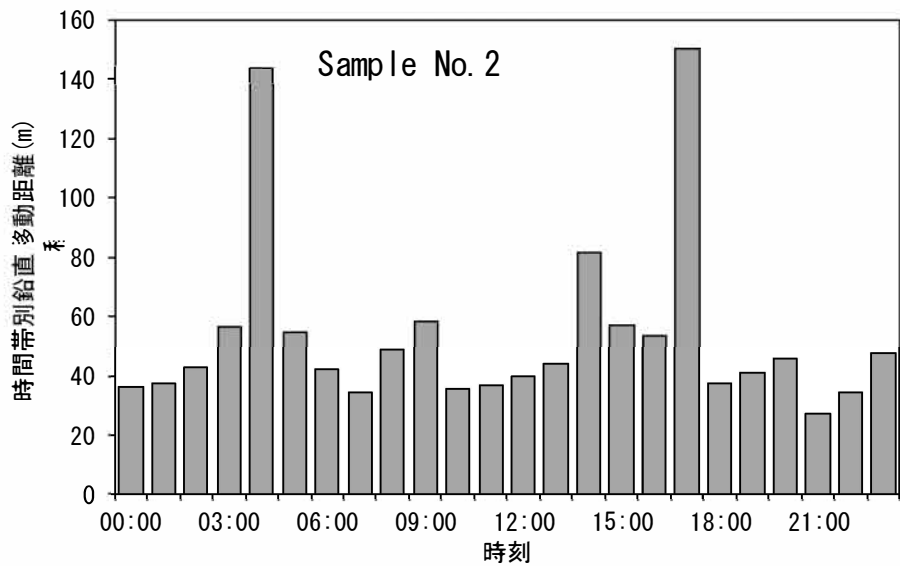
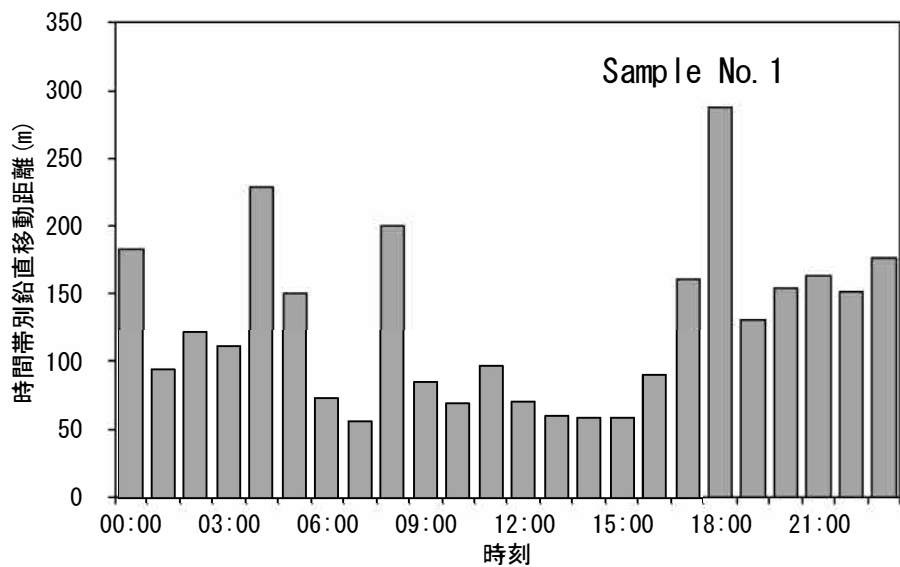


Fig.13-1 データロガー標識再捕魚の時間帯別鉛直移動距離

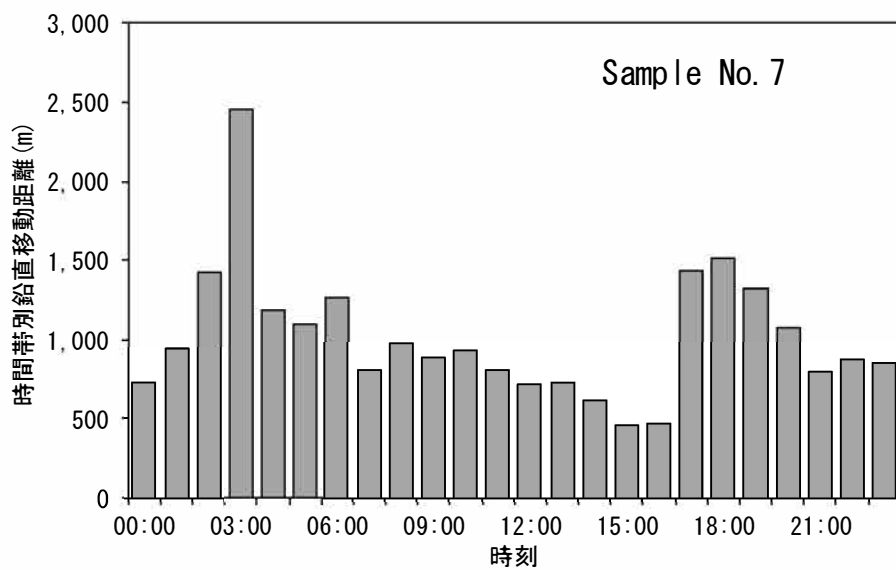
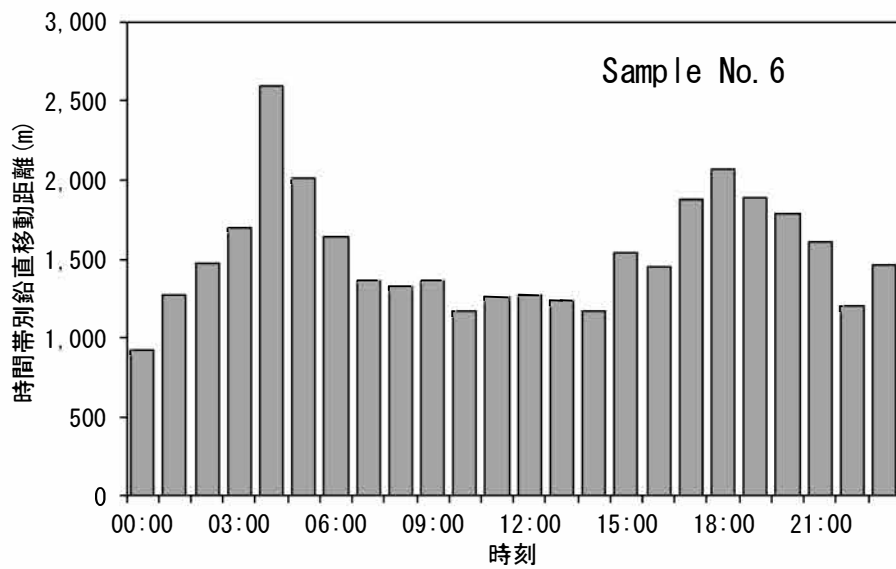
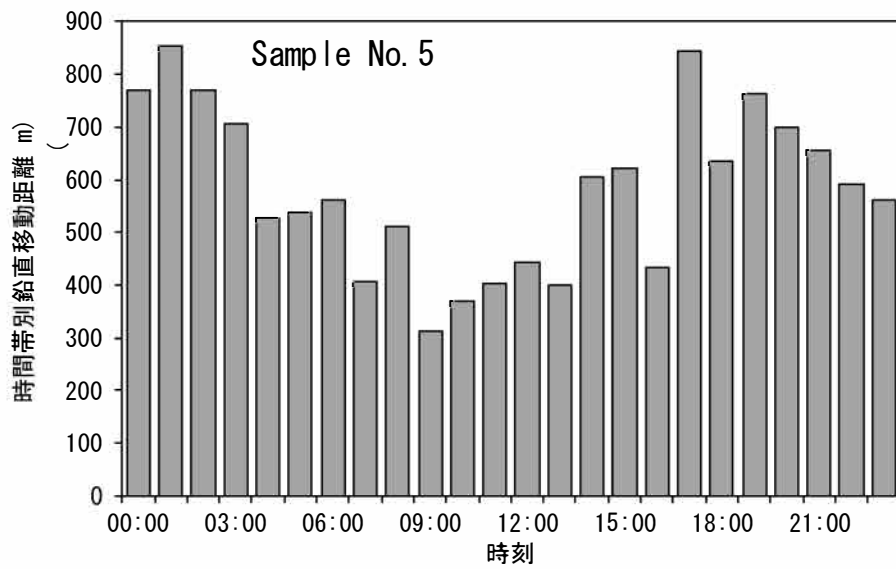


Fig.13-2 データロガー標識再捕魚の時間帯別鉛直移動距離つづき

2.3.2 耳石微量元素分析

分析対象とした28種のうち、耳石の主成分であるカルシウム⁴³Caおよび⁴⁴Ca以外では、ホウ素¹¹B、ナトリウム²³Na、マグネシウム²⁴Mg、カリウム³⁹K、マンガン⁵⁵Mn、亜鉛⁶⁶Zn、ストロンチウム⁸⁸Sr、バリウム¹³⁸Baの8元素を対象に主成分分析を行った結果、ホウ素¹¹B、ストロンチウム⁸⁸Sr、バリウム¹³⁸Baの3元素を用いることにより、日本海と太平洋を区別できると判断された。陸奥湾で採捕された個体は日本海、太平洋いずれとも分離されなかった（Fig.14-1）ことから、採捕地点が日本海および太平洋の個体のみを用い（Fig.14-2）、前述の3元素を判別分析の変数として使用した。

ホウ素¹¹B、ストロンチウム⁸⁸Sr、バリウム¹³⁸Baの3元素を変数とした判別モデルを構築し、日本海産、太平洋産の全27個体の耳石縁辺部を判別したところ、25個体で生息海域は正しく判別され、太平洋産の2個体が日本海と誤判別され、正解率は92.6%であった（Table 4）。

構築した判別モデルに耳石核から縁辺までの各分析点の結果をあてはめたところ、ほとんどの個体で日本海と太平洋を行き来していると判別されたが、全体的に海域間の移動頻度が高く、また、確率0.5付近の中間的な判別結果が散見された（Fig.15-1,2,3）。

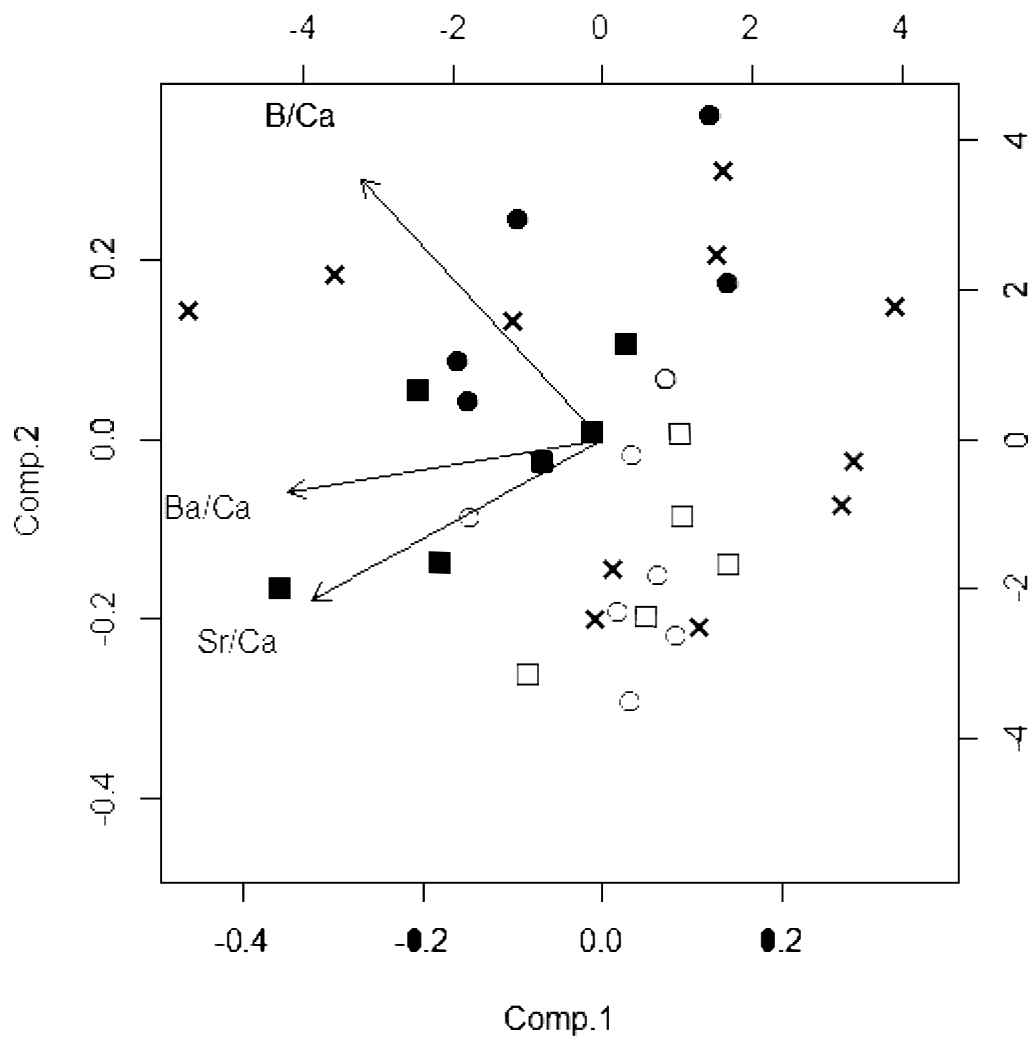


Fig.14-1 日本海，太平洋，陸奥湾で採捕したマダラの耳石縁辺部分析点の主成分分析結果. 変数は B/Ca 比, Ba/Ca 比, Sr/Ca 比を使用. 図中のシンボルは採捕海域, 地点を表し, 白抜きは日本海で□は山形沖, ○は青森県日本海沖, 塗りつぶしは太平洋で■は釧路沖, ●は青森県太平洋沖, ×は陸奥湾

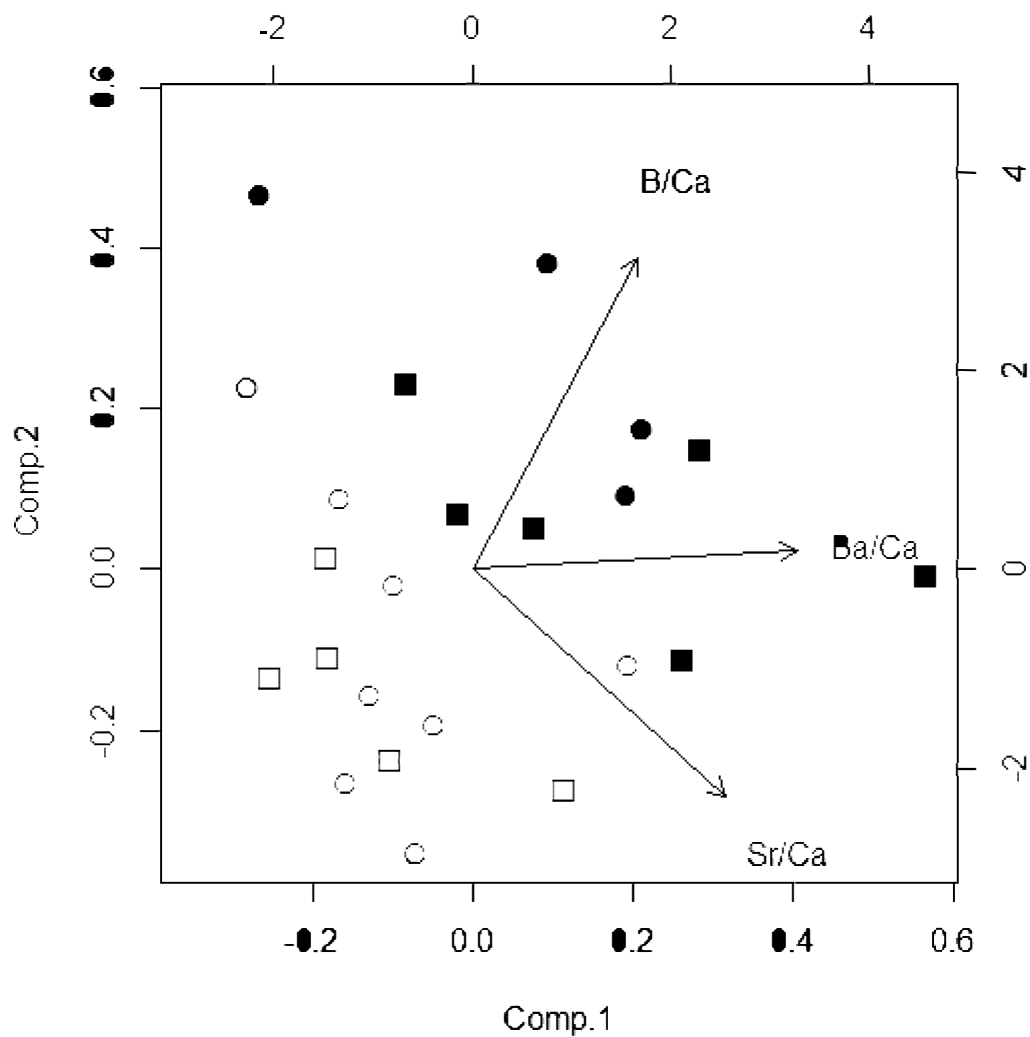


Fig.14-2 日本海，太平洋で採捕したマダラの耳石縁辺部分析点の主成分分析結果. 変数は B/Ca 比, Ba/Ca 比, Sr/Ca 比を使用. 図中のシンボルは採捕海域, 地点を表し, 白抜きは日本海で□は山形沖, ○は青森県日本海沖, 塗りつぶしは太平洋で■は釧路沖, ●は青森県太平洋沖

Table 4 日本海及び太平洋海域で採捕したマダラ耳石縁辺部の海域判別結果

No	採捕年月日	採捕地点	採捕海域	全長(mm)	日本海確率	太平洋確率	判別結果
1	2014/2/24	日本海	山形沖	770	0.740	0.260	日本海
2	2014/3/13	日本海	山形沖	684	0.787	0.213	日本海
3	2014/3/17	日本海	山形沖	720	0.970	0.030	日本海
4	2014/3/26	日本海	山形沖	767	0.600	0.400	日本海
5	2014/3/28	日本海	山形沖	784	0.913	0.087	日本海
6	2014/2/14	日本海	青森日本海沖	690	0.760	0.240	日本海
7	2014/2/14	日本海	青森日本海沖	710	0.920	0.080	日本海
8	2014/2/14	日本海	青森日本海沖	694	0.984	0.016	日本海
9	2014/2/14	日本海	青森日本海沖	636	0.992	0.008	日本海
10	2013/7/23	日本海	青森日本海沖	550	0.687	0.313	日本海
11	2013/7/23	日本海	青森日本海沖	580	0.972	0.028	日本海
12	2013/7/4	日本海	青森日本海沖	550	0.880	0.120	日本海
13	2013/7/4	日本海	青森日本海沖	560	0.929	0.071	日本海
14	2013/6/3	太平洋	太平洋青森沖	570	0.245	0.755	太平洋
15	2013/6/3	太平洋	太平洋青森沖	610	0.013	0.987	太平洋
16	2013/6/1	太平洋	太平洋青森沖	600	0.058	0.942	太平洋
17	2013/6/3	太平洋	太平洋青森沖	640	0.341	0.659	太平洋
18	2013/6/5	太平洋	太平洋青森沖	600	0.171	0.829	太平洋
19	2013/6/2	太平洋	太平洋青森沖	598	0.670	0.330	日本海
20	2013/5/31	太平洋	太平洋青森沖	721	0.697	0.303	日本海
21	2013/5/31	太平洋	太平洋青森沖	740	0.081	0.919	太平洋
22	2014/11/21	太平洋	道東太平洋沖	870	0.203	0.797	太平洋
23	2014/11/21	太平洋	道東太平洋沖	730	0.000	1.000	太平洋
24	2014/11/21	太平洋	道東太平洋沖	605	0.032	0.968	太平洋
25	2014/11/21	太平洋	道東太平洋沖	655	0.051	0.949	太平洋
26	2014/11/21	太平洋	道東太平洋沖	680	0.009	0.991	太平洋
27	2014/11/21	太平洋	道東太平洋沖	629	0.336	0.664	太平洋

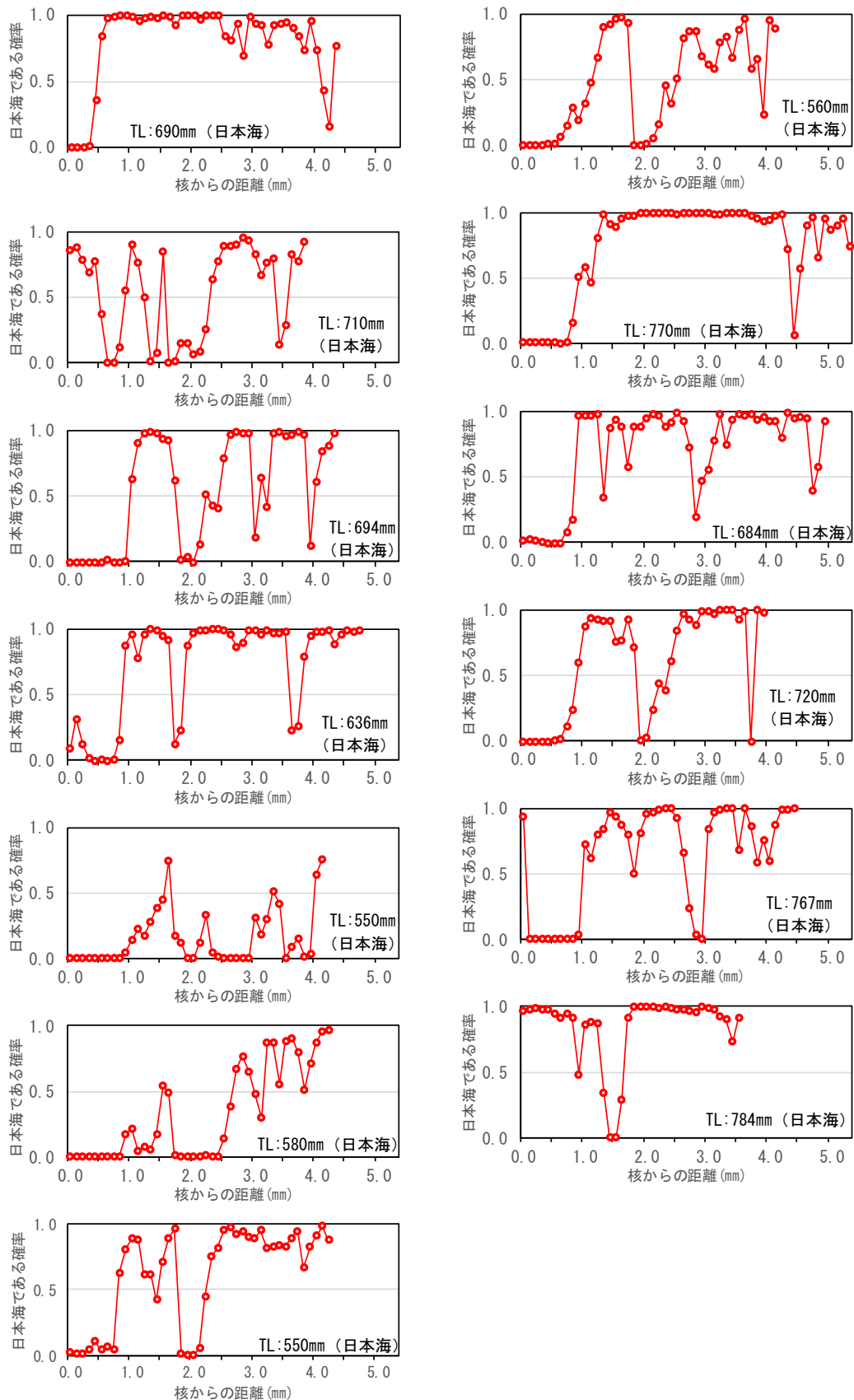


Fig.15-1 日本海で採捕したマダラ耳石の判別分析結果. 縦軸は各分析点部分の耳石形成時の生息海域が日本海であった確率を示す ($0 \leq - < 0.5$: 太平洋, 0.5 : 判別不可, $0.5 < - \leq 1.0$: 日本海).

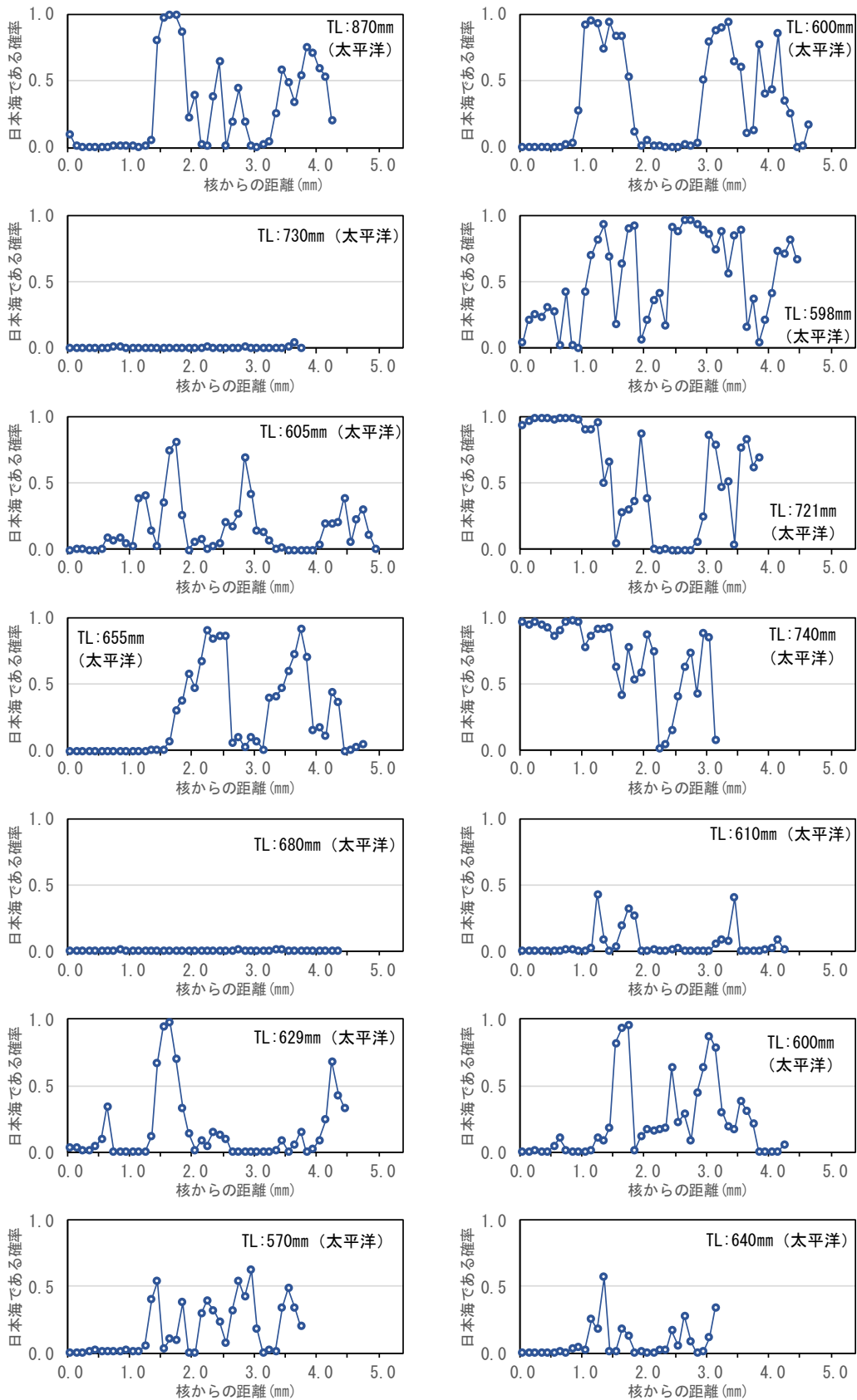


Fig.15-2 太平洋で採捕したマダラ耳石の判別分析結果. 縦軸は各分析点部分の耳石形成時の生息海域が日本海であった確率を示す ($0 \leq - < 0.5$: 太平洋, 0.5 : 判別不可, $0.5 < - \leq 1.0$: 日本海).

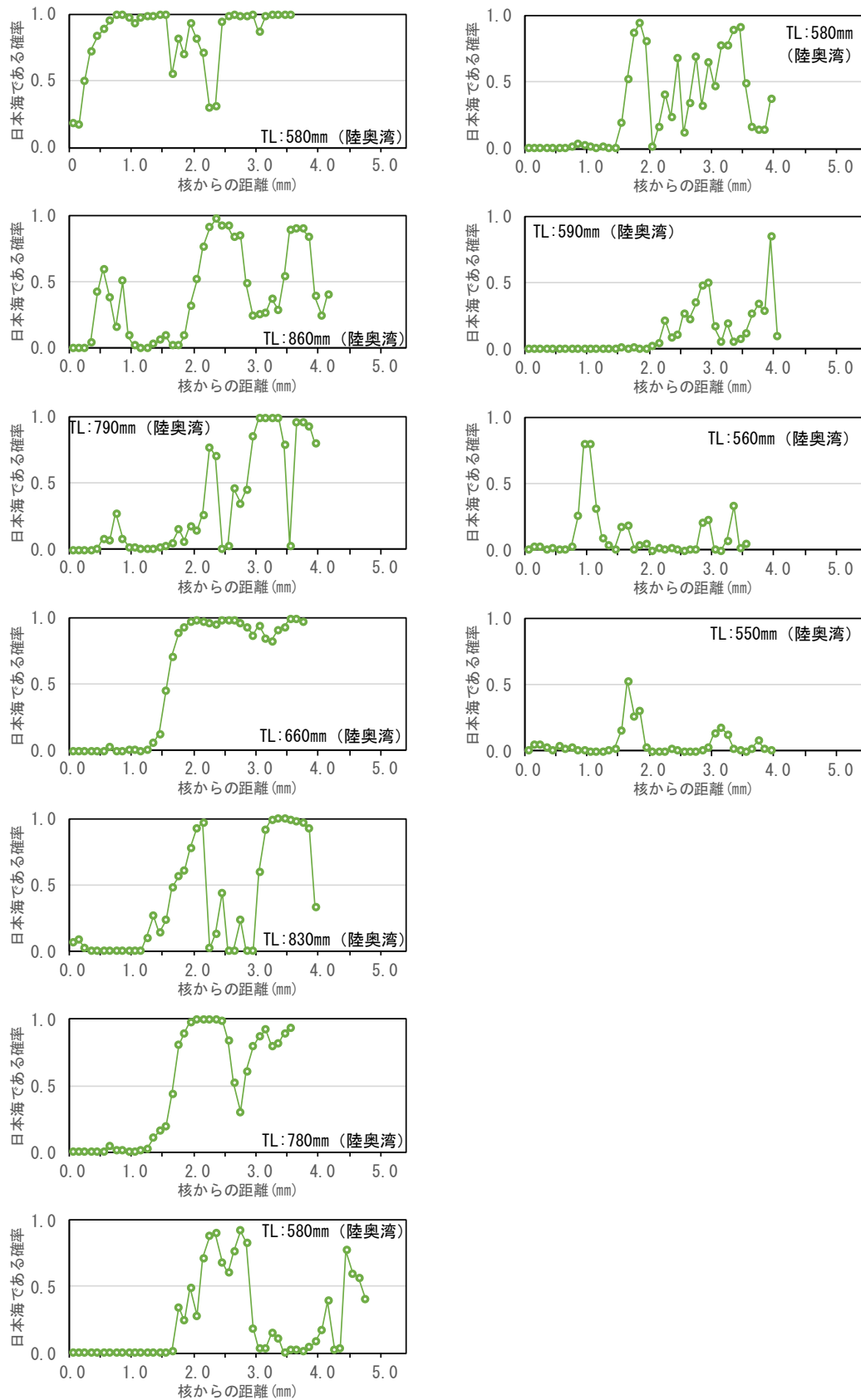


Fig.15-3 陸奥湾で採捕したマダラ耳石の判別分析結果. 縦軸は各分析点部分の耳石形成時の生息海域が日本海であった確率を示す (0 \leq - < 0.5 : 太平洋, 0.5 : 判別不可, 0.5 < - \leq 1.0 : 日本海).

2.4 考察

データロガー標識再捕個体から得たデータにより、マダラ陸奥湾産卵群は放流後、早い個体では3月、遅い個体では5月まで湾内に留まった後に移動することが示された。また、福田ら(1985)や、第1章のディスクタグ標識放流の結果からも、冬から春にかけて陸奥湾及び比較的陸奥湾に近い海域での再捕が続いていたことを合わせると、マダラ陸奥湾産卵群は産卵を終えた後、少なくとも3ヶ月と比較的長期間をかけて徐々に湾外の深場へと移動すると考えられた。

湾外移出後に再捕された4個体のうち、個体3を除く3個体は、湾内の方が湾外よりも低い水温を選択していた。陸奥湾と接する津軽海峡の3-5月の水深100-200mの水温は4.0-9.3°C(佐藤2009)と、陸奥湾内での経験水温と同じ水温帯が存在している。マダラ成魚の生息可能水温は13-14°C(手塚2006)と、マダラ稚仔魚の生息水温の上限である9°C(桜井・山本2007)よりも高いことから、産卵期のマダラ親魚は非産卵期よりも低い、産卵に適した条件を選択するが、成魚にとっての適水温はそれよりも高い水温であると考えられた。

全個体の経験水温は個体5を除いて全て10°C未満であり、最も高水温を経験した個体5であっても、2011年6月15日の13時には最高となる11.0°Cの水温を経験したが、2時間後の15時以降には4.9°Cの水温帯に移動していた(Fig.9-2)。このように10°C以上、あるいはそれに近い比較的高い水温となる時間が、その前後の8°C未満の時間と比べて短時間

であることから、通常の生息環境としては8°C前後が適水温であると考えられた。これは先述したマダラの生息水温の上限よりもかなり低い。

以上より、マダラ陸奥湾産卵群の成魚は、10°Cを超える水温でも生息可能だが、通常時は避けて分布し、8°C前後に適水温があると考えられ、また、産卵期には仔稚魚にとっての適水温に近い環境を選択するため、成魚にとっての適水温よりも低めの水温を選択すると考えられた。

一方、短時間に高い水温を選択するデータが頻繁に記録されており (Fig.9-2)、能動的に高い水温帯へ移動していると考えられた。この移動の理由について確たる情報は無いが、その頻度の多さから、日常的な行動であると推定され、例えば、マダラ陸奥湾産卵群の適水温よりも高い水温帯に良好な餌料環境が整っており、索餌のため短時間だけ移動する、といった行動が考えられた。このような行動を可能にするためには、暖水と冷水が鉛直方向、あるいは水平方向に分布する境界付近に生息することが望ましく、マダラはその境界の冷水側を選択して生息すると考えられた。

LA-ICP-MSによる耳石縁辺部の微量元素分析により、ホウ素、ストロンチウム、バリウムの3元素を指標とした判別モデルを用いることにより、直近の生息海域が日本海、太平洋のいずれであったかを判別することが可能であることが示された。

しかし、この判別モデルを用いて稚魚期、若齢期の生息海域判別を試みたところ、日本海と太平洋間を頻繁に行き来すると推定され、同時に、0.5に近い判別結果が散見され、

また、陸奥湾の個体の発生海域がいずれも太平洋生まれと判別された。陸奥湾で産卵するマダラは、陸奥湾生まれが成長して産卵回帰していることが示されており（青森水総研 2018b）、さらに陸奥湾は日本海を流れる津軽暖流の影響を強く受ける（大谷・寺尾 1974）ことから、陸奥湾で採捕されたマダラの中には、陸奥湾生まれが高い割合で含まれており、判別結果が 0.5 に近い値、あるいは日本海に近い値を示す個体が多く見られるはずである。しかしながら、今回の耳石縁辺部を指標としたモデルでは日本海生まれと判別される個体は少なく、陸奥湾では皆無であり、今回の判別結果には疑義が残った。以上より、若齢期から未成魚期の生息海域の判別結果は誤判別となっている可能性が高い。

この要因として、生息海域が耳石中の元素組成に及ぼす影響は、個体の成長に応じて変化することが考えられるため、耳石縁辺部以外、特に若齢期の判別結果は誤判別結果が多数混在する可能性があり、現時点で生活史全体の移動履歴を推定する手法として用いるのは適切ではないと考えられた。今後、生活史を通じた移動履歴推定手法の確立には、指標データとする耳石サンプルを、稚魚から高齢魚まで幅広く収集、分析した上で、再検討する必要があるだろう。

第3章 マダラ陸奥湾産卵群の資源構造と変動要因

3.1 目的

現在、日本周辺のマダラは、太平洋北部、日本海、北海道の3つの系群、集団に分けて資源評価されている。これらの系群、集団間の長期的な漁獲動向は大きく異なっている（水産庁 2018a, b, c）が、ミトコンドリア DNA 解析からは、山陰地方のみが明瞭に区別され、その他の海域間では不明瞭と報告されている（Suda ら 2017）。

本研究でテーマとした陸奥湾産卵群の 1985 年以降の漁獲量（三浦 2018）および、各系群集団別の漁獲量（水産庁 2018a, b, c）を比較すると、いずれの系群、集団でも長期的に大きく変動するが、最大漁獲量と最小漁獲量の増減幅は太平洋北部、日本海、北海道が 3–9 倍程度であるのに対し、陸奥湾産卵群は約 87 倍と明らかに異なっている（Fig.16）ことや、第 1 章で述べた通り強い回帰性を持つことから、他の系群、集団と分布域は重複するが、一定の独立性を持つ資源だと判断できる。

本章では、陸奥湾産卵群の資源を適切に管理、利用する上で重要な資源の評価に必要な情報を得るため、年齢形質として耳石を用い、薄片観察による漁獲物の年齢査定を行い、年齢別漁獲個体数を推定した。また、資源量推定手法の一つとして広く用いられる VPA（Virtual Population Analysis）による資源個体数の算出を行い、マダラ陸奥湾産卵群の資源変動を検証した。

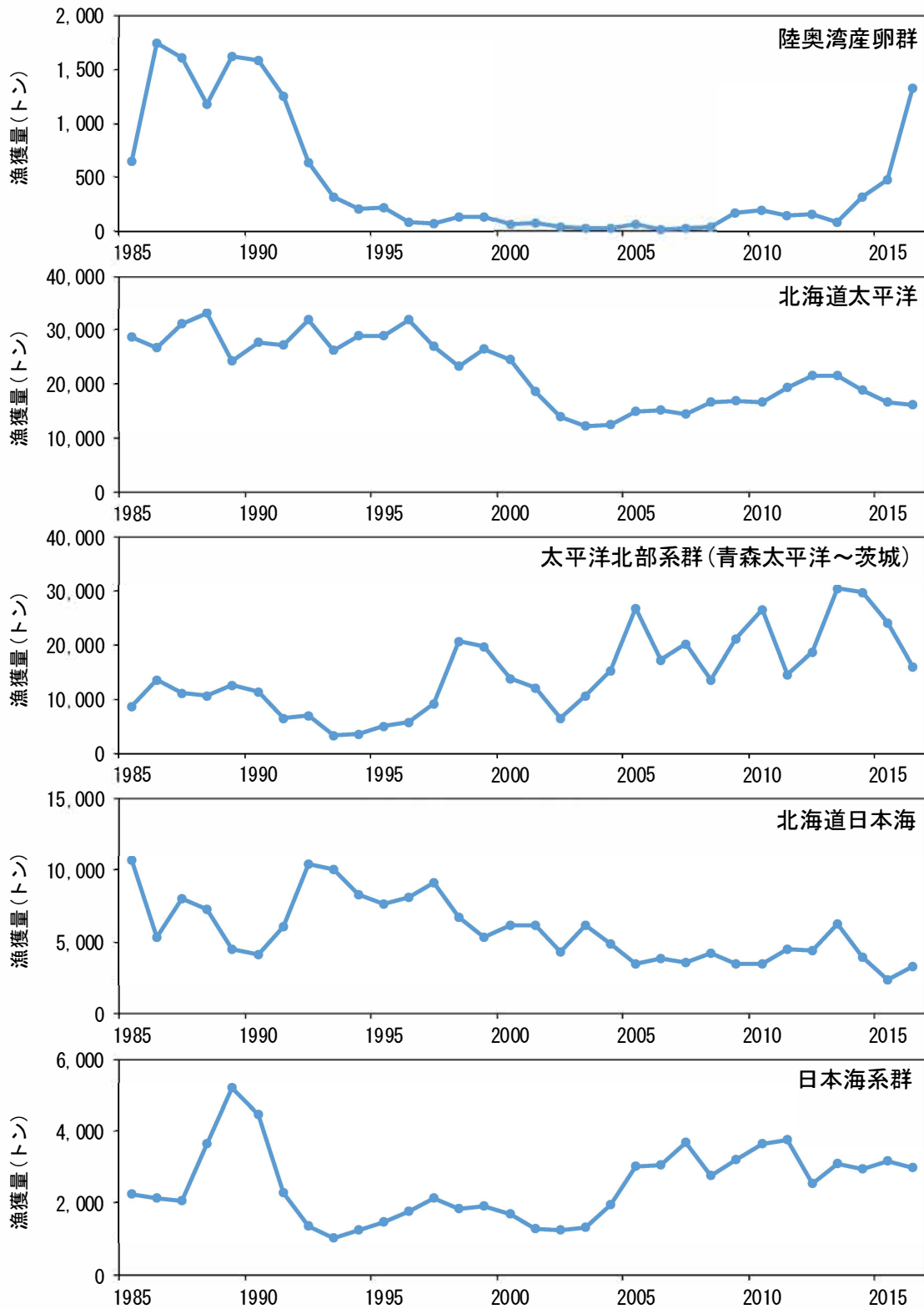


Fig.16 マダラ陸奥湾産卵群および各系群，集団の漁獲動向

3.2 材料および方法

3.2.1 年齢査定および漁期年別全長組成

陸奥湾のマダラ主漁期である12月-翌年3月を含むよう、漁期年を9月-翌年8月までと定義した。2009年漁期から2017年漁期に脇野沢村漁業協同組合に水揚げされたマダラのうち、合計1,256個体について全長測定および雌雄判別を行い、扁平石（以後、耳石と称す）を採取した。なお、調査地の脇野沢村漁業協同組合は、1980年以降の陸奥湾内におけるマダラ漁獲量が常に1位または2位で、陸奥湾全体における漁獲量の23-78%、平均41%を占める主要港であり（Fig.17）、マダラ漁獲のほとんどを定置網漁業の一種である底建網漁業による漁獲が占めており、漁業種類によるサイズ選択が生じないことから、陸奥湾全体の漁獲実態を把握するのに適している地点と判断し年齢査定用サンプルおよび全長組成調査の対象地点として選定した。

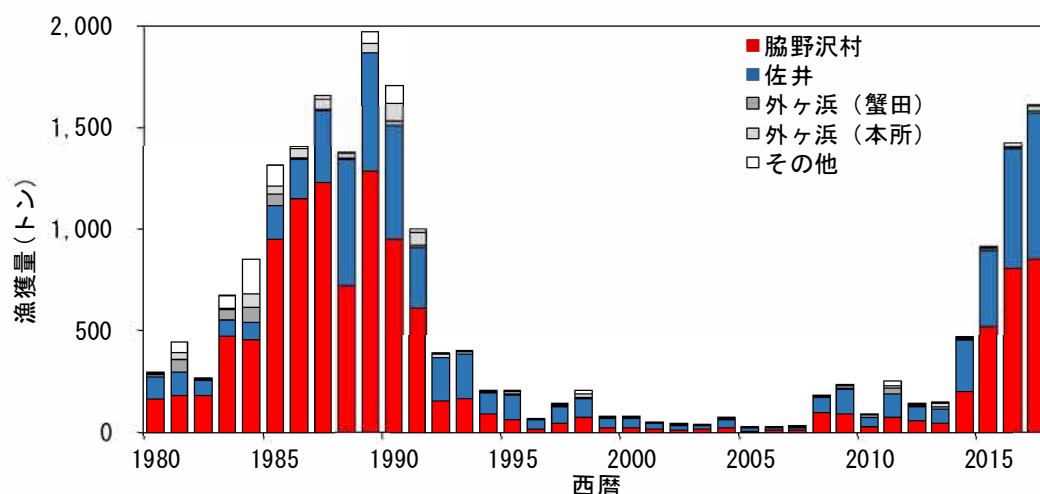


Fig.17 漁協別マダラ漁獲量（陸奥湾）。陸奥湾では脇野沢村漁協と佐井漁協が漁獲の大半を占める。

採取した耳石は洗浄，乾燥後に，破損や奇形等の異常がある場合を除き，原則として右の耳石をエポキシ樹脂 Specifix-20kit（丸本ストルアス社）に包埋後，硬組織精密切断機（ライカ社，ゼーゲミクロトーム Leica SP1600）を用いて耳石核を通る短軸方向に切断し，厚さ 0.20–0.25 mm の薄片とし，スライドガラスに接着剤で固定して観察標本とした (Fig.18)。輪紋は双眼実態顕微鏡下の落射光下で行い，桜井ら（1984）の方法に従って透明帯を計数し，年齢とした。なお，年齢起算日は漁期年の区切りに合わせて9月1日とした。

体サイズと年齢の関係を漁期年毎に評価するため，年齢査定結果を漁期年別，かつ全長 5 cm 毎に整理し，漁期年別 Age-length key とした。また，漁期年を区別せずに全個体の査定結果による合算 Age-length key を作成し，2004–2008 年漁期の年齢別漁獲個体数推定に用いた。



Fig.18 マダラ耳石（左）および薄片試料（右）

全長組成は、2004年漁期から2017年漁期の各漁期において、脇野沢村漁業協同組合の荷捌施設に水揚げされたマダラのうち、合計24,206個体について全長を5mmごとに測定して求めた。また、合わせて体重を0.1kg単位で測定した。

陸奥湾全体の漁期年別全長別漁獲個体数は、脇野沢村漁協における全長組成を陸奥湾全体の漁獲個体数で引き延ばして推定した。

陸奥湾全体の漁期年別漁獲個体数は、全長組成を行った全個体の平均体重を漁期年別に求め、陸奥湾全体の漁期年別漁獲量を平均体重で除して求めた (Table 5)。

漁期年別全長組成に漁期年別漁獲個体数をあてはめて全長別漁獲個体数を求め、さらに Age–Length key をあてはめて年齢別漁獲個体数を推定した。

Table 5 脇野沢村漁協におけるマダラ漁獲物の全長測定結果, 平均体重, 漁獲個体数

全長階級 (cm)	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
50 ≦ - < 55	3	7	6	15	15	2	2	5	11	5	6		3	
55 ≦ - < 60	68	31	29	106	104	20	42	15	65	72	27	5		1
60 ≦ - < 65	203	136	90	513	444	189	291	99	270	224	172	47	42	20
65 ≦ - < 70	323	195	161	500	359	477	514	209	343	310	427	135	138	50
70 ≦ - < 75	310	194	416	174	531	804	413	812	374	726	991	488	402	103
75 ≦ - < 80	210	178	538	125	552	809	540	1,125	686	483	543	673	327	114
80 ≦ - < 85	91	102	144	80	188	436	321	240	675	98	139	158	111	45
85 ≦ - < 90	24	51	49	37	37	105	119	64	233	60	31	18	9	11
90 ≦ - < 95	4	22	26	15	8	23	38	18	80	29	12	7	3	
95 ≦ - < 100	3	1	7	4	2	1	3	7	34	5	4	1		
100 ≦ - < 105		1	1	1	1	1		1	10		1			
105 ≦ - < 110						1			2					
計	1,239	918	1,467	1,570	2,241	2,868	2,283	2,595	2,783	2,012	2,353	1,532	1,035	344
平均体重 (kg)	4.63	4.18	4.97	3.72	4.27	4.83	4.93	4.69	5.34	4.20	4.58	4.96	4.89	4.63
漁獲量 (kg)	73,117	24,133	24,784	29,374	180,780	226,612	89,629	247,578	136,967	146,011	469,535	915,093	1,425,300	1,612,604
漁獲個体数	15,792	5,768	4,985	7,900	42,330	46,896	18,168	52,836	25,650	34,745	102,591	184,367	291,758	348,290

3.2.2 VPAによる資源量推定

漁獲量データは、青森県海面漁業に関する調査結果書（青森県 1980–2017）より、陸奥湾沿岸の青森県外ヶ浜町旧平館村からむつ市旧脇野沢村と佐井村までの陸奥湾内全域および湾口部まで（Fig.19）を、9月から翌年8月までを漁期年として集計し、9月を含む年で標記した。陸奥湾内の主要な漁獲地では、漁獲されたマダラを雌，雄，および『Bタラ』と称される放卵，放精後個体などの雌雄を選別しない銘柄の3つに整理されているが，マダラは雌雄の成長差がほとんどないとされる（服部 1994）ことから，本研究においても3銘柄を合算した漁獲量を用いた。

陸奥湾における年齢別漁獲個体数を用い，VPA（平松 2001）によって年齢別資源個体数を推定し，各年齢の平均体重を乗じて年齢別資源量を推定した。

対象年齢は，3歳魚–7歳魚および8歳魚以上をプラスグループとして扱い，自然死亡係数は田内・田中（1960）の式に，本研究での最高齢である9歳をあてはめて求めた0.278とした。漁獲係数について，7歳と8歳以上は同じとし，最近年の漁獲係数を過去10ヵ年における同一年齢の漁獲係数の平均値と仮定し，この仮定を達成する最近年における7歳の漁獲係数をMicrosoft Excelのソルバーを用いて探索的に求めた。2018年漁期の年齢別資源量については，2017年漁期までの漁獲データを基に前進法により求めた3–7歳魚および8歳以上の資源尾数に各年齢の平均体重を乗じて推定した。

3漁期年後の3歳魚資源個体数を加入量とし，産卵親魚量に対する比を再生産成功率

(Recruitment Per Spawning, 以後 RPS) とした。太平洋海域では緯度と初回成熟年齢の関係が示唆されており、高緯度域ほど晩熟傾向があるとされ、陸奥湾と同緯度帯である東北太平洋海域では3歳魚の成熟率が平均46.2%で、大きく年変化すると報告されている。陸奥湾産卵群の成熟に関する調査は行われていないため、便宜的に3歳魚の成熟率を50%、4歳魚以上を100%と仮定し産卵親魚量を求めた。

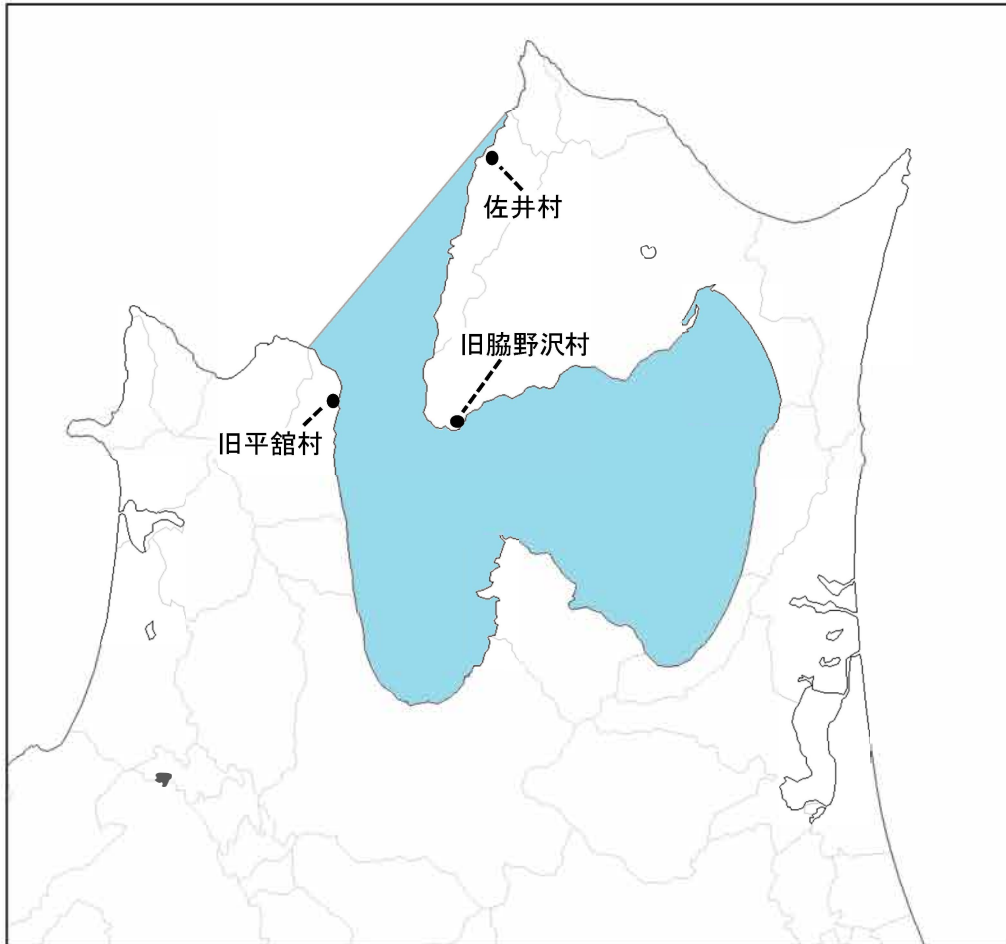


Fig.19 資源量推定の対象海域. 陸奥湾口部の津軽半島側（西側）は外ヶ浜町のうち旧平館村まで、下北半島側（東側）は佐井村までを陸奥湾海域として扱った。

3.3 結果

3.3.1 年齢別漁獲個体数

マダラ陸奥湾産卵群は3-9歳魚の7歳で構成され、同サイズ階級の中に最大で6歳が混在していた (Table 6)。また、全長組成は漁期毎に大きく変化せず、60 cmと75 cmにモードを持つ二峰型となった2008年漁期以外の全ての漁期で60-75 cmにモードが見られる単峰型の組成であった (Fig.20-1,2,3)。

陸奥湾全体の漁期年別年齢別漁獲個体数は、5、6歳魚が主体となっており、2016、2017年漁期は7歳魚も比較的多く漁獲された。

年齢別漁獲個体数を発生年別に見ると、2011年級群が最も多く、次いで2012年級群が多かった。いずれの発生年も4、5、6歳魚時の漁獲が主体となっていたが、2010、2011年級群は7歳魚以上の高齢魚時にもまとまった漁獲が見られた (Fig.21)。

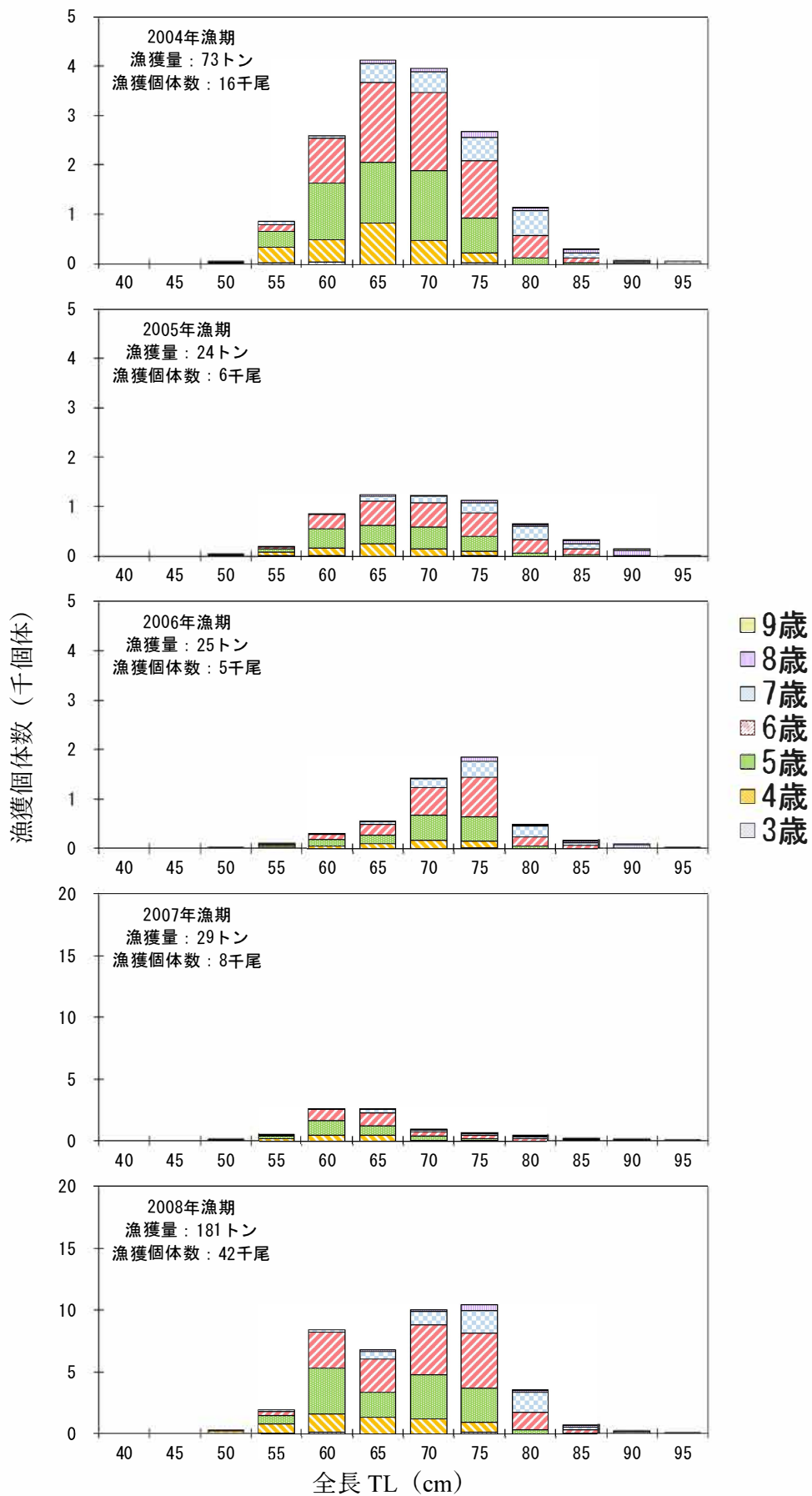


Fig.20-1 陸奥湾におけるマダラ漁期年別全長別年齢別漁獲個体数

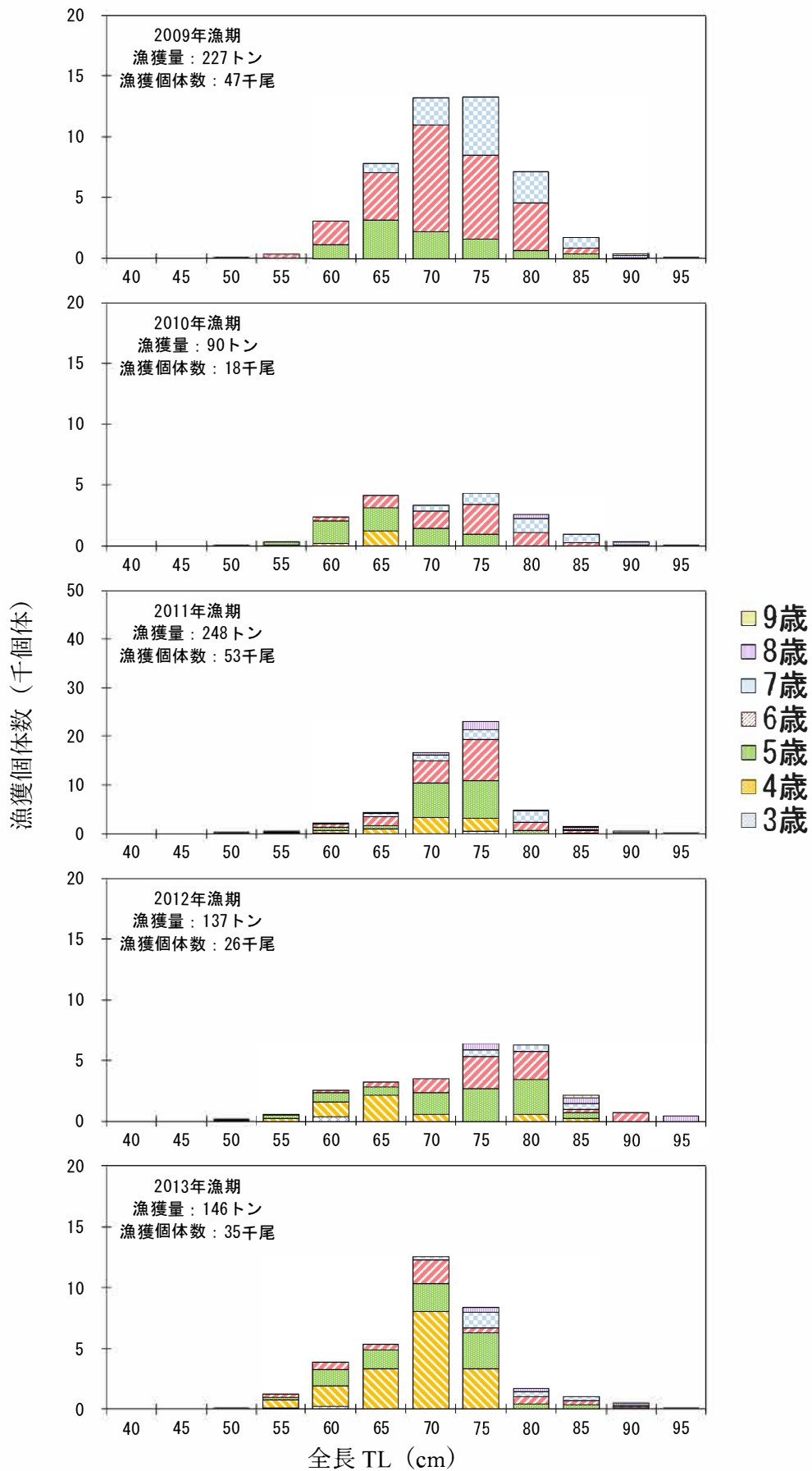


Fig.20-2 陸奥湾におけるマダラ漁期年別全長別年齢別漁獲個体数つづき

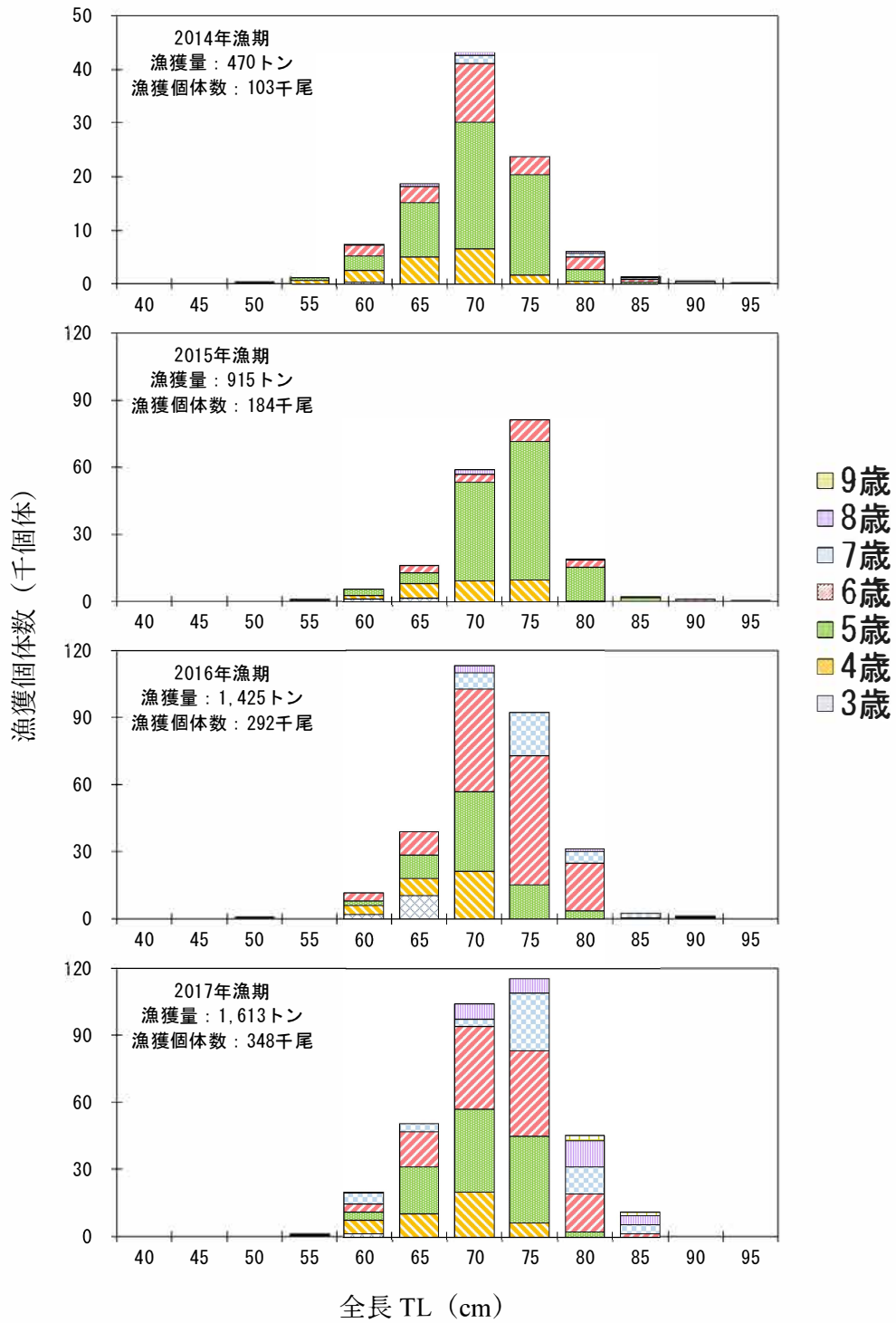


Fig.20-3 陸奥湾におけるマダラ漁期年別全長別年齢別漁獲個体数つづき

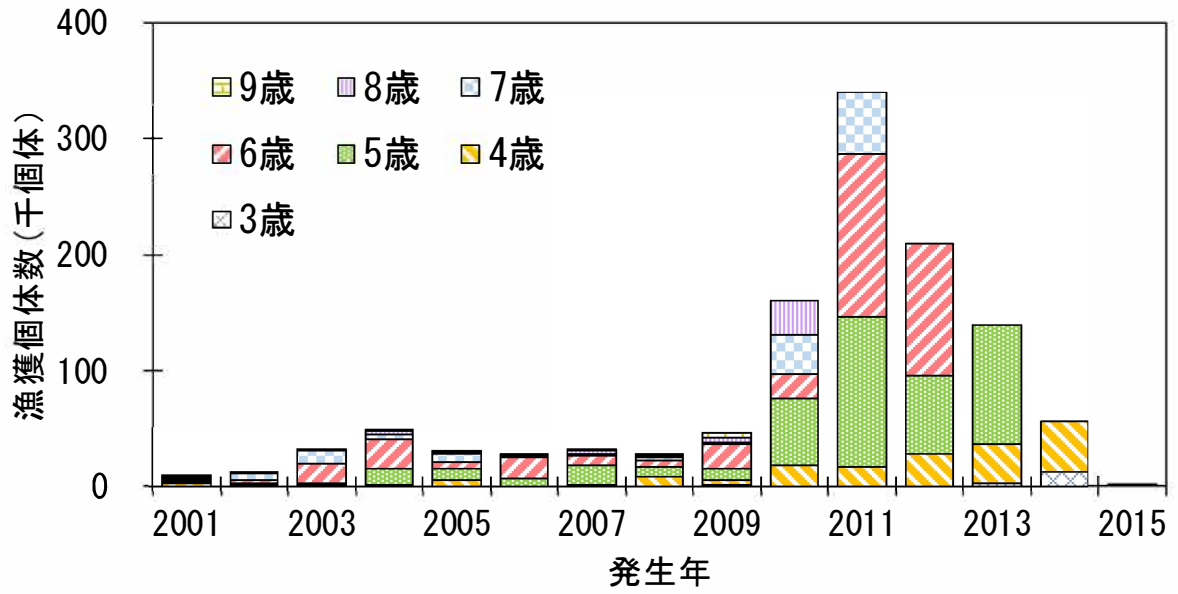


Fig.21 陸奥湾におけるマダラ発生年別年齢別漁獲個体数

3.3.2 年齢別資源構成

陸奥湾における資源個体数は、2012年漁期までは72-2,575千個体で横ばいに推移したが、2013年漁期に714千個体と2012年漁期の3倍に増加して以降、2016年漁期まで毎年増加し、2016年漁期に2,575千個体で最大となった。2012年漁期以降の各漁期年で最も資源個体数が多かった年齢は、2012、2013、2015、2016年漁期には3歳魚で資源全体の41-76%を占め、2014、2017、2018年漁期には4歳魚が最も多く、資源全体の27-41%を占めた (Fig.22)。

RPSは2010年漁期に3.63で最高、2008年漁期に0.32で最低となった。産卵親魚量と加入個体数は、親魚量が300トン未満では親魚量に関わらず100千個体程度で横ばいであったが、300トン以上では100-970千個体と大きく変動した (Fig.25)。

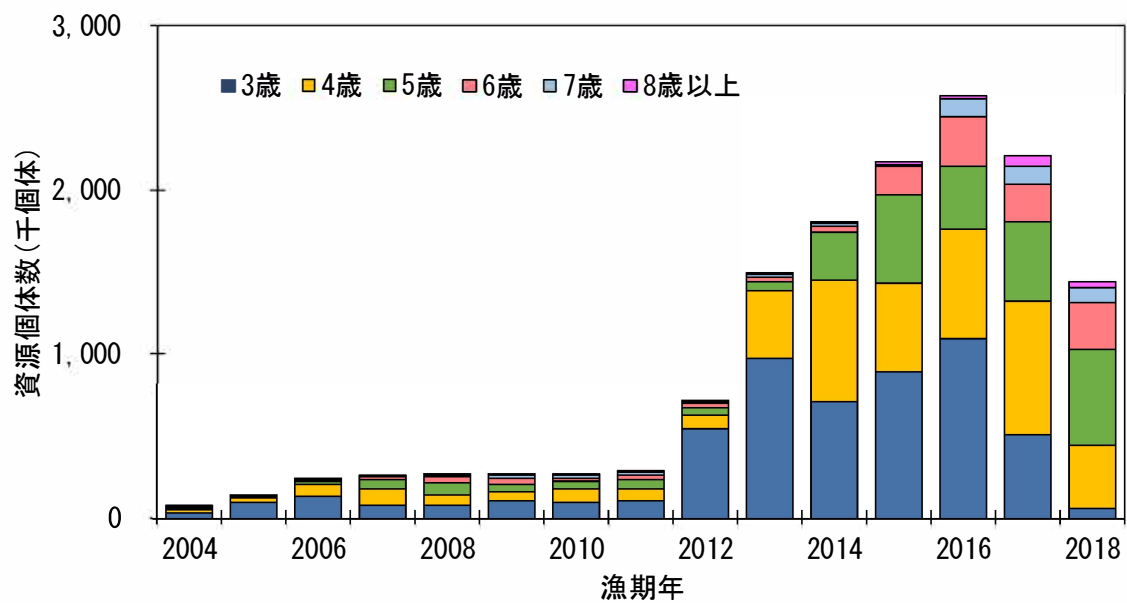


Fig.22 漁期年別年齢別資源個体数

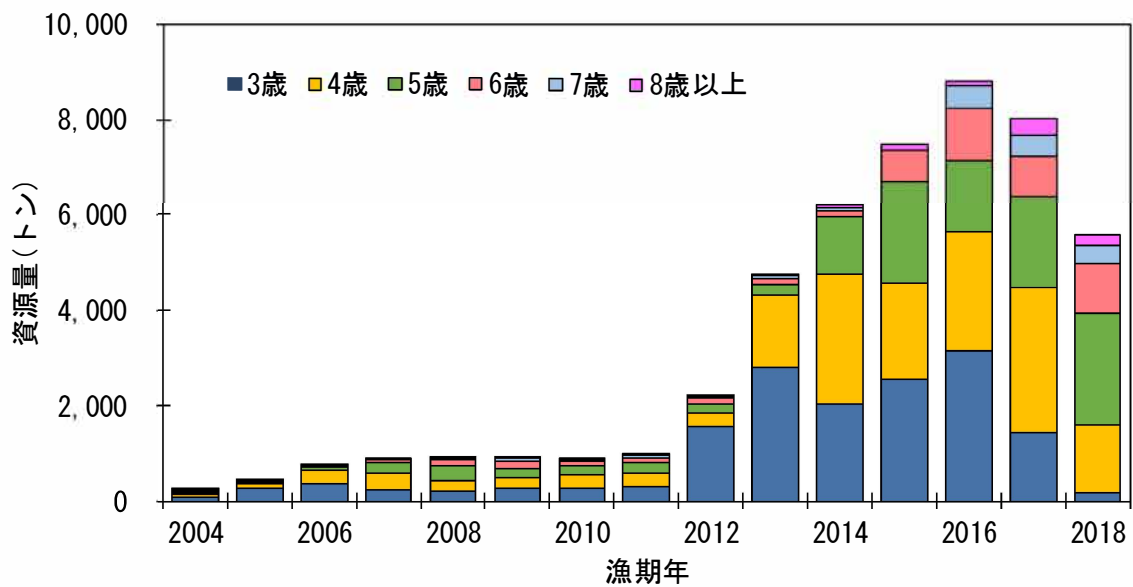


Fig.23 漁期年別年齢別資源量

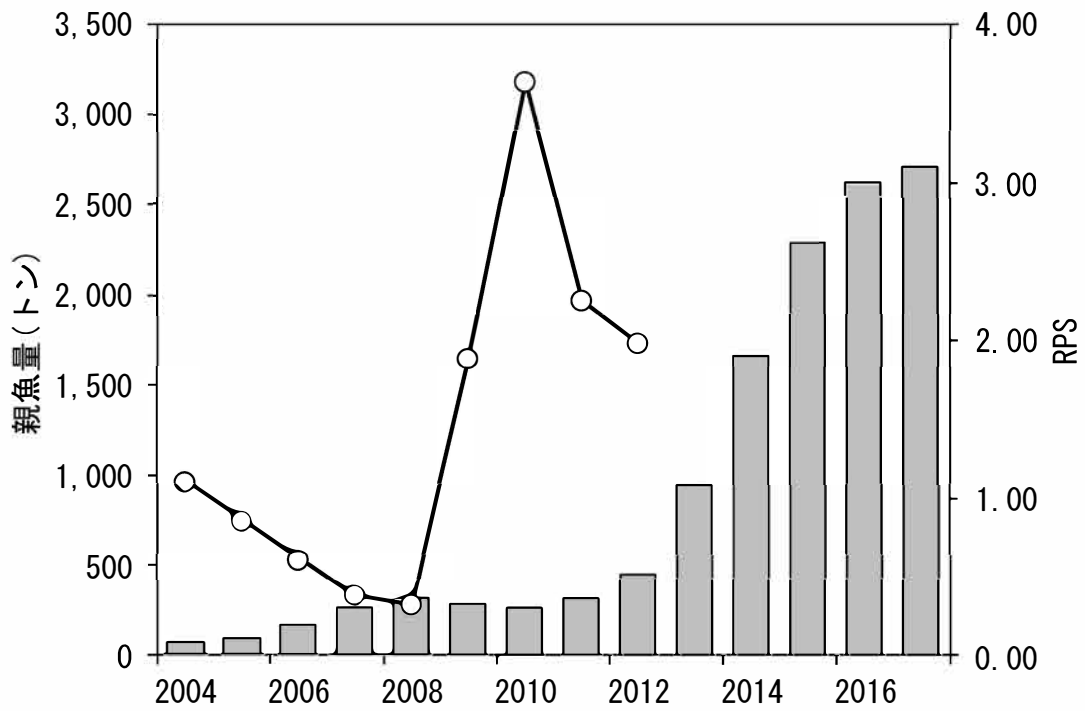


Fig.24 漁期年別の親魚量と RPS の動向. 棒グラフは親魚量, 折れ線グラフは RPS の変動をそれぞれ示す

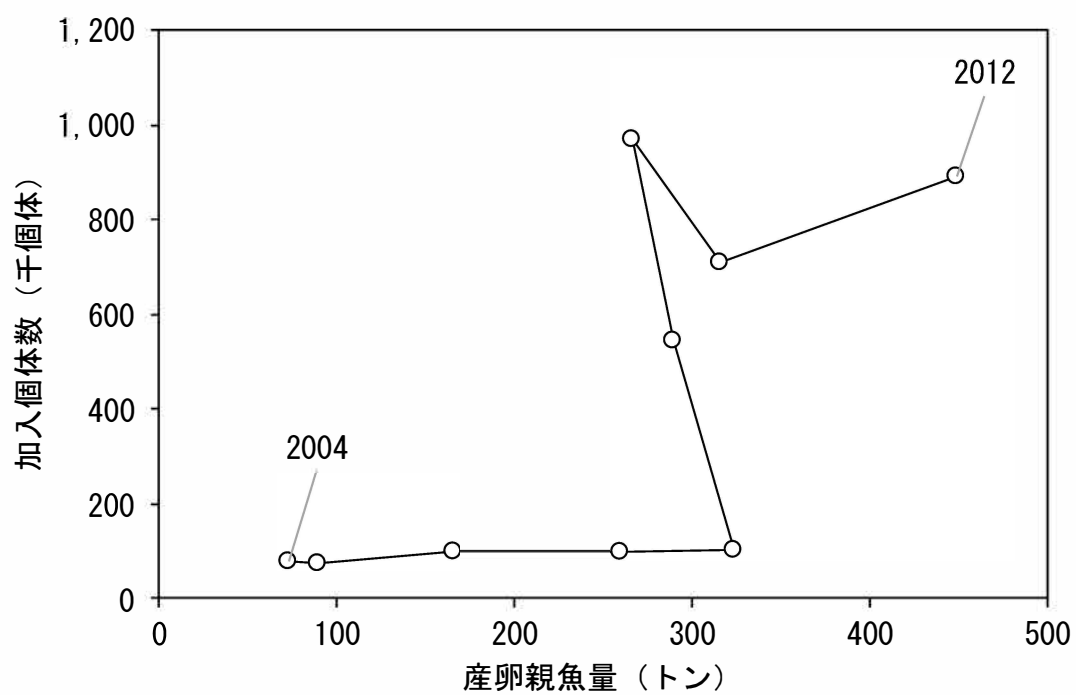


Fig.25 産卵親魚量と加入個体数の関係

3.4 考察

年齢形質を用いた年齢査定を行ったことで、マダラ陸奥湾産卵群は同サイズ階級中に最大で6つの年齢が混在し、さらにその割合は漁期によって大きく異なることが明らかになった。加えて、Age-length key は漁期毎に大きく変化することから、年齢構成を正確に把握するためには、漁期別に Age-length key を作成し、それを用いて年齢分解することが有効であると考えられた。マダラ陸奥湾産卵群の全長組成は漁期年毎に大きく変化しないため、混合正規分布（五利江 2002）のような、年齢形質を用いない簡便な年齢分解手法では年齢構成を正確に把握することが困難であり、モニタリングの継続には耳石による年齢査定を毎漁期行う必要がある。

一方、マダラは水産資源の中でも大型であることに加え、本種は「タチ」、「キク」と呼ばれる精巣や「真子」と呼ばれる卵巣が珍重されるため、成熟期には1個体あたりの魚価は高額となる。従って、今後も継続して漁期年毎の年齢査定を実施するためには、耳石収集のコストを下げる必要がある。本研究により、全長 60–75 cm の階級には多くの年齢が含まれており、50 cm 未満は比較的単純な年齢構成であることが明らかとなったことから、前者の全長階級は年齢査定個体数を多く、後者は少なくするといった、サンプリング個体数をサイズ別に効率化し、コストカットを図ることが可能であろう。

年齢別漁獲個体数と資源個体数の組成は異なっていた。陸奥湾はほぼ全域が泥底であり（環境省 2011）、産卵基質として砂泥底を選択する（Sakurai and Hattori 1996）マダラにと

って産卵に適した海域となっている。しかし、春から秋にかけての水温は、マダラの生息可能水温である 13–14°C（手塚 2006）を大きく超え 20°C以上となる（青森水総研 2018）こと、一般にマダラの生息水深とされる 200–400m（成松 2006）よりはるかに浅い環境であり、産卵以外の目的で陸奥湾に来遊する可能性は極めて低いと考えられる。

2012 年漁期以降の年齢別漁獲個体数は、2013 年漁期を除いて 5 歳魚以上が漁獲の主体となっており、資源の主体となっている 3, 4 歳魚が全体の漁獲個体数に占める割合は低い。前述のとおり、陸奥湾は産卵場であることから、漁獲物と資源の年齢構成に生じた差異は、4 歳魚以下の資源中に含まれる、未成熟のため来遊せず漁獲対象とならないマダラによるものと考えられる。つまり、マダラ陸奥湾産卵群は 4 歳魚以下の成熟率が低く、多くが成熟するのは 5 歳魚以上であると推察される。一般的にマダラの成熟は、雄で 3 歳魚、雌で 4 歳魚からとされており（水産庁 2018a, b, c）陸奥湾でも同様とされる（青森県 2018b）が、本研究の結果より、陸奥湾産卵群はやや晩熟傾向を持つ資源であると考えられた。また、親子関係については親魚量が約 300 トンを境に良好な加入が期待できるが、本研究では成熟率を仮定した上で推定した親魚量を用いており、今後、成熟度調査を行った上で精査する必要がある。

第3部 総括

第1章では、マダラ陸奥湾産卵群の産卵後親魚を対象とした約30年間に渡る長期間の標識放流結果を年代別に整理し、分布、移動域は北海道側の太平洋および日本海を中心に本州以南の両海域を含めて広がること、特に北海道太平洋海域では資源状態の影響を受けて分布、移動範囲が拡大、縮小し、資源豊度が高い時期には広範囲に及ぶことを明らかにした。また、放流翌冬以降の陸奥湾への回帰はいずれの年代でも常に見られ、回帰性の高さは資源状態の影響を受けず、普遍的であることを明らかにした。これらの成果から、陸奥湾産卵群は産卵期以外の期間の分布域がマダラ日本海系群、マダラ太平洋北部系群、マダラ北海道の3つの系群、集団と重複しつつも、独立性を保った集団であることが示された。

第2章では、データロガーによる標識放流、耳石中に含まれる微量元素分析によって、時系列に沿った移動履歴の推定を試みた。

データロガー標識放流により、陸奥湾で産卵を終えたマダラは3月から5月にかけて、2ヵ月程度の幅を持って湾外へと移動すること、また、経験水温をみると、陸奥湾内では陸奥湾外よりも低めの水温を選択しており、産卵後、湾内に留まる個体であっても、湾内の水温が昇温し始めた時点で、適水温の範囲内であっても湾外への移動を開始することなどが示唆された。陸奥湾外へ移動してからは水深100–300m、水温2–8°Cを選択しており、一般に知られるマダラの生息水深、水温と矛盾しなかったが、経験水温の急激な変動が見

られたことから、湾外では暖水と冷水の境界面付近を選択して分布することが明らかになった。

LA-ICP-MSによる耳石縁辺部の微量元素分析では、マダラの発生から死亡までの生活史を通じた太平洋、日本海の2海域間の移動履歴推定を検討した。成魚の耳石縁辺部では日本海、太平洋それぞれの海域内の異なる地点（例：日本海の青森沖と山形沖）では似た元素組成を持つが、両海域間では異なる元素組成を持つことが明らかになり、この違いを指標にすることで、直近の生息海域を判別することが可能であると示された。

耳石縁辺部を指標とした判別モデルで稚魚期、若齢期の生息海域判別を試みたところ、誤判別と考えられる結果が多数見られた。この要因として、生息海域が耳石中の元素組成に及ぼす影響は、個体の成長に応じて変化することが考えられた。従って今後、生活史を通じた移動履歴推定手法の確立には、指標データとする耳石サンプルを、稚魚から高齢魚まで幅広く収集、分析した上で、再検討する必要があるだろう。

第3章では、耳石による年齢査定および漁獲物の全長別漁獲個体数を基に、漁期年別年齢別漁獲個体数を求め、VPAによる資源量推定を行った。

推定された資源個体数は2012年漁期以降大きく増加しており、年齢別では3、4歳魚が多かった。漁獲物では5歳魚が最も多い傾向が見られたこと、陸奥湾が産卵場であり、成熟したマダラのみが来遊、漁獲される海域であることから、4歳魚以下の来遊割合が低いのは未成熟個体の割合が高いためと考えられ、雄では3歳魚、雌では4歳魚からとされる

本種の成熟開始年齢（青森県 2018b）とも矛盾しない結果となった。しかしながら 3 歳魚の成熟率は年変動が大きいことが指摘されている（成松 2006）ことから、陸奥湾産卵群においても成熟状況のモニタリングが必要であろう。

以上をまとめると、マダラ陸奥湾産卵群は、産卵直後から 2 ヶ月程度の期間で陸奥湾外へと移動し、翌冬以降再び陸奥湾へと産卵回帰すること、湾外での分布範囲は資源豊度の多寡に応じて変化し、近年では 2012 年漁期以降の資源量の増加に伴って分布範囲が広がっているものと考えられ、大きな回遊を行わないとする一般的なマダラの回遊生態とは異なる生態を持ち、また、耳石中の微量元素を基にした移動履歴推定は、指標データを充実させることにより、移動履歴の推定が可能になると考えられた。今後、より詳細に系群、集団を判別するための手法として実用化されることが望まれる。

本研究の成果は、マダラ陸奥湾産卵群の資源管理を検討する際、漁獲量や努力量の管理対象とすべき地理的範囲や効果的な管理項目を決定するための重要な情報を与えるものであり、現在、比較的良好な資源状態にある本資源の悪化を抑制する一助となりうる。

謝辞

この研究に取り組むにあたり、寛大な御対応と適切な御助言を賜り、丁寧にご指導してくださった弘前大学の東信行教授に深く感謝いたします。

弘前大学の曾我部篤准教授，岩手大学の東淳樹講師，帯広畜産大学の赤坂卓美助教には、本研究に関して様々なご助言を賜りました。深く感謝申し上げます。

東京大学の竹二雄名誉教授，東京大学大気海洋研究所の白井厚太郎助教，杉原奈央子博士には微量元素分析に関連し，こちらからの施設使用のお願いをご快諾くださり，さらに LA-ICP-MS の操作方法など基礎的な部分からご指導を賜りました。深く感謝申し上げます。

地方独立行政法人青森県産業技術センター水産総合研究所の天野勝三前所長(現 一般社団法人青森県水産振興会)，野呂恭成所長，伊藤欣吾資源管理部長，内水面研究所の長崎勝康調査研究部長には，大学院への社会人入学，研究活動の環境を整えていただき，さらに研究内容についてもたくさんのご助言を賜りました。深く感謝申し上げます。

弘前大学の工藤誠也博士には，データ解釈，特に統計解析に関して多くの御助言を賜りました。深く感謝申し上げます。

最後に，時間は掛かりましたが，仕事と学業の両立をどうにかやり遂げられたのは，サポートしてくださった職場の先輩，同輩，後輩，見守ってくれた家族の支えあってのものです。どうもありがとうございます。

引用文献

青森県（2012）青森県資源管理指針，青森県，3-4.

青森県（2018a）青森県海面漁業に関する調査結果書，青森県，1-71.

青森県（2018b）未来につなぐ資源管理 2018，青森県，1-39.

地方独立行政法人青森県産業技術センター水産総合研究所（2018a）青森県資源管理基礎調査結果報告書．地方独立行政法人青森県産業技術センター水産総合研究所，45pp.

地方独立行政法人青森県産業技術センター水産総合研究所（2018b）海ナビ@あもり．
http://www.aomori-itc.or.jp/uminavi/new_data.html

五利江重昭（2002）MS-Excel を用いた混合正規分布のパラメータ推定．水産増殖，50(2)，243-249.

服部 努（1994）マダラの成長，成熟および繁殖生態に関する研究．北海道大学博士論文，150pp.

服部努，・伊藤正木・成松庸二（2004）マダラ・スケトウダラ新規加入量調査．東北底魚研究，24，146-147.

Higuchi, T., S. Watanabe, R. Manabe, T. Kaku, A. Okamura, Y. Yamada, M. J. Miller, and K. Tsukamoto (2018) Tracking *Anguilla japonica* silver eels along the west Marina ridge using Pop-up archival transmitting tags. Zoological Studies 57: 24, 14pp.

平松一彦（2001）VPA(Virtual Population Analysis). 「平成 12 年度資源評価体制確立推進事業報告書—資源解析手法教科書—」（田中昌一，青木一郎，赤嶺達郎，一丸俊雄，岸田 達，高場 稔，田中栄次，福田雅明，谷津明彦，由木雄一，和田時夫編）。社団法人日本水産資源保護協会，東京．104-128.

藤沢千秋・夏目雅史（1995）木古内湾のマダラ成魚の移動回遊. 北海道立水産試験場研究報告, 47, 25-31.

福田慎作・横山勝幸・早川 豊・中西広義（1985）青森県陸奥湾口部におけるマダラ成魚の標識放流について. 栽培漁業技術開発研究, 14, 71-77.

伊藤正木・安井 港・津久井文夫・多部田修（1999）標識放流結果から推定した遠州灘におけるトラフグ成魚の移動・回遊. 日本水産学会誌, 65, 175-181.

環境省（2011）閉鎖性海域ネット.

https://www.env.go.jp/water/heisa/heisa_net/waters/mutuwan.html, 2011 年 4 月 1 日.

菅野泰次・上田祐司・松石 隆（2001）東北地方および北海道太平洋側海域におけるマダラの系群構造. 日本水産学会誌, 67, 67-77.

北川大二・服部努・成松庸二（2002）東北海域における底魚資源のモニタリング. 月刊海洋, 34, 793-798.

工藤誠也・大宮慧子・三浦太智・渡邊 泉・東 信行（2015）生体内微量元素を用いた青森県沿岸マダラの回遊推定. 日本水産学会誌, 81, 227-233.

桑田 博・塚本勝巳（1987）アリザリン・コンプレクソンによるマダイ稚仔魚の耳石標識-I. 栽培漁業技術開発研究, 16(2), 93-107.

桑田 博・塚本勝巳（1989）アリザリン・コンプレクソンによるマダイ稚仔魚の耳石標識-II. 栽培漁業技術開発研究, 17(2), 115-128.

Lluch-Belda, D., R. J. M. Crawford, T. Kawasaki, A. D. MacCall, R. H. Parrish, R. A. Schwartzlose and P. E. Smith (1989). World-wide fluctuations of sardine and anchovy stocks: the regime problem. *South African Journal of Marine Science* 8, 195-205.

三島清吉（1989）日本周辺におけるマダラ *Gadus macrocephalus* TILESIIUS の資源とその生物学的特性. 北太平洋漁業国際委員会研究報告, 42, 172-179.

- 三浦太智（2018）資源管理基礎調査マダラ．青森県産業技術センター水産総合研究所事業報告, 108-114.
- 森 賢・中村好和（2001）標識放流調査から推定したスルメイカ太平洋系群の回遊経路．北海道区水産研究所研究報告, 65, 21-43.
- 森岡泰三・山本和久・堀田和夫（1998）石川県能登島沖に放流されたマダラ人工種苗の成長と移動．栽培漁業技術開発研究, 27, 11-26.
- 中島博司・新田 朗（2005）標識放流試験から見たトラフグ親魚の伊勢湾口部産卵場への回帰．日本水産学会誌, 71(5), 736-745.
- Nakamura, Y., Y. Sakurai (1991) Validation of daily growth increments in statoliths of Japanese common squid *Todarodes pacificus*. Nippon Suisan Gakkaishi, 57(11), 2007-2011.
- 成松庸二（2006）マダラの生活史と繁殖生態－繁殖特性の年変化を中心に－．水産総合研究センター研究報告（別冊），4，137-146.
- 西本豊弘（1984）北海道の縄文・続縄文文化の狩猟と漁撈－動物遺存体の分析を中心として－．国立歴史民俗博物館研究報告，4，1-15.
- 西本豊弘（1985）北海道の狩猟・漁撈活動の変遷．国立歴史民俗博物館研究報告，6，53-74.
- 野呂恭成（2016）脇野沢マダラ豊漁と軍用機献納．水と漁，22，7-8.
- 大竹二雄（2006）海域におけるアユ仔稚魚の生態特性の解明．水産総合研究センター研究報告（別冊），5，179-185.
- 扇田いずみ・高坂祐樹（2017）陸奥湾海況自動観測事業．平成27年度青森県産業技術センター水産総合研究所事業報告, 198-220.
- 大谷清隆・寺尾豊光（1974）むつ湾の海洋構造．北海道大学水産学部研究彙報, 24, 100-131.

Sakurai, Y., T. Hattori (1996) Reproductive behavior of Pacific cod in captivity. Fisheries Science. 62(2), 222-228.

桜井泰憲・福田慎作 (1984) 陸奥湾に來遊するマダラの年齢と成長. 青森県水産増殖センター研究報告, 3, 9-14.

桜井泰憲・山本 潤 (2009) レジームシフトに回答する魚類とイカ類資源の変動-プロセス研究の重要性-. 月刊海洋, 41, 33-42.

佐藤晋一 (2009) 津軽海峡における水温の長期変動. 青森県水産総合研究センター研究報告, 6, 9-13.

Suda, A., N. Nagata, A. Sato, Y. Narimatsu, H. H. Nadiatul and M. Kawata (2017) Genetic variation and local differences in Pacific cod *Gadus macrocephalus* around Japan. Journal of Fish Biology, 90, 61-79

塩田浩二・北田修一 (1992) 標識放流実験から推定した瀬戸内海燧灘のガザミの生活史. 日本水産学会誌, 58, 2297-2302.

水産庁 (2007) マダラ陸奥湾産卵群資源回復計画, 1-10.

水産庁 (2018a) 平成 29 (2017) 年度マダラ北海道の資源評価. 我が国周辺水域の漁業資源評価, 967-993.

水産庁 (2018b) 平成 29 (2017) 年度マダラ太平洋北部系群の資源評価. 我が国周辺水域の漁業資源評価, 994-1,024.

水産庁 (2018c) 平成 29 (2017) 年度マダラ日本海系群の資源評価. 我が国周辺水域の漁業資源評価, 1,025-1,065.

水産庁 (2018d) 平成 29 (2017) 年度マイワシ太平洋系群の資源評価. 我が国周辺水域の漁業資源評価, 15-52.

- 水産庁 (2018e) 平成 29 (2017) 年度マサバ太平洋系群の資源評価. 我が国周辺水域の漁業資源評価, 157-200.
- 竹谷裕平・奈良賢静・小坂善信 (2013) バイオロギングによるキアッコウの行動解析. 水産技術, 6(1), 1-15.
- 高橋昌也 (2006) 耳石温度標識技術を用いたサケ・マス類の標識放流と調査研究. 養殖, 542, 82-85.
- 高橋庸一 (1994) アリザリン・コンプレクソンの経口投与によるヒラメ稚魚の耳石染色. 日本水産学会誌, 60(5), 611-615.
- 田中昌一 (1960) 水産生物の Population Dynamics と漁業資源管理. 東海区水産研究所研究報告, 28, 1-200.
- 手塚信弘 (2006) 親魚飼育の具体例-マダラ. 水産総合研究センター研究報告別冊, 4, 147-149.
- 手塚信弘・荒井大介・島 康洋・桑田 博 (2008) マダラ稚魚の腹鰭抜去標識の有効性. 水産技術, 1, 73-76.
- 友田 努・桑田 博 (2006) pH 調整したアリザリン・コンプレクソン溶液の希釈によるハタハタ稚魚の耳石標識. 日本水産学会誌, 72(1), 76-78.
- Townsend D.W., R. L. Radtke, D. P. Malone and J. P Wallinga (1995) Use of otolith strontium calcium ratios for hindcasting larval cod *Gadus morhua* distributions relative to water masses on Georges bank. Marine Ecology Progress Series, 119, 37-44.
- Tsukamoto Katsumi (1985) Mass-marking of ayu eggs and larvae by tetracycline-tagging of otoliths. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 51(6), 903-911.
- 塚本勝巳 編 (2010) 魚類生態学の基礎. 恒星社厚生閣, 317pp.

浦和茂彦（2001）さけ・ます類の耳石標識：技術と応用．さけ・ます資源管理センターニュース，7，3-11.

涌坪敏明（1997）青森県陸奥湾におけるマダラ漁獲量および水温・気温の経年変動について．水産海洋研究，61，81-83.

山田（1999）アーカイバルタグによるクロマグロの移動生態．遠洋，104，2-5.

Yamane, K., K. Shirai, Y. Nagakura, and T. Otake (2012) Assessing the usefulness of otolith elemental compositions for evaluating the population structure of the Pacific herring *Clupea pallasii* in northern Japan. Fisheries Science. 78, 295-307.